

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Εμμανουήλ Ι. Θαλασσινάκης

Αθήνα, Φεβρουάριος 2008



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ και ασφαλείας λειτουργίας των ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΆΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Εμμανουήλ Ι. Θαλασσινάκης

Συμβουλευτική Επιτροπή: Ευάγγελος Διαλυνάς (Επιβλέπων Καθηγητής) Νικόλαος Χατζηαργυρίου Σταύρος Παπαθανασίου

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 29^η Φεβρουαρίου 2008.

Ε. ΔιαλυνάςΝ. ΧατζηαργυρίουΣ. ΠαπαθανασίουΚαθηγητής Ε.Μ.Π.Καθηγητής Ε.Μ.Π.Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....

..... Α.-Γ. Σταφυλοπάτης

•••••• Γ. Κορρές Καθηγητής Ε.Μ.Π. Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Σ. Κόλλιας

.....

..... Γ. Σταυρακάκης Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης

Αθήνα, Φεβρουάριος 2008

.....

Εμμανουήλ Ι.Θαλασσινάκης Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Εμμανουήλ Ι.Θαλασσινάκης, 2008. Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητική φύσης, υπό την προϋπόθυεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της ενέργειας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται στο συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η παρούσα Διατριβή έχει ως αντικείμενο την πιθανοτική ανάλυση της αξιοπιστίας και ασφάλειας λειτουργίας των απομονωμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία είναι περισσότερο ευάλωτα λόγω του μικρού αριθμού των μονάδων παραγωγής και της έλλειψης στήριξης από γειτονικά συστήματα. Οι βασικοί μοχλοί μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η αύξηση της ασφάλειας κατά την λειτουργία των συστημάτων είναι η αυτόματη αποκοπή φορτίου μέσω των ηλεκτρονόμων υποσυχνότητας και η τήρηση ικανής στρεφόμενης εφεδρείας, ταχείας απόκρισης.

Καταρχάς, παρουσιάζεται το γνωστό μοντέλο δυναμικής απόκρισης της συχνότητας σε διαταραχές ισχύος που προέρχονται από ξαφνική απώλεια είτε παραγωγής είτε φορτίου. Το μοντέλο αυτό επιλύεται με αριθμητική μέθοδο η οποία επεκτείνεται προσομοιώνοντας, επίσης, την λειτουργία της προστασίας αποκοπής φορτίου. Επί της καμπύλης απόκρισης συχνότητας ορίζονται ορισμένα βασικά μεγέθη όπως είναι, οι χαρακτηριστικές τιμές της συχνότητας (κατώτατη, ανώτατη και εναπομένουσα) καθώς επίσης, οι κρίσιμοι χρόνοι για την μονάδα και για το σύστημα. Με στόχο τη ποσοτικοποίηση του επιπέδου ασφάλειας του συστήματος, ορίζονται πιθανοτικοί δείκτες επί των βασικών μεγεθών απόκρισης συχνότητας (ασφάλειας), όπως η αναμενόμενη κατώτατη συχνότητα μετά από απώλεια παραγωγής, ο αναμενόμενος κρίσιμος χρόνος για τους στροβίλους κλπ. Επειδή η αύξηση του επιπέδου ασφάλειας μέσω της προστασίας αποκοπής φορτίου έχει ως συνέπεια την μείωση της αξιοπιστίας τροφοδότησης των πελατών, ορίζονται παράλληλα πιθανοτικοί δείκτες αποκοπής φορτίου (αξιοπιστίας), όπως η αναμενόμενη διάρκεια διακοπών πελατών, η αναμενόμενη ετήσια μη διαθέσιμη ενέργεια λόγω λειτουργίας της εν λόγω προστασίας κλπ.

Αναπτύσσεται αριθμητική μέθοδος προσομοίωσης της λειτουργίας απομονωμένου συστήματος με χρησιμοποίηση της ακολουθιακής μεθόδου Monte-Carlo. Παράγονται τυχαίοι χρόνοι βλαβών και επισκευών των μονάδων και προσομοιώνεται η ανά ώρα κατανομή φορτίου, η πρωτεύουσα ρύθμιση των μονάδων σε γεγονότα βλαβών, η λειτουργία της προστασίας αποκοπής φορτίου, η δευτερεύουσα ρύθμιση και η αξιοποίηση της στρεφόμενης εφεδρείας. Με βάση την προσομοίωση αυτή και λαμβάνοντας ικανό αριθμό ετών λειτουργίας του συστήματος, γίνεται εφικτός ο υπολογισμός των προηγούμενων πιθανοτικών δεικτών. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να ελεγχθεί και να επιλεγεί τυχαία στρατηγική αποκοπής φορτίου εφόσον εξασφαλίζει αποδεκτούς πιθανοτικούς δείκτες.

Στη συνέχεια, διατυπώνονται και αναλύονται δύο αντίστροφα προβλήματα τα οποία βρίσκονται εγγύτερα στη πράξη. Δηλαδή, με δεδομένους, επιθυμητούς δείκτες που αφορούν είτε στην ασφάλεια λειτουργίας είτε στην αξιοπιστία τροφοδότησης των

πελατών, ζητείται να προσδιοριστεί η κατάλληλη στρατηγική αποκοπής φορτίου η οποία ικανοποιεί τους δείκτες αυτούς. Αναπτύσσεται γεννήτρια προτύπων μέσω της οποίας δημιουργούνται διανύσματα τυχαίων στρατηγικών και για κάθε μια από αυτές επιστρατεύεται η αναπτυχθείσα μέθοδος Monte-Carlo και παράγονται τα αντίστοιχα διανύσματα δεικτών. Έκαστη στρατηγική μαζί με τα αντίστοιχα διανύσματα δεικτών συγκροτεί ένα πρότυπο. Τα πρότυπα αυτά χρησιμεύουν για την εκπαίδευση δύο πολυεπίπεδων, τεχνητών νευρωνικών δικτύων με ψηφιακές εξόδους. Κάθε νευρωνικό δίκτυο έχει ως είσοδο είτε τους δείκτες ασφάλειας λειτουργίας είτε τους δείκτες αξιοπιστίας τροφοδότησης πελατών και ως έξοδο ψηφιακές κλάσεις που αντιστοιχούν σε καθορισμένες, γνωστές στρατηγικές.

Τέλος, εξετάζεται η συμβολή της υπερφόρτισης, βραχείας διάρκειας, των μονάδων παραγωγής επί της ασφάλειας του συστήματος. Προτείνεται βελτιωμένο μοντέλο ρυθμιστή στροφών το οποίο επιτρέπει την βραχύχρονη υπερφόρτωση της μονάδας, σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα. Αναπτύσσεται αριθμητική μέθοδος για την βέλτιστη κατανομή της στρεφόμενης εφεδρείας. Αποδεικνύεται ότι, μέρος μόνο της στρεφόμενης εφεδρείας απόκρισης, όπως αυτή υπολογίζεται από το μοντέλο της ισοδύναμης μονάδας, στην πραγματικότητα υφίσταται. Εν κατακλείδι, γίνεται στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων και αποκαλύπτεται ότι, η συσχέτιση της στρεφόμενης εφεδρείας είναι της τάξης του 70% και άρα, κάθε αύξηση της στρεφόμενης εφεδρείας δεν συνεπάγεται αναγκαστικά και αύξηση της ασφάλειας λειτουργίας.

ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ: απομονωμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, ασφάλεια, προστασία αποκοπής φορτίου, στρεφόμενη εφεδρεία, πρωτεύουσα ρύθμιση των μονάδων παραγωγής, ηλεκτρονόμοι υποσυχνότητας, υπερφόρτιση μονάδων παραγωγής μέθοδος Monte-Carlo, τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.

Summary

In this Thesis, there is a probabilistic analysis of operation reliability and security of isolated power systems which are more vulnerable due to the small number of generating units in operation and the absence of support from neighboring power systems. The main ways of increasing the system security at the stage of their operation are to use the underfrequency load shedding protection and to keep adequate emergency spinning reserve.

Initially, the well known model of frequency dynamic response is presented, which is used when an imbalance between the load demand and the generation occurs. A numerical method is developed to solve the model which also incorporates the operation of the load shedding protection. Some characteristic values on the frequency dynamic response are defined. These values are the undershoot, the overshoot and the residual frequencies, as well as the low frequency time intervals which are critical either for the system or for the turbines. In order to quantify the level of security, certain probabilistic indices concerning the characteristic values of frequency response (security) are presented, that are: the expected undershoot frequency due to a loss of generation event, the expected critical time for the turbines etc. The increase of security level by using the load shedding protection results inevitably in decreasing of the customer load reliability and quality. Therefore, some other probabilistic indices have to be defined. These incidents concern the load shedding (reliability) as they are, the expected duration of customer load interruptions, the expected annual not delivered energy due to the operation of the load shedding protection etc.

A new Monte-Carlo simulation method for setting the underfrequency load shedding protection of isolated power systems is presented. The method generates random times for the unit's failures and repairs and the operation of the system is simulated on the following three levels: first, the unit commitment and economic load-dispatching performed by System's Operator, second, the unit's primary regulation following each loss of generation event and third, the secondary regulation and the use of available spinning reserve. Using this method for a large number of year's operation, all the above probabilistic indices are evaluated. Therefore, by trial and error, it is possible to choose the load shedding strategy which provides acceptable probabilistic incidents.

Then, two inverse problems which are more interesting for the praxis are formulated and analyzed. That are, given a vector of indices (either reliability or security), to determine the vector of appropriate load shedding strategy that satisfies the desirable indices. For this reason, a pattern generator is developed which produces vectors of random load-shedding strategies. Then, for each random strategy, the previous Monte-Carlo simulation method is used to calculate the respective vector of indices. The set that consists of a strategy vector and the respective vectors of indices is a pattern. These patterns are used to teach two multilevel artificial neural networks. Each network has as an input either the vector of reliability indices or the vector of security indices while the outputs are digital ones that correspond to predefined strategy classes.

Finally, the contribution of short-time overloading of the generating units to the system security is studied. An improved speed-governor model is developed that permits the units short-time overloading according to the standards. A numerical method for optimal spinning reserve allocation in isolated power systems is developed. It is, also, demonstrated that only part of the emergency spinning reserve that is calculated by the equivalent unit model, actually exists. Moreover, a statistical analysis is committed showing that the correlation between spinning reserve and the frequency security criteria is about 70% and therefore, increasing the spinning reserve does not always implies improvement of the system security.

KEYWORDS: isolated power systems, security, load shedding protection, spinning reserve, generating units primary regulation, underfrequency relays, generating units overloading, Monte-Carlo method, artificial neural networks

Σχόλια - ευχαριστίες

Κάπου εδώ το ταξίδι τελειώνει. Φθάσαμε άραγε στην Ιθάκη ή μείναμε πέρα στο νησί των Φαιάκων ή στη χώρα των Λαιστρυγόνων; Η επιστημονική έρευνα σε αντίθεση με την Οδύσσεια δεν έχει μια μόνο Ιθάκη. Ο Οδυσσέας όταν ξεκινούσε το ταξίδι της επιστροφής του από την Τροία είχε προκαθορισμένο προορισμό, την γενέτειρα του όπου τον περίμενε υπομονετικά η σύζυγός του Πηνελόπη. Η έρευνα πολύ συχνά παρεκκλίνει από την αρχική ιδέα και οδηγείται σε νέες διαδρομές και διαφορετικές Ιθάκες. Ο λαβύρινθος της έρευνας είναι δαιδαλώδης και σε κάθε σταυροδρόμι παρουσιάζονται νέοι δρόμοι και ανοίγονται άλλοι ορίζοντες. Αυτή είναι εξ άλλου και η γοητεία της. Οι καινούργιοι κόσμοι της ανέγγιχτης ή αθέατης γνώσης, που περιμένουν τον τολμηρό θαλασσοπόρο ή τον υπομονετικό ερευνητή στις ημέρες μας, είναι άπειροι.

Για εκείνους που θα έχουν την υπομονή ή την περιέργεια να διαβάσουν τις γραμμές αυτές αισθάνομαι την ανάγκη να καταθέσω κάποια ψήγματα από την προσωπική μου εμπειρία στο όμορφο αυτό ταξίδι. Ποιος είναι, άραγε, ο τελικός απολογισμός μιας επίπονης προσπάθειας που κράτησε περισσότερο από πέντε χρόνια; Ποιο το κέρδος και ποιο το τίμημα; Τι ήταν εκείνο που ώθησε στην προσπάθεια αυτή παράλληλα με τα καθήκοντα μιας εξαιρετικά υπεύθυνης και απαιτητικής θέσης στην ΔΕΗ; Ποιοι οι άνθρωποι που μου στάθηκαν και με βοήθησαν;

Η ζωή παίζει πολλές φορές απίστευτα παιγνίδια. Έζησα την μοναδική ατυχία, μέσα στη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής να αποβιώσουν δύο από τα τρία μέλη της τριμελούς επιτροπής και μάλιστα στην ακμή της καριέρας τους. Όμως, η αναφορά σε ανθρώπους που έπαιξαν θετικό ρόλο και μας συμπαραστάθηκαν έχει, κατά την γνώμη μου, περισσότερη αξία και ειλικρίνεια όταν οι ίδιοι δεν βρίσκονται πια στην ζωή.

Ο εκλιπών Καθηγητής του ΕΜΠ, Γ. Κονταξής, ήταν ένας άνθρωπος που σημάδεψε την πορεία μου. Στο τέλος των προπτυχιακών μου σπουδών είχα αναλάβει διπλωματική εργασία στον Καθηγητή Β. Παπαδιά και είχα αρχίσει να πελαγοδρομώ όταν συνάντησα τον κ. Κονταξή, νεόφερτο τότε από την Αμερική, ο οποίος με βοήθησε να ολοκληρώσω μια ενδιαφέρουσα εργασία για την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με συνεχές ρεύμα. Ηταν η πρώτη διπλωματική για εκείνον στην θέση του επιβλέποντος. Δέκα χρόνια μετά, τον συνάντησα ξανά σε μια συνέντευξη για την πρόσληψή μου στην ΔΕΗ και, ίσως, το γεγονός ότι σήμερα βρίσκομαι στην Επιχείρηση Ηλεκτρισμού να οφείλεται σε εκείνον. Όταν αργότερα αποφάσισα να ξεκινήσω μεταπτυχιακές σπουδές, ήταν ο πρώτος που επισκέφτηκα και θυμάμαι ακόμη τα λόγια του «είσαι σίγουρος, Μανώλη, ότι επιστρέφοντας από την δουλειά στο σπίτι, θέλεις να αφιερώνεις τον χρόνο σου στη μελέτη αντί να παίζεις και να χαίρεσαι με τα παιδιά σου;».

Η ερώτηση αυτή συνοψίζει, νομίζω, εύστοχα το τίμημα της προσπάθειας. Άπειρες ώρες μπροστά στον υπολογιστή - ώστε να τρέξουν οι αλγόριθμοι, να γραφούν τα papers, να διερευνηθεί η διεθνής βιβλιογραφία - αφαιρέθηκαν από παιγνίδι με τα παιδιά, υποχρεώσεις προς την οικογένεια, εκδρομές, χαλάρωση κλπ. Όμως, ίσως, ο κάθε άνθρωπος έχει μέσα του ένα προγραμματισμένο "τσιπάκι" το οποίο τον οδηγεί τελικά στις πράξεις του. Η απάντησή μου στον κ. Κονταξή ήταν ότι ακόμη και αν δεν προχωρήσω σε μεταπτυχιακές σπουδές δεν αλλάζει τίποτα, όταν δηλαδή γυρίζω σπίτι θα κάθομαι στο γραφείο μου και θα καταγίνομαι με τα τεχνικά θέματα που συνεχώς ανακύπτουν στη δουλειά μου.

Ο έτερος εκλιπών Καθηγητής Δ. Αγορής ήταν μια διαφορετική προσωπικότητα που από την πρώτη στιγμή αισθανόσουνα οικειότητα μαζί του, ωσάν να τον γνώριζες από παιδί. Με διόρθωνε, κάθε φορά, που τον αποκαλούσα «κύριε Αγορή», επειδή ήθελε να τον φωνάζω «Δημοσθένη». Όμως, ήταν κάτι που μου έβγαινε αυθόρμητα. Υπήρξε ένας άνθρωπος με εξαιρετικές επικοινωνιακές ικανότητες που θα μπορούσε να γίνει ένας άριστος πολιτικός. Εάν σήμερα ήταν μαζί μας, θα ζητούσα να μου συγχωρήσει το ατόπημα της επιλογής θέματος διαφορετικού από εκείνο που είχαμε αρχικά συζητήσει. Ως γνωστόν, η Υπηρεσία μου σε συνεργασία με το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Πανεπιστημίου Πατρών έχει επιτελέσει πρωτοποριακό έργο στο πρόβλημα της ρύπανσης των μονωτήρων και κατά συνέπεια, το θέμα αυτό ήταν πιο ώριμο από οποιοδήποτε άλλο για το Διδακτορικό μου. Αλλά, αείμνηστε Δημοσθένη, πρέπει να σου εξομολογηθώ ότι, στην δική μου ψυχολογία άρμοζε περισσότερο ένα καινούργιο θέμα, ανέγγιχτο από το περιβάλλον μου, ώστε μόνος με τις δικές μου δυνάμεις να δοκιμάσω τις ικανότητές μου. Όμως, το ' Open Air Test Station", ένας από τους λίγους στον κόσμο Σταθμούς Δοκιμής των μονωτήρων σε πραγματικές συνθήκες, που πρόσφατα στήσαμε στην Κρήτη θα μας δώσει αρκετό υλικό για σημαντική ερευνητική δουλειά στο αντικείμενο που εσύ ήθελες, έστω και αν αυτό γίνει χωρίς την δική σου παρουσία και συμβολή.

Είχα την τύχη να βρεθώ σε μια Υπηρεσία της ΔΕΗ με εξαιρετικά ενδιαφέρον τεχνικό αντικείμενο και σημαντικό ρόλο παρά το γεγονός ότι αυτό δεν αντικατοπτρίζονταν, τουλάχιστο μέχρι πρόσφατα, στο οργανόγραμμα της Επιχείρησης. Δυστυχώς, η εγωκεντρική Αθήνα επιφυλάσσει για τον εαυτό της τις υψηλές διευθυντικές θέσεις και τα πλούσια οργανωτικά σχήματα με αμφίβολα καμιά φορά αποτελέσματα ενώ σπρώχνει προς την επαρχία πολύ δουλειά, μεγάλες ευθύνες και χαμηλόβαθμες θέσεις. Υπάρχουν εξαιρετικοί μηχανικοί και τεχνικοί που τερμάτισαν την καριέρα τους στη ΔΕΗ ως απλοί "στρατιώτες" στην επαρχία ενώ για το αντίστροφο προτιμώ να μην μιλήσω. Η ευτυχής για μένα συγκυρία να βρεθώ σε μια Υπηρεσία με δύσκολο και σύνθετο τεχνικό αντικείμενο έγινε ευτυχέστερη λόγω της παρουσίας σε αυτήν ανθρώπων με έντονη προσωπικότητα και βαθιά τεχνική κατάρτιση και αντίληψη.

Η διαμόρφωση και εξέλιξή μου ως μηχανικού επηρεάστηκαν σημαντικά από τους προηγηθέντες μου στην Υπηρεσία προϊσταμένους, τον κ. Γ. Κατσιγαννάκη και τον κ. Ι. Στεφανάκη. Ο πρώτος υπήρξε, κατά την γνώμη μου, ένας από τους πιο οξυδερκείς και εμβριθείς μηχανικούς που πέρασαν από την ΔΕΗ, ο δε δεύτερος είναι ένας χαρισματικός άνθρωπος με τεχνικά και διοικητικά προσόντα που σε μαγνητίζουν από την πρώτη στιγμή. Με τον δεύτερο ειδικά στο πηδάλιο της Υπηρεσίας, τολμώ να πω ότι, έζησα τα καλύτερα μου χρόνια στην ΔΕΗ. Την εποχή εκείνη η Υπηρεσία ήταν ένα διαρκές σχολείο, ένα ερευνητικό εργαστήριο που γέμιζε και τους δυο μας με χαρά και ικανοποίηση. Δεν περιοριζόμασταν μόνο στο να δώσουμε λύση και να ξεπεράσουμε

κάθε τεχνικό πρόβλημα που παρουσιαζόταν αλλά γινόταν αληθινή έρευνα. Κάθε συμβάν στο σύστημα Κρήτης αναλυόταν σε βάθος, θεωρητικά και πρακτικά και επιζητούνταν η βελτίωση, η καινοτομία και η ριζική αντιμετώπιση. Εκείνος είχε παράλληλα και τα διοικητικά καθήκοντα της Υπηρεσίας ενώ εγώ είχα αρκετό χρόνο να ασχολούμαι με τα τεχνικά θέματα. Στις ημέρες εκείνες έπεσε ο σπόρος της σκέψης για μεταπτυχιακές σπουδές. Εγώ που έζησα περισσότερο από οποιοδήποτε άλλον την ποιότητα της δουλειάς του κ. Στεφανάκη και τη θετική ενέργεια που εξέπεμπε στον επαγγελματικό του περίγυρο, αισθάνομαι σήμερα την ανάγκη να του πω ένα δημόσιο ευχαριστώ.

Ο Γ. Κονταξής και η θεά τύχη με έφεραν σε επαφή με τον επιβλέποντα της Διδακτορικής μου Διατριβής, Καθηγητή Ε. Διαλυνά. Κατεβαίναμε τις σκάλες του Πολυτεχνείου με τον πρώτο όταν συναντήσαμε τον δεύτερο και ο κ. Κονταξής του είπε ότι έχω πρόθεση να κάνω μεταπτυχιακές σπουδές. Ο κ. Διαλυνάς με τον οποίο δεν είχα καμία συνεργασία μέχρι τότε - απλώς με γνώριζε - χωρίς δεύτερη σκέψη και χωρίς κανένα ενδοιασμό μου πρότεινε αμέσως να ξεκινήσω μαζί του και η συνεργασία άρχισε. Η ανθρώπινη ευφυΐα πέρα από κάθε άλλο είναι, κατά την γνώμη μου, μια διαίσθηση ώστε με ελάχιστα δεδομένα να παίρνεις μια απόφαση που σε δικαιώνει στην συνέχεια. Το πιο λογικό για τον κ. Διαλυνά θα ήταν να σκεφθεί ότι, ένας άνθρωπος όπως εμένα, με τις υποχρεώσεις του στην ΔΕΗ, που μένει μακριά από την Αθήνα και στην ηλικία που βρίσκεται, είναι πιθανόν να μην καταφέρει να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις μιας Διδακτορικής Διατριβής και κατά συνέπεια θα ήταν χάσιμο χρόνου.

Η εμπιστοσύνη που μου έδειξε ο κ. Διαλυνάς ήταν για μένα η μεγαλύτερη κινητήριος δύναμη, ένα συμβόλαιο που σε καμιά περίπτωση δεν μπορούσα να αθετήσω. Ως γνωστόν, το ελάχιστο όριο επαρκούς ερευνητικής δουλειάς σε μια Διδακτορική Διατριβή στο ΕΜΠ θεωρείται η δημοσίευση μιας τουλάχιστον εργασίας σε ανώτατο, διεθνές, επιστημονικό περιοδικό, κατά προτίμηση σε ΙΕΕΕ Transactions. Στην πρώτη μου συνάντηση με τον κ. Διαλυνά είπα ότι θα κάνουμε τρεις δημοσιεύσεις ΙΕΕΕ. Ασφαλώς, όταν το έλεγα, δεν είχα επίγνωση των λόγων μου, δεν γνώριζα τον όγκο της δουλειάς που αυτό συνεπάγεται, όμως γνώριζα πολύ καλά τον εαυτόν μου. Σήμερα, πέραν των άλλων εργασιών, έχουν ήδη δημοσιευτεί τρεις εργασίες στο ΙΕΕΕ Transactions on Power Systems.

Η συνεργασία δεν είναι πάντα εύκολη υπόθεση, όμως με τον κ. Διαλυνά ήταν μια ευχάριστη διαδικασία, πολύ παραγωγική. Αν και το θέμα που εγώ προσκόμισα για έρευνα δεν ήταν στο επίκεντρο της δικής του εξειδίκευσης, έμεινα έκπληκτος με την ταχύτητα που εισχωρούσε στην ουσία του προβλήματος και τις εύστοχες παρατηρήσεις και υποδείξεις του. Τον ευχαριστώ θερμά για όλα και του οφείλω το γεγονός ότι σήμερα βρίσκομαι στη θέση αυτή. Στον δικό μου κώδικα αξιών θα ήταν ανεπίτρεπτο να μην ανταποκριθώ στην εμπιστοσύνη του. Σήμερα, είμαι σίγουρος ότι, αν υποσχόμουν έξι αντί για τρεις εργασίες ΙΕΕΕ θα τις είχαμε. Βέβαια, η συνεργασία μαζί του ελπίζω ότι θα συνεχιστεί και στο μέλλον.

Το πλεονέκτημα που είχα ως μεταπτυχιακός φοιτητής ήταν ότι γνώριζα από πρώτο χέρι την λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, μια εμπειρία ανεκτίμητη που κάνει ορισμένους που δεν την διαθέτουν να αισθάνονται άβολα. Είχα ήδη φοιτήσει σε ένα άλλο σχολειό, στην Υπηρεσία μου, τον Τομέα Δικτύων Μεταφοράς Κρήτης-Ρόδου. Το μειονέκτημα μου ήταν ότι βρισκόμουν μακριά από το Πολυτεχνείο, τους Καθηγητές μου, τους συμφοιτητές, τις βιβλιοθήκες, δηλαδή τις πηγές από τις οποίες θα μπορούσα να αντλήσω βοήθεια και υποστήριξη. Σε όλες τις συζητήσεις που είχαν προηγηθεί της έναρξης της Διδακτορικής Διατριβής, μου έλεγαν ότι η εργασία θα πρέπει να συνοψίζει και να αξιοποιεί την εμπειρία μου από την συντήρηση ή την λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Πρέπει, κατά ανάγκη, να είναι ολιγότερο θεωρητική και περισσότερο εμπειρική. Συνέβη ακριβώς το αντίθετο.

Όπως σχολίασε κάποιος από τους κριτές ενός άρθρου μας στο ΙΕΕΕ, η εργασία είπε διαθέτει άριστη θεωρητική δομή και διερωτήθηκε αν έχει και εφαρμογή στην πράξη. Γλώσσες προγραμματισμού, τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, εξισώσεις διαφορών, ακολουθιακή μέθοδος Monte-Carlo, Matlab είναι μέρος του θεωρητικού οπλοστασίου που χρησιμοποιήθηκε στην έρευνα. Όλα αυτά, μου ήταν άγνωστα πριν από την έναρξη της Διατριβής και χωρίς κανένα δάσκαλο δίπλα μου, μόνος με το βιβλίο και τον υπολογιστή, επιχείρησα να τα κατακτήσω στο βαθμό που μου ήταν απαραίτητα, βήμα– βήμα, σε ένα ταξίδι περιπλάνησης και εξερεύνησης. Ήταν το πιο όμορφο πράγμα που έζησα στην διαδικασία αυτή, ήταν η δικαίωση και το κέρδος απέναντι στο ακριβό τίμημα που κατέβαλα. Νομίζω ότι άξιζε τον κόπο.

Στο σημείο αυτό οφείλω να ευχαριστήσω και τα άλλα δύο, νέα μέλη της Τριμελούς Επιτροπής, τον Καθηγητή Ν. Χατζηαργυρίου και τον Λέκτορα Σ. Παπαθανασίου, οι οποίοι αντικατάστησαν τους εκλιπόντες Γ. Κονταξή και Δ. Αγορή αντίστοιχα, καθώς επίσης τους υπόλοιπους Καθηγητές του Πολυτεχνείου με τους οποίους ήρθα σε επαφή.

Επίσης, θέλω να μνημονεύσω το υψηλής στάθμης τεχνικό προσωπικό του Τομέα Δικτύων Μεταφοράς Κρήτης-Ρόδου, για τις παραγωγικές συζητήσεις που είχα και εξακολουθώ να έχω μαζί τους και θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου για την συμβολή τους στην γενικότερη τεχνική μου συγκρότηση.

Όμως, θα ήταν ασυγχώρητη παράλειψη και ηθικό ατόπημα να μην αποκαλύψω και ένα κρυφό μου μυστικό. Πρόκειται για τον φίλο μου, τον ερευνητή του ΙΤΕ στα λέιζερ, τον κ. Β. Λαδόπουλο, ένα άνθρωπο με πλατύ θεωρητικό υπόβαθρο, ο οποίος αφιέρωσε κάποιες ώρες από τον πολύτιμο χρόνο του και με την τεράστια πείρα του βοήθησε την προσπάθειά μου.

Τέλος, οι ευχαριστίες μου πάνε στην σύζυγό μου Σουζάνα και στα παιδιά μου Ράνια και Αλέξανδρο οι οποίοι με κατανόηση και υπομονή ανέχθηκαν τις θυσίες που επέβαλε η προσπάθεια αυτή και με στήριξαν στο μακρύ ταξίδι.

Εμμανουήλ Θαλασσινάκης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	. 4
Σχόλια – ευχαριστίες	8
Περιεχόμενα	.12

Κεφάλαιο 1	
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	

Κεφάλαιο 2 ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1	Γενικά	
2.2	Στοχαστικές Διαδικασίες	
2.3	Προσομοίωση Monte-Carlo	23

Κεφάλαιο 3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

Γενικά	
Αυτόματος Έλεγχος Παραγωγής	
Επιπτώσεις Συχνότητας στη Γεννήτρια	
Επιπτώσεις Συχνότητας στο Στρόβιλο	
Προσομοίωση Γεννήτριας	
Προσομοίωση Φορτίου	
Προσομοίωση Στροβίλου	42
Προσομοίωση Ρυθμιστή Στροφών	47
Χαρακτηριστική Φορτίου-Συχνότητας	49
Προσομοίωση Ολόκληρης της Μονάδας	
Παράλληλη Λειτουργία Μονάδων	
Ρυθμίζουσα Ενέργεια ή Χαρακτηριστική Συστήματος	
Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις	56
	Γενικά Αυτόματος Έλεγχος Παραγωγής Επιπτώσεις Συχνότητας στη Γεννήτρια Επιπτώσεις Συχνότητας στο Στρόβιλο Προσομοίωση Γεννήτριας Προσομοίωση Φορτίου Προσομοίωση Στροβίλου Προσομοίωση Ρυθμιστή Στροφών Χαρακτηριστική Φορτίου-Συχνότητας Προσομοίωση Ολόκληρης της Μονάδας Παράλληλη Λειτουργία Μονάδων Ρυθμίζουσα Ενέργεια ή Χαρακτηριστική Συστήματος Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

Κεφάλαιο 4

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ MONTE-CARLO ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΡΥΘΜΙΣΕΩΝ ΤΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΗΣ ΕΦΕΔΡΕΙΑΣ

4.1	Εισαγωγή	58
4.2	Αλγόριθμος Υπολογισμού της Απόκρισης Συχνότητας	59
4.3	Παράμετροι Απόκρισης Συχνότητας	63

Στρατηγική Αποκοπής Φορτίου	64
Προτεινόμενοι Δείκτες	64
Προσομοίωση του Συστήματος κατά Monte-Carlo	66
Ανάλυση ενός Τυπικού Συστήματος	73
Σύγκλιση της Μεθόδου	80
Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις	
	Στρατηγική Αποκοπής Φορτίου Προτεινόμενοι Δείκτες Προσομοίωση του Συστήματος κατά Monte-Carlo Ανάλυση ενός Τυπικού Συστήματος Σύγκλιση της Μεθόδου Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

Κεφάλαιο 5 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

5.1	Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα	
5.2	Αντίστροφο Πρόβλημα	
5.3	Κατάστρωση του Προβλήματος	95
5.4	Αλγόριθμος Υπολογισμού Προτύπων	
5.5	Εφαρμογή Αλγορίθμου στο Τυπικό Σύστημα	103
5.6	Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις	

Κεφάλαιο 6

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΠΙ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΠΟΥ ΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΗΛΕΚΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

6.1 Εισαγωγή	115
6.2 Στρεφόμενη Εφεδρεία και Απόκριση Μονάδων	116
6.3 Αναλυτικό Μοντέλο Συστήματος και Μέθοδος Υπολογισμού της Σχέσης	
των Διαφόρων Παραμέτρων	118
6.4 Ανάλυση Τυπικού Συστήματος	122
6.5 Κατανομή της Στρεφόμενης Εφεδρείας στις Μονάδες	138
6.6 Κόστος Ρυθμιστικής Εφεδρείας	141
6.7 Κύριοι Μηχανισμοί που Επηρεάζουν την Ασφάλεια του Συστήματος σε	
Ευρύτερο Χρονικό Ορίζοντα	144
6.8 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις	149

Κεφάλαιο 7

ΜΈΘΟΛΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΗΣ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΗΣ ΕΦΕΔΡΕΙΑΣ ΤΩΝ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗΜΟΠΟΙΗΣΗ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΡΥΘΜΙΣΤΗ ΣΤΡΟΦΩΝ

7.1 Εισαγωγή	152
7.2 Σύνθετο Κριτήριο Ασφάλειας Συστήματος	154
7.3 Ικανότητα Υπερφόρτισης Μικρής Διάρκειας των Μονάδων και	
Βελτιωμένο Μοντέλο Ρυθμιστή Στροφών	155
7.4 Προσομοίωση της Δυναμικής Απόκρισης Συχνότητας	160
7.5 Μέθοδος Βέλτιστης Κατανομής Φορτίου Λαμβάνοντας Υπόψη την	
Ικανότητα Υπερφόρτισης των Μονάδων	162

7.6 Ανάλυση Τυπικού Συστήματος	165
7.7 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις	175

Κεφάλαιο 8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1 Ανακεφαλαίωση Διατριβής	
8.2 Συμβολή της Διατριβής	
8.3 Επέκταση της Διατριβής	
Βιβλιονηαφία	
Δημοσιεύσεις	

Kepálano 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

εν βυθώ η αλήθεια (η αλήθεια είναι κρυμμένη) Δημόκριτος

Αξιοπιστία λειτουργίας ενός συστήματος είναι η πιθανότητα το σύστημα να εκτελεί την αποστολή του επαρκώς για την σχεδιαζόμενη χρονική περίοδο και τις επικρατούσες λειτουργικές συνθήκες. Όπως φαίνεται από τον ορισμό αυτό, υπάρχουν τέσσερις έννοιες κλειδιά οι οποίες έχουν γραφεί με έντονα γράμματα: η πιθανότητα, η επαρκής λειτουργία, η χρονική περίοδος και οι λειτουργικές συνθήκες. Η πιθανότητα είναι η έννοια που δίδει αριθμητική υπόσταση και ποσοτικοποιεί την αξιοπιστία, εισάγοντας παράλληλα τα μαθηματικά στην ανάλυση και διερεύνησή της. Οι υπόλοιπες τρεις έννοιες πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη κατά την μελέτη αξιοπιστίας κάθε τεχνικού προβλήματος [1, 2].

Εστιάζοντας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας θα λέγαμε ότι η ικανότητα ενός τέτοιου συστήματος να τροφοδοτεί συνεχώς και ικανοποιητικά τους πελάτες χαρακτηρίζει, γενικά, την αξιοπιστία του. Εξ αιτίας του εύρους των εφαρμογών, η αξιοπιστία μπορεί να διαιρεθεί σε δύο επί μέρους έννοιες, την επάρκεια του συστήματος (adequacy) και την ασφάλεια του συστήματος (security). Η επάρκεια σχετίζεται με την ύπαρξη ικανής εφεδρείας τόσο σε επίπεδο παραγωγής όσο και σε δίκτυα ενώ η ασφάλεια σχετίζεται με την ικανότητα του συστήματος να αντεπεξέρχεται στις διάφορες διαταραχές και να διατηρεί την ευστάθειά του [2, 3].

Το πρόβλημα της ασφάλειας δεν είναι απλώς ζήτημα εφεδρειών αλλά και δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος. Τρεις είναι οι πυλώνες πάνω στους οποίους στηρίζεται η ασφάλεια ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και οι οποίοι εξετάζονται σε διαφορετικά χρονικά πλαίσια : ο σωστός σχεδιασμός και η έγκαιρη ανάπτυξη, η ορθολογική εκμετάλλευση και τέλος η κατάλληλη επιλογή των προστασιών του.

Η πρόβλεψη επαρκών και αξιόπιστων εγκαταστάσεων (μονάδες παραγωγής - δίκτυα) μειώνει τον αριθμό των βλαβών και κινδύνων που θα αντιμετωπίσει το σύστημα και προσφέρει εναλλακτικές λύσεις κατά την λειτουργία του. Όμως, η θωράκιση σε επίπεδο εγκαταστάσεων συνεπάγεται σημαντικές επενδύσεις για τις οποίες, η οικονομική σκοπιμότητα είναι ο πρώτος παράγοντας που πρέπει να εξεταστεί. Οι μελέτες στο επίπεδο αυτό έχουν χρονικό ορίζοντα πενταετίας ή και δεκαετίας δεδομένου ότι τα αντίστοιχα έργα έχουν χρόνους υλοποίησης αρκετών ετών [2]. Η ορθολογική εκμετάλλευση του συστήματος σημαίνει την «on line» λειτουργία του με γνώμονα την μείωση του λειτουργικού κόστους αλλά και την διατήρηση ορισμένου επιπέδου ασφάλειας. Το πρόβλημα που ζητά απάντηση αφορά στην επιλογή των κατάλληλων μονάδων προς ένταξη, την κατανομή του φορτίου σε αυτές και το ύψος της στρεφόμενης εφεδρείας. Η λειτουργία του συστήματος είναι συνεχής και άρα, η απάντηση στο πρόβλημα, το οποίο συνεχώς τίθεται με διαφορετικά δεδομένα, πρέπει να είναι άμεση.

Η ανάλυση της συμπεριφοράς ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στη μη μόνιμη κατάσταση και ο βέλτιστος σχεδιασμός των προστασιών του αποτελούν βασικό μέλημα κάθε Εταιρείας ηλεκτρισμού. Μια ιδιαίτερη προστασία, που παίζει πρωταρχικό ρόλο στην ασφάλεια, στην αξιοπιστία και στην ποιότητα ηλεκτρικής ενέργειας, είναι η προστασία αποκοπής φορτίου η οποία υλοποιείται μέσω των ηλεκτρονόμων (H/N) υποσυχνότητας [4-8]. Η προστασία αυτή, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες προστασίες, αποτελεί προστασία ολοκλήρου του συστήματος και όχι κάποιου μεμονωμένου στοιχείου [9].

Μετά την αλματώδη εξέλιξη και καθιέρωση της ψηφιακής τεχνολογίας, οι παλαιοί ηλεκτρομηχανικοί Η/Ν των διατάξεων προστασίας παραχώρησαν την θέση τους στους σύγχρονους ψηφιακούς, οι οποίοι είναι πιο αξιόπιστοι, δεν χρειάζονται συντήρηση (maintenance free), έχουν περισσότερες δυνατότητες επεξεργασίας των δεδομένων, κρατούν αρχείο καταγραφών, στοιχίζουν φθηνότερα και απαιτούν πολύ μικρότερο χώρο εγκατάστασης. Όπως είναι φυσικό, ο εκσυγχρονισμός αυτός βρήκε εφαρμογή και στο πεδίο των Η/Ν υποσυχνότητας με κύρια βελτίωση το γεγονός ότι, οι υπόψη ψηφιακοί Η/Ν παρέχουν την δυνατότητα καταμέτρησης όχι μόνο της στιγμιαίας τιμής της συχνότητας αλλά και του ρυθμού μεταβολής της. Η βελτίωση αυτή συνετέλεσε στη καλύτερη και αποτελεσματικότερη υλοποίηση της προστασίας υποσυχνότητας.

Όμως, το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας πάνω στο πεδίο των Η/Ν υποσυχνότητας, κατά τα τελευταία χρόνια, αφορά κυρίως στην βελτίωση του υλικού (hardware). Στόχος είναι η επίτευξη ταχύτατης και ακριβούς ανίχνευσης των κρίσιμων συνθηκών ώστε η ενεργοποίηση των Η/Ν να πραγματοποιείται σε ελάχιστο χρόνο, ακόμη και σε επίπεδο ημιπεριόδου (10 ms). Γίνεται προσπάθεια αντιμετώπισης των αρμονικών και υψίσυχνων μεταβατικών φαινομένων που ακολουθούν την διαταραχή ώστε να αποκλείεται η πιθανότητα λάθους μέτρησης της συχνότητας, η οποία γίνεται δια εντοπισμού των σημείων μηδενισμού της τάσης (zero crossing).

Απεναντίας, στο επίπεδο σχεδιασμού και ρυθμίσεων της προστασίας αυτής δεν υπάρχει αντίστοιχη πρόοδος. Δεν έχει αναπτυχθεί κοινή μέθοδος που να εφαρμόζεται σε όλα τα συστήματα σχετικά με τα επίπεδα υποσυχνότητας που θα πραγματοποιείται η περικοπή φορτίου και το ύψος των διακοπών. Κάθε Διαχειριστής συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ακολουθεί την δική του στρατηγική, την οποία προσαρμόζει και αναπροσαρμόζει με εμπειρικό τρόπο πάνω στο ίδιο το σύστημα που συνεχώς μεταβάλλεται. Τι συνεπάγεται όμως η εφαρμογή της μιας ή της άλλης στρατηγικής για την ασφάλεια και την αξιοπιστία του συστήματος; Πόσο πιο ασφαλές γίνεται το σύστημα όταν οι ρυθμίσεις γίνονται πιο ευαίσθητες και οι διακοπές πελατών περισσότερες; Που βρίσκεται η χρυσή τομή; Τα ερωτήματα αυτά μάλλον εμπειρικά και απολογιστικά επιδέχονται απάντηση.

Επίσης, στο ζήτημα της τηρούμενης στρεφόμενης εφεδρείας, δεν υπάρχει κοινή πολιτική που να εφαρμόζεται από όλους τους Διαχειριστές συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Κάποιοι Διαχειριστές διατηρούν εφεδρεία ίση με την παραγωγή της μονάδας με την μεγαλύτερη φόρτιση, κάποιοι άλλοι ίση με το 10% της ζήτησης φορτίου ενώ άλλοι διατηρούν την ελάχιστη δυνατή εφεδρεία για λόγους οικονομίας. Όμως, τι σημαίνει ποσοτικά, εκπεφρασμένο με κατάλληλους δείκτες ασφάλειας και αξιοπιστίας, κάθε μία από τις εναλλακτικές πολιτικές; Στα εύλογα αυτά ερωτήματα που απασχολούν τους λειτουργούς των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας προσπαθεί να ρίξει φως και να δώσει κάποιες απαντήσεις η παρούσα εργασία.

Τα ερωτήματα και τα προβλήματα που τίθενται σχετικά με την ασφάλεια των συστημάτων, την αξιοπιστία τους και την ποιότητα της παρεχόμενης ενέργειας αυξάνονται συνεχώς σε πλήθος και πολυπλοκότητα και απασχολούν ολοένα και περισσότερο τους μηχανικούς των συστημάτων. Η επίλυση των σύνθετων αυτών προβλημάτων απαιτεί, πολλές φορές, τον συγκερασμό γνώσεων και μεθόδων από διαφορετικά γνωστικά πεδία. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έχουν επιστρατευτεί μέθοδοι και στοιχεία από την θεωρία των πιθανοτήτων, την αξιοπιστία των σύστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, την λειτουργία των Κέντρων Ελέγχου Ενέργειας, τον αυτόματο έλεγχο παραγωγής, την ποιότητα ηλεκτρικής ισχύος, την αριθμητική μέθοδο Monte-Carlo, τα νευρωνικά δίκτυα, τον προγραμματισμό κλπ.

Αντικείμενο της παρούσης εργασίας είναι η διερεύνηση της ασφάλειας ενός αυτόνομου ηλεκτρικού συστήματος και η ανάπτυξη νέων μεθόδων για την βελτίωση της ασφάλειας τόσο σε επίπεδο προστασιών όσο και σε επίπεδο λειτουργίας. Στα τρία πρώτα κεφάλαια γίνεται ανασκόπηση του υπάρχοντος γνωστικού αντικειμένου και παρουσιάζεται το υπόβαθρο πάνω στο οποίο στηρίζεται η διεξαχθείσα έρευνα. Τα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζουν νέες σκέψεις, ιδέες και μεθόδους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο καταγράφονται ορισμένες γενικές έννοιες που αφορούν στις πιθανοτικές μεθόδους, στις στοχαστικές διαδικασίες και στην αριθμητική μέθοδο Monte-Carlo. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο μηχανισμός για το έλεγχο της συχνότητας μέσω του ρυθμιστή φορτίου-συχνότητας των μονάδων παραγωγής. Παρουσιάζεται το μοντέλο απόκρισης κάθε δομικού στοιχείου ενός αυτόνομου ηλεκτρικού συστήματος σε γεγονότα απώλειας παραγωγής. Με βάση τα επί μέρους μοντέλα οικοδομείται τελικά το συνολικό μοντέλο προσομοίωσης της συμπεριφοράς ολόκληρου του συστήματος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναπτύσσεται νέα αριθμητική μέθοδος για την επιλογή της προστασίας αποκοπής φορτίου με κατάλληλη ρύθμιση των Η/Ν υποσυχνότητας ενός αυτόνομου ηλεκτρικού συστήματος. Με χρήση της ακολουθιακής μεθόδου Monte-Carlo γίνεται πιθανοτική ανάλυση των διαταραχών του ισοζυγίου παραγωγής-ζήτησης, οι οποίες προκύπτουν από την απώλεια μονάδων παραγωγής λόγω των αναπόφευκτων βλαβών τους. Μέσα από την ανάλυση αυτή παράγονται χρήσιμοι πιθανοτικοί δείκτες και ιστογράμματα που χρησιμεύουν στην επιλογή της κατάλληλης στρατηγικής σε σχέση με την προστασία αποκοπής φορτίου και τα επίπεδα της τηρούμενης στρεφόμενης εφεδρείας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αντιμετωπίζεται το ίδιο πρόβλημα κατ' αντίστροφο τρόπο ο οποίος είναι πλέον πρόσφορος για τα ερωτήματα της πράξης. Με δεδομένους,

δηλαδή, τους δείκτες που αφορούν στην ασφάλεια του συστήματος ή στην ποιότητα ηλεκτρικής ενέργειας, ποια είναι η κατάλληλη στρατηγική προστασίας αποκοπής φορτίου η οποία ικανοποιεί τους επιθυμητούς δείκτες αυτούς;.

Στο έκτο κεφάλαιο παράγεται το αναλυτικό μοντέλο προσομοίωσης του συστήματος και διερευνάται η σχέση των διαφόρων παραμέτρων του. Εξετάζεται, ιδιαίτερα, ο ρόλος των περιοριστών ισχύος των ρυθμιστών στροφών των μονάδων και η επίδρασή τους στην ικανότητα του συστήματος να αξιοποιήσει την διαθέσιμη στρεφόμενη εφεδρεία, κατά το κρίσιμο αρχικό στάδιο, αμέσως μετά την διαταραχή. Διερευνώνται οι επιπτώσεις κατανομής της στρεφόμενης εφεδρείας επί της ασφάλειας, όπως αυτή εκφράζεται από ένα κριτήριο συχνότητας. Αποδεικνύεται ότι, η στρεφόμενη εφεδρεία συμβάλει στην ασφάλεια υπό προϋποθέσεις, ενώ παράλληλα βελτιώνει την αξιοπιστία και ποιότητα ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο έβδομο κεφάλαιο αναπτύσσεται αλγόριθμος βέλτιστης κατανομής της στρεφόμενης εφεδρείας στις λειτουργούσες μονάδες με σκοπό την ικανοποίηση ορισμένου κριτηρίου ασφάλειας κατά τον πλέον οικονομικό τρόπο. Προτείνεται ένα βελτιωμένο μοντέλο ρυθμιστή στροφών που επιτρέπει την υπερφόρτιση μικρής διάρκειας των μονάδων παραγωγής, σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα [10-13]. Εισάγεται ένας νέος τύπος εφεδρείας, η εφεδρεία υπερφόρτισης. Τέλος, γίνεται στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων μέσω της οποίας αποκαλύπτεται ο βαθμός συσχέτισης των διαφόρων τύπων εφεδρείας με την ασφάλεια του αυτόνομου συστήματος.

Στο όγδοο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται ανακεφαλαίωση της διδακτορικής διατριβής και καταγράφονται τα συμπεράσματα της διεξαχθείσας έρευνας. Επισημαίνονται τα βασικά σημεία στα οποία πρωτοτυπεί η εργασία και παρουσιάζεται η συμβολή της στο πεδίο αξιοπιστίας και ασφάλειας των απομονωμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, παρατίθενται κάποιες σκέψεις για πιθανή επέκταση της έρευνας με βάση τα δεδομένα της παρούσας διατριβής.

ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

όψις αδήλων τα φαινόμενα (αυτά που υποπίπτουν στην αντίληψή μας δεν είναι παρά φαινομενική όψη της πραγματικότητας) Αναζαγόρας

2.1 Γενικά

Η τεχνολογική πρόοδος των τελευταίων ετών και οι σύγχρονες κοινωνικές συνθήκες επιβάλουν υψηλή στάθμη αξιόπιστης τροφοδότησης με ηλεκτρική ενέργεια. Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έχουν ως σκοπό την επίτευξη του στόχου αυτού και αποτελούν ίσως τα πιο σύνθετα, μεγάλης κλίμακας, τεχνολογικά δημιουργήματα που έχει κατασκευάσει ποτέ ο άνθρωπος. Τα συστήματα αυτά σχεδιάζονται και υλοποιούνται βάσει προδιαγραφών με στόχο να λειτουργήσουν ικανοποιητικά για αρκετά χρόνια μετά την αρχική τους εγκατάσταση.

Εν τούτοις, οι συνθήκες κάτω από τις οποίες θα κληθούν να λειτουργήσουν στο μέλλον δεν είναι ποτέ δυνατόν να προβλεφθούν με ακρίβεια και κατά συνέπεια, τα κριτήρια σχεδιασμού και λειτουργίας τους υπόκεινται σε κάποιο βαθμό αβεβαιότητας [14-17]. Για παράδειγμα, ο σχεδιασμός της προστασίας ενός συστήματος Μεταφοράς απαιτεί γνώση του μεγέθους των σφαλμάτων, τα οποία είναι συνάρτηση του τύπου (μονοφασικό, διφασικό κλπ), της θέση τους (ηλεκτρική απόσταση από τις πηγές) αλλά και του ύψους της παραγωγής την στιγμή του σφάλματος, παράγοντες οι οποίοι ακολουθούν τυχαίες κατανομές. Εξ άλλου, η επιλογή της μόνωσης εξαρτάται από το ύψος των υπερτάσεων (ατμοσφαιρικών ή χειρισμών) που θα κληθεί να αντιμετωπίσει η μόνωση αλλά και από τη σοβαρότητα της ρύπανσης στο περιβάλλον λειτουργίας, ακολουθούν επίσης τυχαίες κατανομές. παράγοντες που Τα παραπάνω χαρακτηριστικά παραδείγματα επιβεβαιώνουν ότι είναι αδύνατο να γνωρίζει κανείς εκ των προτέρων τα ακριβή δεδομένα των συνθηκών κάτω από τις οποίες πρόκειται να λειτουργήσει ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Για την αντιμετώπιση των αβεβαιοτήτων αυτών τόσο στο στάδιο του σχεδιασμού όσο και στο στάδιο της λειτουργίας, οι μηχανικοί των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι υποχρεωμένοι να απλοποιούν τα μοντέλα τους λαμβάνοντας υπόψη τους παραδοχές, οι οποίες αντιστοιχούν στο χειρότερο πιθανό ενδεχόμενο. Παραδείγματα των παραδοχών αυτών αποτελούν η πρόβλεψη ορισμένης στρεφόμενης εφεδρείας για την αντιμετώπιση απώλειας παραγωγής, η πρόβλεψη εφεδρειών στο σύστημα Μεταφοράς για εξασφάλιση εναλλακτικών δρόμων ροής του φορτίου, οι συντελεστές ασφάλειας της μηχανικής αντοχής των γραμμών Μεταφοράς για αντιμετώπιση ακραίων συνθηκών πάγου και ανεμοπίεσης, οι συντελεστές ασφάλειας της μόνωσης για αντοχή σε υπερτάσεις και ατμοσφαιρική ρύπανση, η επικουρική προστασία για αντιμετώπιση καταστάσεων μη σωστής λειτουργίας της πρωτεύουσας προστασίας κλπ.

Όπως είναι φυσικό, η προσέγγιση αυτή της πραγματικότητας με αιτιοκρατικά κριτήρια μπορεί να οδηγήσει είτε σε υποεκτίμηση πιθανών συνθηκών λειτουργίας με αποτέλεσμα την πλημμελή λειτουργία των εγκαταστάσεων και μείωση της αξιοπιστίας στο επίπεδο του τελικού χρήστη είτε σε υπερεκτίμηση με αποτέλεσμα σημαντική επιβάρυνση του κόστους κατασκευής και λειτουργίας. Το νέο περιβάλλον απελευθερωμένης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας επιβάλλει ποσοτικοποίηση των αβεβαιοτήτων αυτών και βέλτιστο σχεδιασμό. Ο σχεδιασμός αυτός οφείλει να εξισορροπεί το κόστος κατασκευής και λειτουργίας αφενός με τα αποδεκτά επίπεδα αξιοπιστίας και ποιότητας ηλεκτρικής ενέργειας αφετέρου. Η ποσοτικοποίηση αυτή μπορεί να γίνει μόνο στα πλαίσια πιθανοτικής θεώρησης με χρήση της θεωρίας των πιθανοτήτων, της στατιστικής ανάλυσης και προηγμένων μαθηματικών μοντέλων [18-22]. Η χρησιμοποίηση πιθανοτικών τεχνικών κερδίζει ολοένα έδαφος τα τελευταία χρόνια και ο κλασσικός αιτιοκρατικός τρόπος επίλυσης των προβλημάτων παραχωρεί την θέση του στις πιθανοτικές μεθόδους.

2.2 Στοχαστικές Διαδικασίες

Ως γνωστόν, τυχαία μεταβλητή Χ είναι ένα μέγεθος το οποίο μπορεί να λάβει οποιαδήποτε τιμή από ένα προκαθορισμένο σύνολο τιμών που ονομάζεται πεδίο ορισμού της. Εάν η μεταβλητή μπορεί να λάβει μια μόνο τιμή, τότε ονομάζεται σταθερά. Μια μεταβλητή που μπορεί να λάβει οποιαδήποτε τιμή μεταξύ δύο δεδομένων αριθμητικών τιμών ονομάζεται συνεχής ενώ στην αντίθετη περίπτωση ονομάζεται διακριτή [23-25]. Για παράδειγμα το ύψος του ανθρώπου είναι συνεχής μεταβλητή ενώ ο αριθμός των μελών μιας οικογένειας είναι διακριτή μεταβλητή.

Ας θεωρηθεί μια οικογένεια μεταβλητών X_t , όπου ο δείκτης t είναι μέλος ενός διατεταγμένου συνόλου $\{t_1, t_2, ..., t_n\}$ και $t_1 < t_2 < ... < t_n$. Στα προβλήματα που συναντώνται στη πράξη, ο δείκτης t είναι συνήθως παράμετρος του χρόνου ή του χώρου π.χ. μια σειρά από ημέρες ή μια σειρά από διαδοχικούς πυλώνες μιας γραμμής Μεταφοράς. Η τιμή της μεταβλητής X_n στο σημείο ή τη χρονική στιγμή t_n ονομάζεται κατάσταση του συστήματος την στιγμή αυτή. Μια τέτοια οικογένεια μεταβλητών μπορεί να περιγράψει την εξέλιξη της συμπεριφοράς ενός συστήματος στο χρόνο ή στο χώρο και ονομάζεται διαδικασία ή ανέλιξη $\{X_t, t= t_1, t_2, ..., t_n\}$. Η ανέλιξη αυτή είναι στοχαστική εάν υπάρχει ένας πιθανοτικός νόμος που αποδίδει μια

πιθανότητα σε κάθε αλληλουχία καταστάσεων, όπως περιγράφεται από τη σχέση (2.1) [26, 27].

$$P(X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n) = p_{t_1, t_2, \dots, t_n}(x_1, x_2, \dots, x_n)$$
(2.1)

Η μεταβολή της λειτουργικής κατάστασης μιας μονάδας παραγωγής στη διάρκεια του χρόνου αποτελεί διακριτή στοχαστική ανέλιξη. Η μονάδα παραγωγής, την τυχούσα χρονική στιγμή t_n , μπορεί είτε να είναι σε καλή κατάσταση (X_{tn} =1), είτε σε κατάσταση βλάβης (X_{tn} =0) και η παραμονή στις καταστάσεις αυτές μπορεί να περιγραφεί από γνωστές πιθανότητες. Παράδειγμα συνεχούς στοχαστικής ανέλιξης αποτελεί η ημερήσια εφεδρεία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή το σύνολο της διαθέσιμης παραγωγής μείον την ημερήσια αιχμή.

Η πιθανότητα μετάβασης ενός συστήματος από μια κατάσταση σε μια άλλη, στη γενικότητα, εξαρτάται από τις προηγούμενες καταστάσεις που το σύστημα βρέθηκε. Ας θεωρήσουμε, για παράδειγμα, τη ρύπανση των μονωτήρων μιας γραμμής Μεταφοράς σε παραθαλάσσια περιοχή. Ο βαθμός ρύπανσης μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε τέσσερα επίπεδα, την ελαφριά, τη μέση, τη σοβαρή και τη πολύ σοβαρή που εγκυμονεί κίνδυνο σφάλματος. Κατά την διάρκεια μιας ανεμοθύελλας οι μονωτήρες ρυπαίνονται από την μεταφερόμενη θαλάσσια αλμύρα, όμως η συνολική ρύπανση και η πιθανότητα να υπάρξει υπερπήδηση των μονωτήρων εξαρτάται από το σύνολο των προηγούμενων γεγονότων (ανεμοθύελλες - καθαρισμοί) που έλαβαν χώρα.

Ας ληφθεί τώρα ένα σύστημα το οποίο μπορεί να λάβει m δυνατές καταστάσεις (x₁, x₂,,x_m). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η στοχαστική ανέλιξη είναι μια διαδικασία, κατά την οποία η πιθανότητα μετάβασης από την κατάσταση n-1 στην κατάσταση n γενικώς εξαρτάται από τις προηγούμενες καταστάσεις του συστήματος. Άρα, η πιθανότητα μετάβασης σε νέα κατάσταση είναι μια δεσμευμένη πιθανότητα, η οποία περιγράφεται από την σχέση (2.2), όπου $X_1=x_1$, $X_2=x_2$,...., $X_{n-1}=x_{n-1}$ είναι όλες οι προηγούμενες καταστάσεις και X_0 οι αρχικές συνθήκες.

$$P(X_n = x_n \mid X_0 = x_0, X_1 = x_1, \dots, X_{n-1} = x_{n-1})$$
(2.2)

Είναι όμως πιθανόν, η κατάσταση η στην οποία θα οδηγηθεί το σύστημα να μην εξαρτάται από ολόκληρη την προϊστορία του αλλά μόνο από μέρος αυτής ή απλώς από την προηγούμενη κατάσταση n-1. Η τελευταία περίπτωση, η οποία ονομάζεται **ανέλιξη Markov**, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και ευρίσκει εφαρμογή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας [28]. Η ανέλιξη Markov περιγράφεται μαθηματικά από την σχέση (2.3). Τα αντίστοιχα συστήματα θεωρούνται ως συστήματα χωρίς μνήμη και ολόκληρο το παρελθόν φαίνεται να είναι αποτυπωμένο στην τελευταία κατάσταση.

$$P(X_n = x_n \mid X_0 = x_0, X_1 = x_1, \dots, X_{n-1} = x_{n-1}) = P(X_n = x_n \mid X_{n-1} = x_{n-1})$$
(2.3)

Εάν ο δείκτης t (χρόνος ή χώρος) λαμβάνει διακριτές τιμές από ένα αριθμήσιμο σύνολο, η διαδικασία χαρακτηρίζεται ως αλυσίδα Markov σε αντιδιαστολή με την γενική περίπτωση όπου ο χρόνος είναι συνεχής και η διαδικασία ονομάζεται ανέλιξη Markov.

Σε μια αλυσίδα Markov, **η πιθανότητα μετάβασης** από την κατάσταση i την χρονική στιγμή t_{m} , στην κατάσταση j την χρονική στιγμή t_{n} , συμβολίζεται με $p_{i,j}(m,n)$ ή απλώς p_{ij} και εκφράζεται από την σχέση (2.4).

$$p_{ij} = p_{i,j}(m,n) = P(X_n = j \mid X_m = i), \quad n > m$$
 (2.4)

Δεδομένου ότι οι p_{ij} αποτελούν πιθανότητες είναι φανερό ότι ισχύουν οι σχέσεις (2.5 - 2.6).

$$p_{ij} \ge 0 \quad \forall i, j \tag{2.5}$$

$$\sum_{i} p_{ij} = 1 \quad \forall i \tag{2.6}$$

Εάν οι πιθανότητες $p_{i,j}(m,n)$ εξαρτώνται μόνο από την χρονική απόσταση $t_n \cdot t_m$, τότε η ανέλιξη Markov καλείται **στάσιμη ή ομογενής** και περιγράφεται από την εξ. (2.7). Επομένως, στην στάσιμη ανέλιξη η συμπεριφορά του συστήματος είναι ανεξάρτητη του χρόνου, ήτοι η πιθανότητα μετάβασης από μια κατάσταση i σε μια άλλη j είναι ίδια στο παρελθόν και στο μέλλον, δηλαδή κάθε φορά που το σύστημα θα βρεθεί στην ίδια κατάσταση i.

$$p_{i,j}(k) = P(X_k = j \mid X_0 = i) = P(X_{k+s} = j \mid X_s = i), \quad s \ge 0$$
(2.7)

Εάν μια αλυσίδα επανέρχεται στην κατάσταση i άπειρες φορές με πιθανότητα ίση με τη μονάδα, τότε η κατάσταση i λέγεται επαναληπτική. Αντιθέτως, εάν μια αλυσίδα επανέρχεται στην κατάσταση i άπειρες φορές με πιθανότητα ίση με μηδέν, τότε η κατάσταση i λέγεται παροδική. Μια αλυσίδα Markov λέγεται επαναληπτική εάν όλες οι καταστάσεις της είναι επαναληπτικές και καμία παροδική, δηλαδή το σύστημα επανέρχεται σε όλες τις καταστάσεις του άπειρες φορές.

Μια κατάσταση i είναι προσιτή από μια κατάσταση j ή άλλως οι δύο αυτές καταστάσεις επικοινωνούν μεταξύ τους εάν η πιθανότητα μετάβασης από την i στην j είναι μη μηδενική ($p_{ij} > 0$). Όλες οι καταστάσεις που επικοινωνούν μεταξύ τους συγκροτούν μια κλάση.

Με βάση των αριθμό των κλάσεων, οι επαναληπτικές αλυσίδες Markov κατατάσσονται σε εκείνες που έχουν μια μόνο κλάση και ονομάζονται εργοδικές και στις υπόλοιπες, τις μη εργοδικές. Κατά συνέπεια, στις εργοδικές αλυσίδες κάθε κατάσταση του συστήματος έχει πρόσβαση από όλες τις άλλες καταστάσεις είτε άμεσα είτε έμμεσα (μέσω ενδιαμέσων καταστάσεων).

Στα εργοδικά συστήματα η μεταβατική συμπεριφορά εξαρτάται σημαντικά από τις αρχικές συνθήκες ενώ οι οριακές τιμές των πιθανοτήτων των καταστάσεων είναι ανεξάρτητες των αρχικών συνθηκών.

Η επίλυση των εργοδικών ανελίξεων Markov διευκολύνεται με τα χωροταξικά διαγράμματα καταστάσεων. Τα διαγράμματα αυτά απεικονίζουν όλες τις δυνατές καταστάσεις του συστήματος, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους ανά ζεύγη με προσανατολισμένες ευθείες συνοδευόμενες από τις αντίστοιχες πιθανότητες

μετάβασης. Από τα διαγράμματα αυτά παράγεται εύκολα ο στοχαστικός πίνακας πιθανοτικών μεταβάσεων. Ας σημειωθεί ότι, ένας πίνακας ονομάζεται στοχαστικός εάν κάθε σειρά του αποτελεί ένα διάνυσμα πιθανότητας, δηλαδή ένα διάνυσμα που το άθροισμα των στοιχείων του ισούται με τη μονάδα. Η μόνιμη συμπεριφορά (οριακές πιθανότητες των καταστάσεων) υπολογίζονται με αντιστροφή του πίνακα μεταβάσεων ενώ η μεταβατική συμπεριφορά (πιθανότητες των καταστάσεων συναρτήσει του χρόνου) υπολογίζονται με επίλυση του αντίστοιχου συστήματος διαφορικών εξισώσεων.

Τα ηλεκτρικά συστήματα είναι διακριτά στο χώρο και συνεχή στο χρόνο, δηλαδή μπορεί να βρίσκονται σε μια από πολλές διακριτές λειτουργικές καταστάσεις μέχρι να συμβεί μια μετάβαση λόγω βλάβης σε μια νέα κατάσταση. Επομένως, η εξέλιξη των συστημάτων αυτών και τα συναφή προβλήματα μπορούν να χαρακτηριστούν ως εργοδικές ανελίξεις Markov, εφόσον οι βλάβες και οι επισκευές ακολουθούν εκθετικές κατανομές.

Οι τεχνικές Markov είναι ακριβείς αλλά η εφαρμογή τους σε μεγάλα συστήματα καταλήγει σε εξαιρετικά δύσκολους και χρονοβόρους υπολογισμούς. Όπως ήδη αναφέρθηκε, σε ένα σύστημα Ν καταστάσεων, ο πίνακας πιθανοτικών μεταβάσεων, ο οποίος είναι μεγέθους NxN, πρέπει να αντιστραφεί προκειμένου να υπολογιστούν οι οριακές πιθανότητες. Θεωρώντας ότι το σύστημα απαρτίζεται από n στοιχεία τα οποία έχουν δύο μόνο καταστάσεις (άνω και κάτω), το σύστημα διαθέτει συνολικά 2ⁿ διαφορετικές καταστάσεις. Άρα, ένα σύστημα 10 μόνο στοιχείων καταλήγει να έχει 1024 διαφορετικές καταστάσεις και επομένως για την επίλυσή του απαιτείται η αντιστροφή ενός τεράστιου πίνακα διαστάσεων 1024x1024.

Για τον λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί εναλλακτικές, αναλυτικές, τεχνικές όπως είναι η τεχνική μείωσης των δικτύων, η μέθοδος των ελαχίστων τομών, η μέθοδος του συνόλου των ελαχίστων δεσμών, τα δένδρα ενδεχομένων, τα δένδρα βλαβών, κλπ.

2.3 Προσομοίωση Monte-Carlo

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα προβλήματα πιθανοτικής ανάλυσης των συστημάτων ηλεκτρικής ισχύος, πολλές φορές, καταλήγουν σε πολύπλοκα μαθηματικά μοντέλα. Η επίλυση των μοντέλων αυτών είναι εξαιρετικά δύσκολη και συχνά είναι ανάγκη να γίνουν σοβαρές απλοποιήσεις που μειώνουν τελικά την ακρίβεια των λύσεων. Με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών μια άλλη μεθοδολογία, η αριθμητική προσομοίωση Monte-Carlo, έχει αρχίζει να κερδίζει έδαφος έναντι των αναλυτικών λύσεων [14, 29].

Η μέθοδος Monte-Carlo είναι μια γενική αριθμητική μέθοδος, η οποία έχει εφαρμογή σε πλήθος περιπτώσεων. Εφαρμόζεται όχι μόνο στα προβλήματα που τίθενται από στοχαστικές διαδικασίες, αλλά και σε αιτιοκρατικά προβλήματα, όπως είναι ο υπολογισμός ολοκληρωμάτων ή επιφανειών ακανόνιστων σχημάτων.

Η μέθοδος στηρίζεται στην παραγωγή τυχαίων αριθμών μέσω των οποίων προσομοιώνεται η λειτουργία ενός συστήματος, δημιουργώντας μέγα πλήθος πιθανών καταστάσεων του συστήματος και αντίστοιχων λύσεων. Για παράδειγμα, κατά την πιθανοτική επίλυση του προβλήματος ροών φορτίου, σε κάθε ζυγό του συστήματος λαμβάνεται μια τιμή της παραγωγής και του φορτίου, οι οποίες εξάγονται από τις αντίστοιχες τυχαίες κατανομές των μεγεθών αυτών. Γίνεται επίλυση του προβλήματος σύμφωνα με τον κλασσικό τρόπο και υπολογίζονται οι τάσεις των ζυγών και οι ροές ισχύος. Στη συνέχεια επαναλαμβάνεται η διαδικασία πάρα πολλές φορές και οι πληροφορίες συλλέγονται και αξιοποιούνται ως εάν γινόταν δειγματοληψία σε ένα πλήθος από πραγματικές καταστάσεις.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, ο βαθμός δυσκολίας της προσομοίωσης Monte-Carlo εξαρτάται πολύ λίγο από το μέγεθος του προς επίλυση συστήματος σε αντίθεση με τις αναλυτικές μεθόδους, όπου ο όγκος των υπολογισμών είναι σε ευθεία αναλογία με το μέγεθος. Για το λόγο αυτό στις αναλυτικές μεθόδους έχουν αναπτυχθεί τεχνικές μείωσης του αριθμού των καταστάσεων των μεγάλων συστημάτων με εφαρμογή κριτηρίων που οδηγούν σε διαβάθμιση των καταστάσεων σύμφωνα με την σοβαρότητα τους και σε απαλοιφή εκείνων που έχουν μικρή βαρύτητα. Παράλληλα, στη προσομοίωση Monte-Carlo έχουν αναπτυχθεί τεχνικές μείωσης της διασποράς που στοχεύουν στη μείωση της αβεβαιότητας η οποία σχετίζεται με το πεπερασμένο μέγεθος των δειγμάτων και συνεπώς επιτρέπουν τον ταχύτερο τερματισμό της προσομοίωσης διατηρώντας όμως την επιθυμητή ακρίβεια.

Βασικό συστατικό της μεθόδου Monte-Carlo είναι η παραγωγή τυχαίων αριθμών από γνωστές κατανομές που ακολουθούν οι μεταβλητές του συστήματος [30]. Η απλούστερη κατανομή είναι η κατανομή τυχαίων αριθμών, ομοιόμορφα κατανεμημένων στο διάστημα (0, 1). Οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές διαθέτουν συναρτήσεις-γεννήτριες που παράγουν τυχαίους αριθμούς. Όλες οι μέθοδοι παραγωγής ομοιόμορφα κατανεμημένων τυχαίων αριθμών στηρίζονται σε αναδρομικές σχέσεις υπολογισμού υπολοίπων (modulo m) που προκύπτουν από ένα γραμμικό μετασχηματισμό, όπως αυτόν της εξίσωσης (2.8), όπου α και m θετικοί ακέραιοι.

$$x_n = a \cdot x_{n-1} \mod ulo \quad m \tag{2.8}$$

Η εξίσωση (2.8) σημαίνει ότι, ο αριθμός x_n προκύπτει από τον προηγούμενο του x_{n-1} με τον ακόλουθο τρόπο. Αρχικά, το γινόμενο α x_{n-1} διαιρείται δια του m και το υπόλοιπο της διαίρεσης αυτής, το οποίο είναι κάποιος από τους ακέραιους 0, 1, 2,...,m-1 αποδίδεται στον αριθμό x_n . Στη συνέχεια λαμβάνεται το πηλίκο x_n/m , το οποίο αποτελεί τυχαίο αριθμό ομοιόμορφα κατανεμημένο στο διάστημα (0, 1). Κατά την έναρξη της διαδικασίας λαμβάνεται κάποια αρχική τιμή x_0 , η οποία ονομάζεται σπόρος (seed).

Οι αριθμοί, οι οποίοι παράγονται με την διαδικασία αυτή, δεν είναι στην πραγματικότητα τυχαίοι δεδομένου ότι παράγονται με αιτιοκρατικό τρόπο και για τον λόγο αυτό χαρακτηρίζονται ως ψευδο-τυχαίοι. Πράγματι, μετά από ορισμένο αριθμό επαναλήψεων, το ανώτερο m, κάποιο από τα υπόλοιπα 0, 1, 2,...,m-1 επανεμφανίζεται και στη συνέχεια ολόκληρη η σειρά των τυχαίων αριθμών επαναλαμβάνεται. Όμως, στους σύγχρονους υπολογιστές, όπου υπάρχει η δυνατότητα

χρησιμοποίησης αρκετά μεγάλων τιμών του m, (π.χ. m= 2^{35}), ουσιαστικά οι αριθμοί που παράγονται είναι στατιστικά ανεξάρτητοι, τυχαίοι αριθμοί.

Κατά την προσομοίωση των συστημάτων, είναι συχνά απαραίτητη η παραγωγή τυχαίων αριθμών, οι οποίοι δεν ακολουθούν την ομοιόμορφη κατανομή αλλά άλλες γνωστές πιθανοτικές κατανομές. Αυτό γίνεται εφικτό με διάφορες μεθόδους όπως είναι ο αντίστροφος μετασχηματισμός, η μέθοδος απόρριψης κλπ. Η παρακάτω πρόταση περιγράφει την αρχή πάνω στην οποία στηρίζεται ο συνήθως χρησιμοποιούμενος αντίστροφος μετασχηματισμός.

Εάν U είναι η ομοιόμορφη κατανομή τυχαίων αριθμών στο διάστημα (0, 1), τότε για κάθε συνεχή συνάρτηση F, η τυχαία μεταβλητή X που ορίζεται από την εξίσωση (2.9) έχει συνάρτηση κατανομής F.

 $X=F^{-1}(U)$ (2.9)

Με βάση την παραπάνω πρόταση εάν η μεταβλητή X ακολουθεί τυχαία εκθετική κατανομή, δηλαδή $F(x) = 1 - e^{-x}$ τότε θέτοντας $u = F(x) = 1 - e^{-x}$ και λαμβάνοντας την αντίστροφη συνάρτηση $x = F^{-1}(x)$ έχουμε :

 $x = -\log(1 - u) \tag{2.10}$

Επομένως, για κάθε τυχαίο αριθμό *u* ομοιόμορφα κατανεμημένο στο διάστημα (0, 1) υπάρχει κάποιος άλλος τυχαίος *x* που προκύπτει από τον μετασχηματισμό (2.10), ο οποίος ακολουθεί την εκθετική κατανομή. Με παρόμοιο τρόπο, εφαρμόζοντας δηλαδή τον αντίστροφο μετασχηματισμό (2.9), μπορούμε να παράγουμε τυχαίες μεταβλητές που να ακολουθούν άλλες γνωστές κατανομές.

Διακρίνονται δύο βασικοί τύποι προσομοίωσης Monte-Carlo, η προσομοίωση τυχαίας προσπέλασης (random simulation) και η ακολουθιακή ή χρονολογική ή διακριτών ενδεχομένων προσομοίωση (sequential or chronological or discrete events simulation).

Κατά την προσομοίωση τυχαίας προσπέλασης γίνεται, κατά αρχάς, ανάλυση του συστήματος στα στοιχεία από τα οποία απαρτίζεται. Κάθε στοιχείο έχει ορισμένη, γνωστή πιθανότητα να βρίσκεται σε κάποια λειτουργική κατάσταση ή να έχει συγκεκριμένη επίδοση. Μέσω των τυχαίων αριθμών που ακολουθούν την ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα (0, 1), παράγονται οι καταστάσεις των στοιχείων του συστήματος. Ο συνδυασμός των καταστάσεων αυτών δίδει πληροφορίες για την κατάσταση ολοκλήρου του συστήματος (άνω ή κάτω). Επαναλαμβάνοντας την διαδικασία πάρα πολλές φορές εξάγονται δείκτες και συμπερισματα για την πιθανοτική συμπεριφορά του συστήματος.

Η ακολουθιακή προσομοίωση είναι πιο σύνθετη αλλά παρέχει περισσότερες πληροφορίες δεδομένου ότι προσομοιώνει τη συμπεριφορά και εξέλιξη του συστήματος στη διάρκεια του χρόνου. Κατά την προσομοίωση αυτή παρακολουθούνται γεγονότα και μεταβλητές. Γενικώς διακρίνονται τριών ειδών μεταβλητές :

- η μεταβλητή του χρόνου t, η οποία παρακολουθεί το χρόνο που έχει παρέλθει από την έναρξη της προσομοίωσης
- οι μεταβλητές των μετρητών, οι οποίες μετράνε τον αριθμό των γεγονότων που έχουν συμβεί μέχρι την χρονική στιγμή t
- η μεταβλητή της κατάστασης του συστήματος, η οποία περιγράφει την κατάσταση του συστήματος την χρονική στιγμή t.

Κάθε φορά που ένα γεγονός συμβαίνει όλες οι παραπάνω μεταβλητές αλλάζουν ή ανανεώνονται. Για τον προσδιορισμό του χρόνου στον οποίο θα συμβεί το επόμενο γεγονός κρατείται κατάλογος των μελλοντικών γεγονότων με ιεράρχηση ως προς τον χρόνο. Οι χρόνοι των διαφόρων γεγονότων προκύπτουν από την παραγωγή τυχαίων αριθμών οι οποίοι ακολουθούν γνωστές πιθανοτικές κατανομές με πλέον συνήθη την εκθετική.

Ένα σημαντικό ζήτημα που ενδιαφέρει κατά την εφαρμογή της μεθόδου Monte-Carlo είναι ο αριθμός των επαναλήψεων που απαιτούνται ώστε η μέθοδος να συγκλίνει και να εξαχθούν ακριβή αποτελέσματα.



ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

της μεν ουσίας υπομενούσης, τοις δε πάθεσι μεταβαλούσης (η ουσία παραμένει αναλλοίωτη αλλά οι ιδιότητες και μορφές αλλάζουν) Θαλής ο Μιλήσιος

3.1 Γενικά

Η ευστάθεια των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι από τα πιο σύνθετα και σημαντικά κεφάλαια στη μελέτη των συστημάτων αυτών. Απαιτεί την ανάλυση και διερεύνηση της συμπεριφοράς τους σε συνθήκες πέραν των κανονικών, όπου οι ιδιότητες τόσο της συμμετρίας όσο και της γραμμικότητας ενδέχεται να μην ισχύουν. Εξυπακούεται ότι, το ζήτημα της ευστάθειας είναι μείζονος σημασίας για τα σημερινά συστήματα δεδομένου ότι η διατήρησή τους σε λειτουργική κατάσταση είναι ζωτικής σημασίας για το κοινωνικό σύνολο.

Η ευστάθεια ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να οριστεί ως η ιδιότητα του να παραμένει σε λειτουργική κατάσταση ισορροπίας τόσο υπό κανονικές συνθήκες όσο και στις περιπτώσεις που το σύστημα θα δεχθεί μια διαταραχή. Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι στη πραγματικότητα σε μεγάλο βαθμό μη γραμμικά, των οποίων η δυναμική συμπεριφορά εξαρτάται από μέγα πλήθος συσκευών με διαφορετικούς ρυθμούς απόκρισης και χαρακτηριστικά.

Οι διαταραχές τις οποίες το σύστημα υφίσταται μπορεί να είναι είτε μικρές (small signal disturbances) είτε μεγάλες (large signal disturbances). Μικρές διαταραχές συμβαίνουν σε μόνιμη βάση δεδομένου ότι το φορτίο συνεχώς αλλάζει και το σύστημα μέσω του αυτόματου ελέγχου παραγωγής προσαρμόζει συνεχώς την

παραγωγή του στα νέα δεδομένα. Οι μεγάλες διαταραχές μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες στις ασύμμετρες και στις συμμετρικές. Ασύμμετρες διαταραχές είναι συνήθως τα βραχυκυκλώματα που εμπλέκουν την μία ή τις δύο φάσεις (μονοφασικά - διφασικά) [31]. Συμμετρικές διαταραχές είναι εκείνες που συνήθως προκαλούνται από την απώλεια μονάδων παραγωγής ή τα τριφασικά βραχυκυκλώματα.

Η υπόθεση της ευστάθειας περιλαμβάνει διαφορετικά στοιχεία του συστήματος και φαινόμενα των οποίων η εξέλιξη και ο χρονικός ορίζοντας μπορεί να διαρκέσει από ελάχιστα δευτερόλεπτα έως και αρκετά λεπτά. Με βάση την χρονική διάρκεια των φαινομένων αυτών η ευστάθεια ταξινομείται σε βραχυπρόθεσμη (short term stability) και μεσοπρόθεσμη - μακροπρόθεσμη ευστάθεια (mid - long term stability) [32].

Ανάλογα με το είδος των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα η ευστάθεια διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες την ευστάθεια γωνίας, την ευστάθεια τάσης και την ευστάθεια συχνότητας.

- Η ευστάθεια γωνίας αφορά στις ταλαντώσεις μεταξύ των μονάδων που ακολουθούν μια διαταραχή και στην ικανότητα τους να παραμένουν σε συγχρονισμό και να μην αποπαραλληλίζονται. Στο είδος αυτό της ευστάθειας η συχνότητα δεν θεωρείται ενιαία στο σύστημα [33, 34].
- Η ευστάθεια τάσης αφορά στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί συνεχώς τις τάσεις των ζυγών σε αποδεκτά επίπεδα και να μην οδηγείται σε κατάρρευση τάσεων [32, 35].
- Η ευστάθεια συχνότητας αφορά στην ικανότητα του συστήματος μετά από διαταραχή του ισοζυγίου παραγωγής-ζήτησης να επανέρχεται σε κατάσταση ισορροπίας αποκαθιστώντας το ισοζύγιο σε ένα άλλο σημείο λειτουργίας. Κατά την ευστάθεια αυτή θεωρείται ότι το σύστημα έχει αποκαταστήσει κοινή συχνότητα, η οποία όμως αποκλίνει σοβαρά από την ονομαστική.

Εν τούτοις, δεν πρέπει να διαφεύγει το γεγονός ότι η ευστάθεια ενός συστήματος είναι ενιαία και το ερώτημα που τίθεται είναι αν το σύστημα κατορθώσει να επανέλθει στην κανονική κατάσταση και να επιβιώσει. Η ταξινόμηση γίνεται κυρίως για λόγους μελέτης δεδομένου ότι πρόκειται για ένα αρκετά σύνθετο πρόβλημα που περιλαμβάνει πλήθος από συσκευές και φαινόμενα. Μετά από μια διαταραχή είναι δυνατόν να ακολουθήσουν φαινόμενα που σχετίζονται με όλα τα προηγούμενα είδη ευστάθειας και είναι πιθανόν το σύστημα να αντεπεξέλθει επιτυχώς σε κάποια από αυτά αλλά όχι σε όλα.

Ορισμένα στοιχεία και χαρακτηριστικά του συστήματος τα οποία εμπλέκονται και παίζουν σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια είναι: οι ρυθμιστές τάσης των μονάδων, οι ρυθμιστές φορτίου-συχνότητας, οι προστασίες του συστήματος Μεταφοράς, η ικανότητα για γρήγορη σβέση του τόξου των διακοπτών ισχύος, τα tap changer των μετασχηματιστών, οι πυκνωτές εγκάρσιας αντιστάθμισης, η προστασία αποκοπής φορτίου, η σταθερά αδράνειας των μονάδων, η στιβαρότητα και επάρκεια του συστήματος Μεταφοράς, η αυτόματη επαναφορά των διακοπτών ισχύος, τα χαρακτηριστικά του φορτίου, τα βοηθητικά των μονάδων παραγωγής, κλπ. Στην πραγματικότητα, όλα τα στοιχεία του συστήματος σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό συμμετέχουν και παίζουν ρόλο σε κάποια από τα φαινόμενα που σχετίζονται με την ευστάθεια.

3.2 Αυτόματος Έλεγχος Παραγωγής

Η λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί συνεχή εξισορρόπηση ανάμεσα στη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ και στη ζήτηση φορτίου. Πιο αναλυτικά, η παραγόμενη ανά πάσα στιγμή ισχύς ισούται με την ζήτηση συν τις απώλειες. Αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας δεν συμβαίνει πουθενά στο σύστημα. Η αποταμίευση και επιστροφή ισχύος στα χωρητικά στοιχεία του συστήματος λόγω εγκατάστασης του ηλεκτρικού πεδίου καθώς και το αντίστοιχο φαινόμενο στα επαγωγικά στοιχεία λόγω μαγνητικού πεδίου ακολουθούν χρονική περίοδο μόλις 20 ms και επομένως, το ισοζύγιο ισχύος είναι μηδενικό στην διάρκεια μιας περιόδου.

Η ισορροπία ανάμεσα στην παραγωγή και την ζήτηση φορτίου, η οποία είναι κεφαλαιώδους σημασίας για την ευστάθεια του συστήματος, επιτυγχάνεται με αδιάλειπτη προσαρμογή της παραγόμενης από τις γεννήτριες ηλεκτρικής ισχύος στη συνεχώς μεταβαλλόμενη κατανάλωση. Κριτήριο της ισορροπίας αυτής, όπως θα αναλυθεί στην συνέχεια, είναι η συχνότητα του συστήματος, η οποία πρέπει να διατηρείται σταθερή στα ονομαστικά επίπεδα. Η διαδικασία με την οποία οι έξοδοι των μονάδων οδηγούνται στις επιθυμητές τιμές από πλευράς παραγωγής είναι μια από τις πιο σημαντικές λειτουργίες των σύγχρονων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και ονομάζεται **αυτόματος έλεγχος παραγωγής** [36, 37, 38].

Ο ρόλος της προσαρμογής αυτής ανήκει στους ρυθμιστές στροφών των μονάδων, οι οποίοι ελέγχουν τη μηχανική ισχύ των κινητήριων μηχανών (στροβίλων) επενεργώντας στις βαλβίδες ατμού, καυσίμου ή νερού, ανάλογα με τον τύπο της μονάδας. Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1, η θερμική ενέργεια του ατμού μιας ατμοστροβιλικής μονάδας μετατρέπεται αρχικά σε μηχανική ενέργεια των πτερυγίων του στροβίλου, στη συνέχεια σε κινητική ενέργεια των στρεφομένων μαζών που βρίσκονται πάνω στον κοινό άξονα (στρόβιλος, δρομέας γεννήτριας), για να μετασχηματιστεί τελικά σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω της ηλεκτρομαγνητικής ροπής και της αλληλεπίδρασης των στρεφόμενων πεδίων στάτη και δρομέα.



Σχήμα 3.1 . Μετατροπή ενέργειας σε Ατμοηλεκτρική μονάδα παραγωγής

Μια ξαφνική αύξηση της ζήτησης φορτίου τροφοδοτείται αρχικά από την κινητική ενέργεια των στρεφομένων μαζών με αποτέλεσμα την προσωρινή επιβράδυνση τους και κατά συνέπεια, την βύθιση της συχνότητας. Το αντίθετο συμβαίνει κατά την ξαφνική μείωση της ζήτησης. Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται το λειτουργικό

διάγραμμα του αυτόματου έλεγχου παραγωγής, όπου διακρίνονται οι δύο τύποι ρύθμισης [37].

- Πρωτεύουσα ρύθμιση. Ο τύπος αυτός ρύθμισης είναι αποκεντρωμένος και αφορά σε κάθε μονάδα χωριστά, η οποία μέσω της διάταξης μέτρησης των στροφών της αντιλαμβάνεται κάθε μεταβολή, την οποία μετατρέπει σε εντολή προς την βαλβίδα ατμού, νερού ή καυσίμου προσαρμόζοντας ανάλογα την μηχανική ισχύ. Η διαδικασία αυτή, η οποία απεικονίζεται από τον εσωτερικό βρόγχο του σχήματος 3.2, είναι αρκετά γρήγορη, της τάξεως ορισμένων δευτερολέπτων.
- Δευτερεύουσα ρύθμιση. Ο τύπος αυτός ρύθμισης ενεργοποιείται μέσω κεντρικής διάταξης ελέγχου της συχνότητας, η οποία βρίσκεται στο Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας. Η διάταξη αυτή μετατρέπει το σφάλμα συχνότητας σε εντολή προς τον μηχανισμό αλλαγής στροφών των ρυθμιζουσών μονάδων (μία ή περισσότερες) για να προσαρμόσουν ανάλογα την ισχύ εξόδου τους. Η διαδικασία αυτή έπεται της πρωτεύουσας ρύθμισης και είναι πολύ πιο αργή σε σχέση με την πρώτη, δηλαδή της τάξεως αρκετών λεπτών. Στο σχήμα 3.2 απεικονίζεται από τον εξωτερικό βρόγχο.



Σχήμα 3.2. Λειτουργικό διάγραμμα αυτόματου έλεγχου παραγωγής

3.3 Επιπτώσεις Συχνότητας στη Λειτουργία των Γεννητριών

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, εάν το ισοζύγιο παραγωγής - ζήτησης διαταραχθεί, τότε η συχνότητα αποκλίνει από τα ονομαστικά της επίπεδα με αποτέλεσμα την εμφάνιση υποσυχνότητας είτε υπερυχνότητας στο σύστημα.

Επιπτώσεις υποσυχνότητας

Η υποσυχνότητα είναι αποτέλεσμα αιφνίδιας έλλειψης παραγωγής, προερχόμενη συνήθως από απώλεια κάποιας μονάδας. Στη περίπτωση αυτή οι υπόλοιπες μονάδες, που παραμένουν στο σύστημα, υφίστανται σοβαρή καταπόνηση δεδομένου ότι καλούνται να αναλάβουν το επί πλέον φορτίο και να υπερφορτωθούν ενώ παράλληλα η ψύξη τους μειώνεται εξ αιτίας της συνεπακόλουθης μείωσης των στροφών τους. Επίσης, είναι πιθανόν να επικρατήσουν χαμηλές τάσεις στο σύστημα, γεγονός που θα ενεργοποιήσει τους ρυθμιστές τάσεως των μονάδων με αποτέλεσμα να προχωρήσουν σε αύξηση της διέγερσης. Οι συνθήκες αυτές τείνουν να προκαλέσουν υπερθέρμανση είτε του στάτη είτε του δρομέα. Για τους λόγους αυτούς υπάρχει κίνδυνος απώλειας μονάδας εξ αιτίας της λειτουργίας κάποιας προστασίας, όπως η υπερθέρμανση στάτη, η υπερθέρμανση δρομέα, η υπερδιέγερση, η υποσυχνότητα κλπ. Δεδομένου ότι το σύστημα βρίσκεται ήδη σε συνθήκες έλλειψης παραγωγής, απώλεια οποιασδήποτε επί πλέον μονάδας θα επιδεινώσει την ήδη κρίσιμη κατάσταση και πιθανόν να οδηγήσει σε αλλεπάλληλες απώλειες μονάδων μέχρι την τελική γενική διακοπή του συστήματος (black out).

Οι κανονισμοί, κατά ANSI, παρέχουν γενικές οδηγίες σχετικά με τα χρονικά όρια αντοχής σε υπερθέρμανση των γεννητριών των ατμομονάδων. Όπως φαίνεται στο Πίνακα 3.1, υπάρχει κάποιος ανώτερος επιτρεπόμενος χρόνος υπερθέρμανσης της γεννήτριας είτε από ρεύμα στάτη ανώτερου του ονομαστικού είτε από τάση διέγερσης υψηλότερης της ονομαστικής.

Επιτρεπόμενος χρόνος (s)	Ρεύμα στάτη (pu)	Τάση διέγερσης (pu)
120	1.16	1.12
60	1.3	1.25
30	1.54	1.46
10	2.26	2.08

Πίνακας 3.1	Ικανότητα	υπερθέρμανση	ις νεννι	ιτοιών
110000000 0.1	110000000000000000000000000000000000000	010000000000000000000000000000000000000	15 /07 /1	pres r

Επιπτώσεις υπερσυχνότητας

Η υπερσυχνότητα είναι αποτέλεσμα περίσσειας παραγωγής, η οποία μπορεί να προκύψει από αντίστοιχη απώλεια φορτίου. Η κατάσταση αυτή είναι λιγότερο κρίσιμη για το σύστημα σε σχέση με την υποσυχνότητα δεδομένου ότι οι μονάδες θα τείνουν να προχωρήσουν σε απόρριψη φορτίου μέσω των αυτόματων ρυθμιστών τους και κατά συνέπεια να ισορροπήσουν σε χαμηλότερα επίπεδα φόρτισης ενώ λόγω των υψηλών στροφών αυξάνεται η ψύξη τους. Επίσης, είναι πιθανόν, οι τάσεις του συστήματος να βρίσκονται σε υψηλά επίπεδα λόγω της απώλειας φορτίου, γεγονός που θα ενεργοποιήσει τους ρυθμιστές τάσεως των μονάδων να λειτουργήσουν προς την κατεύθυνση μείωσης των τάσεων. Στην προσπάθειά τους αυτή, ίσως, κάποιες μονάδες οδηγηθούν σε πτώση (trip) λόγω λειτουργίας της προστασίας υποδιέγερσης. Το ίδιο μπορεί να συμβεί από λειτουργία της προστασίας υπερσυχνότητας ή υπερτάχυνσης, εάν η υψηλή συχνότητα διατηρηθεί πέραν κάποιου χρονικού ορίου [39]. Απώλεια οποιασδήποτε μονάδας θα λειτουργήσει θετικά για τις υπόλοιπες δεδομένου ότι θα συμβάλει στην γρήγορη αποκατάσταση συνθηκών ισορροπίας μεταξύ της παραγωγής και της ζήτησης. Εν τούτοις, είναι δυνατόν κάτω από ορισμένες συνθήκες το σύστημα να οδηγηθεί σε αστάθεια και οι μονάδες να χωριστούν σε ομάδες και να αποσυγχρονιστούν μεταξύ τους.

3.4 Επιπτώσεις Συχνότητας στους Στροβίλους των Μονάδων

Ως γνωστόν, οι ατμοστρόβιλοι απαρτίζονται από διαδοχικές βαθμίδες πτερυγίων, πάνω στις οποίες εκτονώνεται ο υπέρθερμος υπό πίεση ατμός, μετατρέποντας μέρος της ενέργειας του σε αντίστοιχη μηχανική. Οι διάφορες βαθμίδες περιλαμβάνουν πτερύγια διαφορετικών διαστάσεων, ξεκινώντας από τα μικρότερα, που βρίσκονται στη βαθμίδα υψηλής πίεσης και καταλήγοντας στα μεγαλύτερα που περιλαμβάνονται στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης.

Τα πτερύγια των ατμοστροβίλων υπόκεινται σε σύνθετη μηχανική καταπόνηση λόγω της επίδρασης πλήθους δυνάμεων. Οι δυνάμεις αυτές διακρίνονται σε εκείνες που ασκούνται μόνιμα και σε εκείνες που εκδηλώνονται κάτω από ορισμένες συνθήκες και προξενούν μεταβατική καταπόνηση. Η μόνιμη (σταθερή) καταπόνηση οφείλεται στη φυγόκεντρο δύναμη λόγω περιστροφής των μαζών των πτερυγίων καθώς και στη σταθερή δύναμη του ατμού κατά την εκτόνωσή του πάνω στα πτερύγια. Η μεταβατική καταπόνηση οφείλεται στη διέγερση των πτερυγίων υπό την επίδραση εναλλασσόμενων δυνάμεων, των οποίων οι συχνότητες πλησιάζουν τις φυσικές συχνότητες των πτερυγίων.

Κάθε πτερύγιο είναι στερεωμένο από την μία πλευρά του στον άξονα του στροβίλου και ελεύθερο στο άλλο άκρο του, άρα από μηχανικής πλευράς συμπεριφέρεται ως δοκός πακτωμένη στο ένα άκρο της και ελεύθερη στο άλλο. Κατά συνέπεια, τα πτερύγια έχουν κάποιες φυσικές συχνότητες ταλάντωσης (ιδιοσυχνότητες), οι οποίες εξαρτώνται από τα γεωμετρικά και φυσικά χαρακτηριστικά (διαστάσεις πτερυγίων,

ακτίνα του άξονα, ειδικό βάρος μετάλλων κλπ), καθώς επίσης και από την ταχύτητα περιστροφής του κοινού άξονα.

Το διάγραμμα του σχήματος 3.3, γνωστό ως διάγραμμα Goodman, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της αντοχής των πτερυγίων σε συνδυασμένη καταπόνηση, δηλαδή στην σταθερή και στην εναλλασσόμενη. Ο οριζόντιος άξονας δίδει την σταθερή καταπόνηση, όπου **a** είναι το όριο αντοχής των πτερυγίων και ο κατακόρυφος άξονας την εναλλασσόμενη καταπόνηση όπου **b** το αντίστοιχο όριο αντοχής. Η ευθεία **ab** αποτελεί την οριογραμμή αντοχής σε συνδυασμένη καταπόνηση με συντελεστή ασφάλειας 100 % ενώ η ευθεία **cd** παρέχει συντελεστή ασφάλειας 150 %. Επομένως, η περιοχή ασφαλούς λειτουργίας βρίσκεται κάτω από την ευθεία **ab** και όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση του σημείου λειτουργίας από το όριο **ab** τόσο μεγαλύτερος ο συντελεστής ασφάλειας.



Σχήμα 3.3. Διάγραμμα Goodman

Το διάγραμμα του σχήματος 3.4, γνωστό ως διάγραμμα **Campbell** παρέχει πληροφορίες σε σχέση με τις συνθήκες που μπορεί να διεγείρουν εναλλασσόμενη καταπόνηση [40]. Ο οριζόντιος άξονας δίδει την ταχύτητα του άξονα περιστροφής και ο κατακόρυφος την συχνότητα διέγερσης των πτερυγίων. Οι έντονες, κόκκινες γραμμές παρέχουν τις φυσικές συχνότητες (ιδιοσυχνότητες) των πτερυγίων ορισμένου τύπου στροβίλου για κάθε ταχύτητα περιστροφής. Ο υπολογισμός των φυσικών συχνοτήτων είναι αρκετά δύσκολος και γίνεται είτε με πειραματικό τρόπο είτε με προσομοίωση των πτερυγίων δια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Κάθε πτερύγιο μπορεί να προσομοιωθεί ως ένα σύνολο δοκών με διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Στο ίδιο διάγραμμα, η θεμελιώδης συχνότητα και οι αρμονικές για κάθε ταχύτητα περιστροφής, αποτελούν δέσμη ευθειών που ξεκινούν από την αρχή των αξόνων. Οι

στρόβιλοι έχουν σχεδιαστεί με πρόβλεψη ώστε οι φυσικές συχνότητες των πτερυγίων να παρεμβάλλονται μεταξύ των αρμονικών, στην ονομαστική ταχύτητα περιστροφής. Με το τρόπο αυτό αποφεύγεται η διέγερση των πτερυγίων στις φυσικές τους συχνότητες, γεγονός που θα προκαλούσε συνθήκες συντονισμού με σοβαρές συνέπειες στη μηχανική αντοχή των πτερυγίων.

Όμως, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4, αυτό που επιτυγχάνεται στην ονομαστική συχνότητα χάνεται σε σημαντικό βαθμό καθώς η συχνότητα αποκλίνει από τα ονομαστικά επίπεδα με αποτέλεσμα την αναπόφευκτη καταπόνηση κάποιων πτερυγίων.



Σχήμα 3.4. Διάγραμμα Campbell

Η καταπόνηση των πτερυγίων είναι μια διαδικασία που δρα συσσωρευτικά κατά την διάρκεια ζωής του στροβίλου με αποτέλεσμα να επηρεάζει σημαντικά τον χρόνο ζωής του. Αξίζει να σημειωθεί ότι η καταπόνηση αυτή, η οποία είναι σοβαρή στο ονομαστικό φορτίο, μειώνεται σημαντικά όταν το φορτίο της μονάδας είναι χαμηλό. Οι κατασκευαστές των στροβίλων παραδίδουν νομογραφήματα, όπως αυτό του σχήματος 3.5, όπου εμφανίζεται ο συνολικός χρόνος κατά τον οποίο ο στρόβιλος μπορεί να λειτουργήσει σε ονομαστικό φορτίο για κάθε ταχύτητα περιστροφής [40]. Σύμφωνα με το νομογράφημα του σχήματος 3.5, ο στρόβιλος του κατασκευαστή Α μπορεί να λειτουργήσει με ασφάλεια και χωρίς καμία μείωση της διάρκειας ζωής του για εύρος συχνοτήτων από 59.5 Ηz έως 60.5 Ηz, ενώ για συχνότητες χαμηλότερες από 56.5 Ηz, η διάρκεια ζωής του στροβίλου περιορίζεται σε ένα μόλις δευτερόλεπτο.



Σχήμα 3.5. Νομογράφημα αντοχής στροβίλου σε συχνότητες πέραν της ονομαστικής

Η διέγερση των πτερυγίων σε εναλλασσόμενη καταπόνηση προκαλείται από διάφορες αιτίες, κυριότερες από τις οποίες είναι:

- Η πίεση του ατμού που εκτονώνεται πάνω σε ένα πτερύγιο δεν είναι σταθερή κατά τη διάρκεια μιας περιστροφής με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένας παλμός ανά περιστροφή καθώς το πτερύγιο περνά διαδοχικά από την ελάχιστη προς την μέγιστη καταπόνηση.
- Το πτερύγιο κατά την περιστροφή του υφίσταται ροπή από την πίεση του ατμού των διαδοχικών ακροφυσίων, γεγονός που αντιστοιχεί σε εναλλασσόμενη φόρτιση, συχνότητας ίσης με την ταχύτητα περιστροφής επί τον αριθμό των ακροφυσίων.

Στο διάγραμμα 3.6 παρουσιάζεται ο βαθμός ενίσχυσης της ταλάντωσης συγκεκριμένου πτερυγίου λόγω συντονισμού, καθώς η συχνότητα διέγερσης πλησιάζει την φυσική του συχνότητα.



Σχήμα 3.6 Βαθμός ενίσχυσης ταλάντωσης πτερυγίων

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι οι υδροστρόβιλοι λόγω διαφορετικών κατασκευαστικών χαρακτηριστικών δεν αντιμετωπίζουν αντίστοιχο πρόβλημα μείωσης της διάρκειας ζωής τους κατά την λειτουργία σε συνθήκες υπερσυχνότητας ή υποσυχνότητας [33].

3.5 Προσομοίωση Λειτουργίας Γεννήτριας

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7, κάθε μονάδα περιλαμβάνει μία στρεφόμενη μάζα (άξονας, πτερύγια στροβίλου και δρομέας γεννήτριας), η οποία υπόκειται στην επίδραση δύο ροπών αντιστρόφου φοράς. Η κινητήριος μηχανική ροπή T_m είναι το αποτέλεσμα των δυνάμεων που ασκεί ο ατμός στα πτερύγια του στροβίλου ή το νερό στα πτερύγια του υδροστροβίλου. Αύξηση της παροχής του ατμού ή του νερού συνεπάγεται αντίστοιχη αύξηση της κινητηρίου ροπής. Από την άλλη πλευρά η ηλεκτρική ροπή πέδησης T_e είναι η ροπή, η οποία μεταφέρεται από το ηλεκτρικό φορτίο στο δρομέα μέσω των στρεφόμενων ηλεκτρικών πεδίων της γεννήτριας. Αύξηση του φορτίου συνεπάγεται αύξηση της ροπής πέδησης. Σε συνθήκες απόλυτης ισορροπίας η μηχανική και η ηλεκτρική ροπή είναι ίσες κατά μέτρο αλλά αντιθέτου φοράς με αποτέλεσμα ο άξονας να περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα, γεγονός που συνεπάγεται σταθερή συχνότητα. Αύξηση της ηλεκτρικής ροπής λόγω αύξησης του φορτίου έχει ως αποτέλεσμα την επιβράδυνση του άξονα και κατά συνέπεια την μείωση της συχνότητας [38].



Σχήμα 3.7. Άξονας στροβιλογεννήτριας

Ο θεμελιώδης νόμος της περιστροφικής κίνησης εφαρμοζόμενος για τον κοινό άξονα της στροβιλογεννήτριας παρέχει την εξίσωση (3.1), όπου J η ροπή αδράνειας των μαζών του άξονα και $ω_m$ η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής.

$$J\frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e \tag{3.1}$$
Δεδομένου ότι $P_m = \omega_m \cdot T_m$ και $P_e = \omega_m \cdot T_e$ η εξίσωση (3.1) μετασχηματίζεται στην εξ. (3.2), όπου P_m η μηχανική και P_e και ηλεκτρική ισχύ.

$$\omega_m \cdot J \frac{d\omega_m}{dt} = P_m - P_e \tag{3.2}$$

Λαμβανομένου υπόψη ότι η κινητική ενέργεια του άξονα W_k δίδεται από την σχέση (3.3), η εξίσωση (3.2) μετατρέπεται στην (3.4), η οποία έχει γραφεί στις ονομαστικές στροφές της μηχανής, όπου η κινητική ενέργεια συμβολίζεται με W_{k0} .

$$W_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2 \tag{3.3}$$

$$\frac{2W_{k0}}{\omega_{m0}}\frac{d\omega_m}{dt} = P_m - P_e \tag{3.4}$$

Η μηχανική γωνιακή ταχύτητα ω_m συνδέεται με την ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα ω βάσει της σχέσης $\omega = \omega_m z$, όπου z ο αριθμός των ζευγών των πόλων της μηχανής και κατά συνέπεια, η σχέση (3.4) μετασχηματίζεται τελικά στην (3.5).

$$\frac{2W_{k0}}{\omega_0}\frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \tag{3.5}$$

Διαιρώντας και τα δύο μέλη της (3.5) με την ονομαστική ισχύ της μηχανής P_n και ορίζοντας την **σταθερά αδράνειας** $H = \frac{W_{k0}}{P_n}$, η σχέση (3.5) μετασχηματίζεται στην (3.6). Η σταθερά αδράνειας της στροβιλογενήτριας είναι η ανηγμένη κινητική ενέργεια στην ονομαστική ισχύ της μηχανής, έχει διαστάσεις χρόνου και είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος της μηχανής. Η τιμή της κυμαίνεται από 2 έως 10 s και είναι μέγεθος που παίζει καθοριστικό ρόλο κατά τα πρώτα κρίσιμα δευτερόλεπτα μετά από απώλεια παραγωγής. Κατά το κρίσιμο αυτό διάστημα, μέρος της αποταμιευμένης κινητικής ενέργειας του άξονα μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια και αξιοποιείται για την ικανοποίηση του φορτίου συμβάλλοντας στην εξισορρόπηση ανάμεσα στην παραγόμενη και καταναλισκόμενη ισχύ.

$$\frac{2H}{\omega_0}\frac{d\omega}{dt} = P_m(pu) - P_e(pu)$$
(3.6)

Λαμβανομένου υπόψη ότι $\frac{d\omega}{dt} = \frac{df}{dt}$ η εξ. (3.6) μετατρέπεται στην (3.7)

$$\frac{2H}{\omega_0}\frac{df}{dt} = P_m(pu) - P_e(pu)$$
(3.7)

Αν θεωρήσουμε μικρές μεταβολές της μηχανικής και ηλεκτρικής ισχύος ΔP_m και ΔP_e , οι οποίες έχουν ως συνέπεια την μεταβολή της συχνότητας κατά Δf και δεδομένου ότι ΔP_m - $\Delta P_e = P_m$ - P_e , η σχέση (3.7) μετατρέπεται στην (3.8). Ο μετασχηματισμός

Laplace της εξ. (3.8) δίδει την εξ. (3.9), η οποία απεικονίζεται στο δομικό διάγραμμα του σχήματος 3.8.

$$\frac{2H}{\omega_0}\frac{d(\Delta f)}{dt} = \Delta P_m(pu) - \Delta P_e(pu) = P_m(pu) - P_e(pu)$$
(3.8)

$$\Delta F(s) = \frac{1}{2Hs} [P_m(pu) - P_e(pu)]$$
(3.9)



Σχήμα 3.8. Δομικό διάγραμμα γεννήτριας

3.6 Προσομοίωση Φορτίου

Η συμπεριφορά του φορτίου στις διακυμάνσεις τάσης και συχνότητας είναι αρκετά σύνθετη δεδομένου ότι το συνολικό φορτίο σε ένα ζυγό του συστήματος Μεταφοράς περιλαμβάνει μέγα πλήθος από διαφορετικές συσκευές (κινητήρες, ψυγεία, λαμπτήρες φθορισμού, συμπιεστές κλπ). Επί πλέον, επίδραση στη συμπεριφορά του φορτίου έχουν οι Μ/Σ υποβιβασμού, οι γραμμές διανομής, οι ρυθμιστές τάσεις, οι πυκνωτές εγκάρσιας αντιστάθμισης κλπ. Πέραν τούτου, η σύνθεση του φορτίου ποικίλει ανάλογα με την ώρα της ημέρας ή την εποχή του έτους. Έχουν αναπτυχθεί δύο κατηγορίες μοντέλων προσομοίωσης του φορτίου, τα στατικά και τα δυναμικά μοντέλα. Τα στατικά μοντέλα βρίσκουν εφαρμογή στις περιπτώσεις μικρών διαταραχών της τάσης και της συχνότητας, όπου η ισορροπία επιτυγχάνεται γρήγορα μετά την αρχική διαταραχή. Τα δυναμικά μοντέλα είναι απαραίτητα για την ανάλυση μεγάλων διαταραχών που οδηγούν σε ταλαντώσεις του συστήματος, όπου εξετάζονται ζητήματα ευστάθειας τάσης ή δυναμικής ευστάθειας [32].

Οι εξισώσεις (3.10 - 3.11) παρουσιάζουν το στατικό εκθετικό μοντέλο του φορτίου. Οι συντελεστές α, b δίδουν την εξάρτιση του φορτίου από την τάση, ενώ οι μερικές παράγωγοι $\frac{\partial P}{\partial f}$, $\frac{\partial Q}{\partial f}$ εκφράζουν την εξάρτηση από την συχνότητα. Όσον αφορά τη σχέση φορτίου - τάσης είναι προφανές ότι για α=b=0 το μοντέλο αντιστοιχεί σε φορτίο σταθερής ισχύος, για α=b=1 το φορτίο αντιστοιχεί σε φορτίο σταθερού ρεύματος και για α=b=2 σε φορτίο σταθερής σύνθετης αντίστασης. Στη γενική περίπτωση σύνθετου φορτίου, ο εκθέτης α κυμαίνεται από 0.5 έως 1.8 ενώ ο συντελεστής b από 1.5 έως 6.

$$P = P_o V^a \left(1 + \frac{\partial P}{\partial f} \cdot \Delta f\right) \tag{3.10}$$

$$Q = Q_0 V^b \left(1 + \frac{\partial Q}{\partial f} \cdot \Delta f\right) \tag{3.11}$$

Το μέγεθος $\frac{\partial P}{\partial f}$ χαρακτηρίζεται ως συντελεστής απόσβεσης ή αυτορρύθμισης

fortion D $(D = \frac{\partial P}{\partial f} \ \eta \ D = \frac{\Delta P}{\Delta f}).$

Άρα, η σχέση (3.10) γράφεται ισοδύναμα ως την (3.12). Ο συντελεστής D κυμαίνεται από 0 έως 3 και στις μελέτες λαμβάνεται συνήθως ίσος με την μονάδα, ο δε συντελεστής $\frac{\partial Q}{\partial f}$ κυμαίνεται από -2 έως 0.

$$P = P_o V^a + P_0 V^a D \cdot \Delta f \tag{3.12}$$

Ένα άλλο μοντέλο που επίσης χρησιμοποιείται είναι το πολυωνυμικό, το οποίο θεωρεί ότι το συνολικό φορτίο απαρτίζεται από φορτία σταθερής ισχύος, σταθερού ρεύματος και σταθερής αντίστασης. Το μοντέλο καταστρώνεται με επαναληπτική εφαρμογή των σχέσεων (3.10-3.11).

Με βάση την σχέση (3.12) η χαρακτηριστική του φορτίου στο διάγραμμα P, f (σχήμα 3.9) είναι μια ευθεία γραμμή L, η κλίση της οποίας εξαρτάται από τον συντελεστή απόσβεσης D. Μια βηματική αύξηση του φορτίου κατά ΔP μετατοπίζει προς τα δεξιά την χαρακτηριστική στη νέα θέση L'.



Σχήμα 3.9. Χαρακτηριστική φορτίου

Όπως είναι φυσικό, για καθαρώς ωμικό φορτίο δεν υπάρχει εξάρτιση του φορτίου από την συχνότητα, δηλαδή $\frac{\partial P}{\partial f} = 0$. Στην περίπτωση φορτίου σύνθετης αντίστασης Z= R+jωL, ισχύει η εξίσωση (3.13), όπου Y=1/Z. Δια αντικατάστασης του Y στην (3.13) προκύπτει η (3.14). Από την εξίσωση αυτή προκύπτει ότι αυξανομένης της συχνότητας μειώνεται η ενεργός ισχύς ($\frac{\partial P}{\partial f} < 0$).

$$P + jQ = |V|^2 Y^*$$
(3.13)

$$P = \frac{R|V|^2}{R^2 + (2\pi f)^2}$$
(3.14)

Το συμπέρασμα αυτό δεν αντιπροσωπεύει την γενικότητα δεδομένου ότι σε τυπικό φορτίο, όπου η συμμετοχή των κινητήρων υπερβαίνει το 70 % του συνολικού φορτίου ισχύει το αντίθετο, δηλαδή, αυξανομένης της συχνότητας αυξάνονται οι στροφές και κατά συνέπεια αυξάνεται η απορρόφηση ενεργού ισχύος. Πράγματι, στην περίπτωση του κινητήρα η ηλεκτρική ισχύς P_e δίδεται από την σχέση (3.15) από την οποία προκύπτει η (3.16).

$$P_e = \omega_m \cdot T_e \tag{3.15}$$

$$\Delta P_e = \omega_m \cdot \Delta T_e + T_e \cdot \Delta \omega_m \tag{3.16}$$

Στη σχέση (3.16) ο πρώτος όρος $\omega_m \cdot \Delta T_e$ εκφράζει την αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος σε σταθερές στροφές ω_m εξ αιτίας την αύξησης της ροπής δηλαδή της προσθήκης νέου φορτίου ΔP_L . Ο δεύτερος όρος $T_e \cdot \Delta \omega_m$ εκφράζει την αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος εξ αιτίας της αύξησης της ταχύτητας περιστροφής δηλαδή της συχνότητας και γράφεται ισοδύναμα ως $D \cdot \Delta f$

Με βάση τα παραπάνω, μια μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος κατά ΔP_e , η οποία συνεπάγεται σφάλμα συχνότητας Δf θα οδηγήσει σε αυτορρύθμιση του φορτίου $\Delta P_L^* = D \cdot \Delta f$. Άρα, η μεταβολή ηλεκτρικής ισχύος λόγω μεταβολής του φορτίου ΔP_L και λόγω αυτορρύθμισης του φορτίου ΔP_L^* δίδεται από την σχέση 3.17 και κατά συνέπεια, το δομικό διάγραμμα του σχήματος 3.8 μετατρέπεται σε εκείνο του σχήματος 3.10 (α) ή τα ισοδύναμά του 3.10 (β) και 3.10 (γ), όπου Kp=1/D, Tp=2H/D.

$$\Delta P_e = \Delta P_L + \Delta P_l^* = \Delta P_L + D \cdot \Delta f$$



(3.10)



Σχήμα 3.10. Δομικό διάγραμμα γεννήτριας – φορτίου

Όπως είναι φυσικό, σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας το φορτίο υπόκειται σε συνεχείς μεταβολές και κατά συνέπεια, είναι ανάγκη να ασκείται μόνιμος έλεγχος της μηχανικής ροπής των κινητηρίων μηχανών ώστε η συχνότητα να διατηρείται σταθερή.

Ο Πίνακας 3.2 δίδει χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή απόσβεσης D καθώς και της εξάρτησης της άεργου ισχύος από την συχνότητα για διάφορους τύπους φορτίων. Ο Πίνακας 3.3 παρουσιάζει τις ίδιες παραμέτρους για διάφορες κατηγορίες φορτίων.

Τύπος φορτίου	Συντελεστής αυτορρύθμισης φορτίου D= ∂P/∂f	Σχέση αέργου ισχύος με την συχνότητα ∂Q/∂f	
Κλιματιστικά			
 τριφατικά κεντρικά 	0,98	-1,3	
 μονοφασικά κεντρικά 	0,9	-2,7	
- τύπου παραθύρου	0,56	-2,8	
Πλυντήρια ρούχων	3	1,8	
Πλυντήρια πιάτων	0	-1,4	
Ψυγεία	0,53	-1,5	
Τηλεοράσεις	0	-4,5	
Λαμπτήρες φθορισμού	1	-2,8	
Βιομηχανικοί κινητήρες	2,5	1,2	
Ανεμιστήρες	2,9	1,7	
Μετασχηματιστές εν κενώ	0	-11,2	

Πίνακας 3.2. Σχέση ενεργού και αέργου ισχύος με την συχνότητα για διάφορους τύπους φορτίων

Κατηγορία φορτίου	Συντελεστής αυτορρύθμισης φορτίου D= ∂P/∂f	Σχέση άεργου ισχύος με την συχνότητα ∂Q/∂f	
Οικιακοί καταναλωτές			
- καλοκαίρι	0,8	-2,2	
- χειμώνα	1	-1,5	
Εμπορικοί καταναλωτές			
- καλοκαίρι	1,2	-1,6	
- χειμώνα	1,5	-1,1	
Βιομηχανικοί καταναλωτές	2,6	1,6	
Βοηθητικά Σταθμών παραγωγής	2,9	1,8	

Πίνακας 3.3. Σχέση	ενεργού κο	α αέργου	ισχύος με τη	ν συχνότητα
για	διάφορες κ	ατηγορίες	ς φορτίων	

3.7 Προσομοίωση Λειτουργίας Στροβίλου

Γενικά

Ο ατμοστρόβιλος μετατρέπει την ενέργεια η οποία είναι αποθηκευμένη στον υπέρθερμο, υπό πίεση ατμό σε μηχανική ενέργεια στον άξονα της γεννήτριας. Η πηγή θερμότητας στο λέβητα προέρχεται είτε από την καύση συμβατικού καυσίμου δηλαδή κάρβουνου, πετρελαίου ή αερίου είτε από την σχάση ραδιενεργού υλικού στον πυρηνικό αντιδραστήρα.

Ανάλογα με το μέγεθος και τις συνθήκες λειτουργίας οι ατμοστρόβιλοι κατασκευάζονται σε διάφορους τύπους και διατάξεις. Κάθε ατμοστρόβιλος αποτελείται από διάφορες βαθμίδες συγκροτημένες σε ενιαίους κυλίνδρους. Οι βαθμίδες αυτές μπορεί να συνδέονται είτε όλες εν σειρά, πάνω σε κοινό άξονα, που περιστρέφει κοινή γεννήτρια είτε να μοιράζονται σε δύο άξονες, που τροφοδοτούν χωριστές γεννήτριες. Ο δεύτερος τύπος επιτυγχάνει μεγαλύτερη ισχύ και καλύτερο βαθμό απόδοσης, συναντάται όμως σπανιότερα στη πράξη διότι έχει υψηλότερο κόστος κατασκευής. Ανάλογα με την πίεση του ατμού οι βαθμίδες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, στις βαθμίδες υψηλής, μέσης και χαμηλής πίεσης.

Πολλοί ατμοστρόβιλοι είναι εφοδιασμένοι με διάταξη αναθέρμανσης. Ο ατμός μετά την έξοδο του από την βαθμίδα υψηλής πίεσης επιστρέφει στο λέβητα, όπου

αναθερμαίνεται πριν οδεύσει προς την βαθμίδα μέσης πίεσης. Η αναθέρμανση αυξάνει σημαντικά τον συντελεστή απόδοσης του στροβίλου.



Σχήμα 3.11 Στρόβιλος τριών βαθμίδων με αναθέρμανση

Το σχήμα 3.11 απεικονίζει παραστατικά τύπο ατμοστροβίλου τριών βαθμίδων με αναθέρμανση. Παρουσιάζονται τα σετ βαλβίδων του ατμοστρόβιλου δηλαδή οι κύριες βαλβίδες διακοπής (KBΔ), οι βαλβίδες διακοπής της αναθέρμανσης (BΔA), οι κύριες βαλβίδες ελέγχου (KBE) και οι βαλβίδες ελέγχου της αναθέρμανης (BEA). Οι βαλβίδες διακοπής προορίζονται για την ασφάλεια του στροβίλου και τον θέτουν εκτός λειτουργίας σε περίπτωση υπερπίεσης, ενώ οι βαλβίδες ελέγχου έχουν ως σκοπό να ελέγχουν την ποσότητα του ατμού που εισέρχεται στον στρόβιλο κατά την διάρκεια της ομαλής λειτουργίας. Οι βαλβίδες παρουσιάζουν αρκετά γραμμική συμπεριφορά και τυπική χαρακτηριστική τους φαίνεται στο διάγραμμα 3.12, όπου δίδεται η επιφάνεια ροής της βαλβίδας ως συνάρτηση της θέσης της [33].



Σχήμα 3.12 Τυπική χαρακτηριστική βαλβίδας στροβίλου

Προσομοίωση τυμπάνου ή σωληνώσεων ατμού

Η σχέση (3.11) αποδίδει την εξίσωση συνέχειας του ατμού κατά την ροή του είτε σε τμήμα σωληνώσεων είτε σε τύμπανο (σχήμα 3.13), όπου m η μάζα του ατμού στο τύμπανο, V ο όγκος του τυμπάνου, ρ η πυκνότητα του ατμού και Q(kg/s) η παροχή του ατμού.

Σχήμα 3.13 Τύμπανο ατμού

Θεωρώντας ότι η παροχή του ατμού στην έξοδο είναι ανάλογη της πιέσεως του τυμπάνου, ισχύει η εξίσωση (3.12), όπου P η πίεση του τυμπάνου, P_0 η ονομαστική πίεση και Q_0 η ονομαστική παροχή εξόδου.

$$Q_{out} = \frac{Q_0}{P_0} \cdot P \tag{3.12}$$

Με σταθερή θερμοκρασία στο τύμπανο, ισχύει η σχέση (3.13)

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{dP}{dt} \cdot \frac{\partial\rho}{\partial P}$$
(3.13)

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (3.11, 3.12, 3.13) λαμβάνουμε την εξίσωση (3.14)

$$Q_{in} - Q_{out} = V \frac{\partial \rho}{\partial P} \cdot \frac{dP}{dt} = V \frac{\partial \rho}{\partial P} \cdot \frac{P_0}{Q_0} \cdot \frac{dQ_{out}}{dt} = T_V \cdot \frac{dQ_{out}}{dt}$$
(3.14)

όπου

$$T_V = \frac{P_0}{Q_0} \cdot V \cdot \frac{\partial \rho}{\partial P}$$

Μετασχηματίζοντας κατά Laplace την εξίσωση (3.14), λαμβάνουμε την σχέση (3.15).

$$Q_{in} - Q_{out} = T_V \cdot s \cdot Q_{out} \quad \acute{\eta} \quad \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = \frac{1}{1 + sT_V}$$
(3.15)

Επομένως η εξίσωση (3.15) αποτελεί την συνάρτηση μεταφοράς του τυμπάνου ή οποιουδήποτε τμήματος σωλήνων που μεταφέρει ατμό.

Στους σύγχρονους στροβίλους, η δύναμη που ασκεί ο ατμός καθώς εκτονώνεται πάνω στα πτερύγια και κατά συνέπεια, η ροπή στον άξονα του στροβίλου και η αντίστοιχη ισχύς είναι ανάλογες της παροχής του ατμού (εξ. 3.16). Επομένως, η σχέση (3.15) μετασχηματίζεται στην (3.17), όπου Pout, η ισχύς εξόδου και Pin το σήμα ελέγχου.

$$T_m = K_1 \cdot Q \quad \dot{\eta} \qquad P_m = K_2 \cdot Q \tag{3.16}$$

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{1}{1 + sT_V} \tag{3.17}$$

Πλήρες μοντέλο στροβίλου

Με βάση τα προηγούμενα το πλήρες μοντέλο του στροβίλου ο οποίος απεικονίζεται στο σχήμα 3.11 προκύπτει από την προσομοίωση όλων των επί μέρους στοιχείων του. Τα στοιχεία αυτά είναι η κύρια βαλβίδα ελέγχου (KBE), η βαλβίδα ελέγχου της αναθέρμανσης (BEA), οι σωληνώσεις τροφοδότησης της υψηλής πίεσης, η αναθέρμανση και οι σωληνώσεις τροφοδότησης της χαμηλής πίεσης. Οι βαλβίδες διακοπής δεν προσομοιώνονται καθώς δεν παίζουν ρόλο κατά την διάρκεια της ασφαλούς λειτουργίας του στροβίλου. Τα ποσοστά της συνολικής μηχανικής ισχύος που παράγονται σε κάθε μια από τις τρεις βαθμίδες (high, intermediate, low) συμβολίζονται με F_H, F_L, F_L και το άθροισμά τους ισούται με τη μονάδα. Οι σταθερές χρόνου της τροφοδότησης της υψηλής (chest), της διάταξης αναθέρμανσης (reheat) και της τροφοδότησης της χαμηλής (crossover) συμβολίζονται με T_{CH}, T_{RC}, T_{CO}. Με εφαρμογή της σχέσης (3.17) και λαμβανομένου υπόψη ότι οι βαλβίδες έχουν γραμμικές χαρακτηριστικές (δεν εισάγουν καθυστέρηση), προκύπτει το δομικό διάγραμμα του σχήματος 3.14. Μεταβλητή εισόδου στο μοντέλο είναι η θέση της κύριας βαλβίδας ελέγχου P_{g} , η οποία ελέγχεται από τον ρυθμιστή στροφών (governor) και έξοδος είναι η μηχανική ισχύς εξόδου του στροβίλου Pm.



Σχήμα 3.14 Δομικό διάγραμμα στροβίλου

Τυπικές τιμές των παραμέτρων του μοντέλου του στροβίλου είναι οι ακόλουθες :

 $\begin{array}{lll} T_{CH} = 0.3 \ s & T_{RC} = 7 \ s & T_{CO} = 0.5 \ s \\ F_{H} = 0.3 & F_{I} = 0.3 & F_{L} = 0.4 \end{array}$

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω τιμές, η σταθερά χρόνου της διάταξης αναθέρμανσης T_{RC} είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τις άλλες δύο σταθερές (T_{CH} , T_{CO}) και κατά συνέπεια κυριαρχεί στο τρόπο απόκρισης του στροβίλου. Εάν παραληφθεί η σταθερά των σωληνώσεων τροφοδότησης της χαμηλής πίεσης T_{CO} το μοντέλο απλοποιείται σε εκείνο της εξ. (3.18).

$$\frac{P_m}{P_g} = \frac{F_H}{1 + sT_{CH}} + \frac{1 - F_H}{(1 + sT_{CH})(1 + sT_{RH})} = \frac{1 + sF_H \cdot T_{RH}}{(1 + sT_{CH})(1 + sT_{RH})}$$
(3.18)

Εάν περαιτέρω παραληφθεί και η σταθερά των σωληνώσεων τροφοδότησης της υψηλής πίεσης T_{CH} , το μοντέλο του στροβίλου περιγράφεται πλέον από την εξ. (3.19), η οποία απεικονίζεται από το απλοποιημένο δομικό διάγραμμα του σχήματος 3.15.

$$\frac{P_m}{P_g} = \frac{1 + sF_H \cdot T_{RH}}{1 + sT_{RH}}$$
(3.19)



Σχήμα 3.15 Απλοποιημένο δομικό διάγραμμα στροβίλου με αναθέρμανση

Στη περίπτωση στροβίλου χωρίς αναθέρμανση το μοντέλο απλοποιείται σε εκείνο του σχήματος 3.16, όπου T_t η χρονική σταθερά του στροβίλου.



Σχήμα 3.16 Απλοποιημένο δομικό διάγραμμα στροβίλου χωρίς αναθέρμανση

3.8 Προσομοίωση Ρυθμιστή Στροφών

Ας θεωρηθεί μια μονάδα παραγωγής με σταθερό φορτίο, στο οποίο κάποια χρονική στιγμή συμβαίνει μια απότομη (βηματική) αύξηση. Η αύξηση αυτή θα προκαλέσει πτώση της συχνότητας, η οποία λόγω της αυτορρύθμισης του φορτίου D θα οδηγήσει σε αντίστοιχη μείωση του φορτίου. Εάν δεν υπήρχε μηχανισμός ελέγχου της παραγωγής της μονάδας, τότε η συχνότητα θα έπεφτε σε απαράδεκτα χαμηλά επίπεδα μέχρι το φορτίο να επανέλθει στα αρχικά επίπεδα.

Ο ρόλος του ρυθμιστή στροφών της μονάδας είναι να παρακολουθεί την συχνότητα και να επιδρά κατάλληλα στις βαλβίδες ελέγχου του ατμού που εισέρχεται στο στρόβιλο ώστε η συχνότητα να διατηρείται κοντά στην ονομαστική της τιμή. Οι ρυθμιστές στροφών έχουν εξελιχθεί με την πάροδο των χρόνων. Οι πρώτοι ρυθμιστές ήταν μηχανο-υδραυλικοί, οι οποίοι μετεξελίχθηκαν σταδιακά σε ηλεκτρο-υδραυλικούς και ψηφιακούς ηλεκτρο-υδραυλικούς.

Η λειτουργία του ρυθμιστή στροφών στηρίζεται στην αρχή λειτουργίας του φυγοκεντρικού ρυθμιστή Watt. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.17, ο ρυθμιστής Watt παρακολουθεί την ταχύτητα του άξονα της μηχανής. Κάθε μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας των περιστρεφόμενων σφαιρών του φυγοκεντρικού ρυθμιστή ή της συχνότητας Δf αντίστοιχα μετατρέπεται σε γραμμική μετατόπιση, η οποία μεταφέρεται και ενισχύεται με την βοήθεια συστήματος μοχλών. Επειδή για την μετακίνηση των δικλείδων των βαλβίδων ατμού ή των υδατοθυρίδων των υδροστροβίλων απαιτούνται μεγάλες δυνάμεις, για τον λόγο αυτό παρεμβάλλονται υδραυλικοί μηχανισμοί ενίσχυσης του τελικού σήματος ελέγχου ΔP_g . Το σχήμα 3.18 παρουσιάζει το λειτουργικό διάγραμμα του ρυθμιστή στροφών [41].





Σχήμα 3.18 Λειτουργικό διάγραμμα ρυθμιστή στροφών

Ο απλούστερος τύπος ρυθμιστή θα ήταν ο ισόχρονος ρυθμιστής, δηλαδή εκείνος που θα ρύθμιζε την βαλβίδα ατμού έτσι ώστε το τελικό σφάλμα ταχύτητας ή συχνότητας να ήταν πάντα μηδενικό. Για να επιτευχθεί αυτό θα χρειαζόταν ανάδραση του ολοκληρώματος του σφάλματος. Το σχήμα 3.19 παρουσιάζει το δομικό διάγραμμα ισόχρονου ρυθμιστή, όπου ΔP_g είναι το σήμα εξόδου του ρυθμιστή προς την βαλβίδα ελέγχου του ατμού και ΔF η απόκλιση συχνότητας από την ονομαστική της τιμή στο πεδίο της μιγαδικής συχνότητας s.



Σχήμα 3.19 Ισόχρονος ρυθμιστής στροφών

Ο ισόχρονος ρυθμιστής δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν περισσότερες από μια μονάδες λειτουργούν παράλληλα. Όπως θα εξηγηθεί παρακάτω, στην περίπτωση αυτή κάθε μονάδα θα προσπαθούσε να επιβάλει την δική της συχνότητα, γεγονός που θα προκαλούσε ταλαντώσεις αποσυγχρονισμού.

Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ρυθμιστές με στατισμό. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.20 ο τύπος αυτός ρυθμιστή έχει δύο εισόδους, το σφάλμα συχνότητας ΔF και την απόκλιση ΔP_R από το επιθυμητό σημείο λειτουργίας P_R (ή φορτίο αναφοράς). Η δεύτερη είσοδος ορίζει το φορτίο της μονάδας, στο οποίο η συχνότητα πρέπει να ισούται με την ονομαστική. Για όλες τις άλλες τιμές φορτίου η μονάδα θα παρουσιάζει κάποιο σφάλμα συχνότητας. Με σταθερό το επιθυμητό σημείο λειτουργίας (ΔP_R=0), μια βηματική αύξηση του φορτίου ΔP(pu) οδηγεί σε μόνιμο σφάλμα συχνότητας Δf(pu), που δίδεται από την σχέση (3.20), όπου R ο στατισμός της μονάδας. Το μεταβατικό φαινόμενο καθορίζεται από την χρονική σταθερά του ρυθμιστή T_g. Όπως φαίνεται στα σχήματα 3.17 και 3.18, το σφάλμα συχνότητας Δf ανιχνεύεται από την θέση του μηχανισμού αλλαγής στροφών.

$$\Delta f(pu) = -R \cdot \Delta P(pu) \tag{3.20}$$



Σχήμα 3.20 Ρυθμιστής στροφών με στατισμό

Η τιμή του στατισμού R προσδιορίζεται από τα μήκη των βραχιόνων (1, 2, 3, 4) του συστήματος μοχλών του ρυθμιστή που απεικονίζεται στο σχήμα 3.17. Η σχέση (3.20) μετασχηματίζεται ισοδύναμα στην (3.21). Όπως προκύπτει από την σχέση αυτή, ο στατισμός της μονάδας εκφράζει πρακτικά την επί % μείωση της συχνότητας όταν το φορτίο αυξηθεί από μηδέν στο ονομαστικό, διατηρώντας σταθερό το φορτίο αναφοράς.

$$R = -\frac{\Delta f(pu)}{\Delta P(pu)} = \frac{\frac{f_f - f_z}{f_N}}{\frac{P_N - 0}{P_N}}$$
(3.21)

3.9 Χαρακτηριστική Φορτίου – Συχνότητας

Με σταθερό τον μηχανισμό αλλαγής στροφών του ρυθμιστή (φορτίο αναφοράς σταθερό), η συνάρτηση φορτίου-συχνότητας είναι συνήθως μια ευθεία γραμμή, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.21. Η ευθεία αυτή ονομάζεται χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας της μονάδας [36, 38, 41]. Η κλίση της ευθείας παρουσιάζει σημαντικό ενδιαφέρον και αποτελεί τον στατισμό της μονάδας. Αναλυτικά, ο στατισμός ορίζεται από την σχέση (3.21) και συνήθως εκφράζεται επί %.

Έστω ότι η μονάδα του σχήματος 3.21 λειτουργεί στο σημείο 1 της χαρακτηριστικής της και τροφοδοτεί μόνη της ένα φορτίο P_1 με συχνότητα f_1 . Εάν το φορτίο αυξηθεί κατά ΔP, το νέο σημείο λειτουργίας 2 θα έχει συντεταγμένες ($P_2=P_1+\Delta P$, f_2). Όπως φαίνεται από το σχήμα 3.21, λόγω της αρνητικής κλίσης της χαρακτηριστικής (στατισμού), η νέα συχνότητα λειτουργίας θα είναι χαμηλότερη υπό την προϋπόθεση ότι δεν έχει αλλάξει η θέση φορτίου αναφοράς του ρυθμιστή στροφών της μονάδας.

Η κλίση της χαρακτηριστικής δεν είναι ποτέ μηδενική, γεγονός που σημαίνει ότι μετά την λειτουργία της πρωτεύουσας ρύθμισης παραμένει πάντα ένα μόνιμο σφάλμα συχνότητας Δf, το οποίο θα κληθεί να διορθώσει η δευτερεύουσα ρύθμιση.



Σχήμα 3.21 Χαρακτηριστική φορτίου – συχνότητας μονάδας παραγωγής

Η χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας μιας μονάδας δεν είναι σταθερή αλλά ρυθμιζόμενη. Μέσω του μηχανισμού αλλαγής στροφών (σχήμα 3.17), η ευθεία αυτή μετατοπίζεται παράλληλα προς τα πάνω ή κάτω. Στο σχήμα 3.22 η αρχική χαρακτηριστική a-a, κατόπιν εντολής μείωσης των στροφών της μονάδας, μετατοπίστηκε χαμηλότερα στην νέα θέση b-b με αποτέλεσμα η μονάδα από το σημείο λειτουργίας 2 να βρεθεί στο σημείο 3, το οποίο αντιστοιχεί σε χαμηλότερη συχνότητα f₃. Αντίθετα μια αύξηση του μηχανισμού στροφών μετατοπίζει την χαρακτηριστική στη θέση c-c και οδηγεί τη μονάδα στο σημείο λειτουργίας 4. Επομένως, η μονάδα μέσω του μηχανισμού αλλαγής στροφών είναι εφοδιασμένη με δέσμη παράλληλων χαρακτηριστικών, οι οποίες παρέχουν την δυνατότητα λειτουργίας της σε μία ευρεία περιοχή σημείων φόρτισης - συχνότητας.



Σχήμα 3.22 Μετατόπιση χαρακτηριστικής της μονάδας

Στη πραγματικότητα η χαρακτηριστική δεν είναι ευθεία γραμμή σε όλη την περιοχή λειτουργίας της μονάδας αλλά καμπύλη ή τεθλασμένη γραμμή ανάλογα με την απόκριση των δικλείδων και θυρίδων του στροβίλου. Για τον λόγο αυτό γίνεται διάκριση ανάμεσα στον μόνιμο στατισμό που εκφράζει ολόκληρη την περιοχή λειτουργίας της μονάδας και στο διαφορικό στατισμό που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας. Σε αντιδιαστολή με την εξ. (3.21), η σχέση (3.22) δίδει τον διαφορικό στατισμό της μονάδας, δηλαδή τον στατισμό σε συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας.

$$R = -\frac{df / f_N}{dP / P_N}$$
(3.22)

3.10 Προσομοίωση Ολόκληρης Μονάδας με το Φορτίο της

Μετά την προσομοίωση των επιμέρους στοιχείων μιας μονάδας παραγωγής είναι εύκολο να προχωρήσουμε στη σύνθεση του μοντέλου ολόκληρης της μονάδας. Το δομικό διάγραμμα του σχήματος 3.23 αποτελεί το μοντέλο προσομοίωσης μιας ατμοηλεκτρικής μονάδας χωρίς αναθέρμανση μαζί με το φορτίο που τροφοδοτεί. Το μοντέλο αυτό είναι ακριβές για μικρές μεταβολές γύρω από το αρχικό σημείο λειτουργίας. Το μοντέλο έχει δύο εισόδους την μεταβολή του φορτίου P_L και την μεταβολή του φορτίου αναφοράς P_R του ρυθμιστή.



Σχήμα 3.23 Δομικό διάγραμμα απόκρισης συχνότητας θερμικής μονάδας παραγωγής

3.11 Παράλληλη Λειτουργία Μονάδων

Η παράλληλη λειτουργία δύο μονάδων που θα εξυπηρετήσουν κοινό φορτίο απαιτεί να υπάρχουν κατάλληλες συνθήκες την στιγμή του παραλληλισμού, οι οποίες διατηρούνται και στη συνέχεια μετά τον συγχρονισμό. Οι συνθήκες αυτές επιβάλλουν ταύτιση των ακόλουθων μεγεθών των δύο μονάδων:

- συχνότητα
- μέτρο τάσης
- διαδοχή φάσεων
- φασική γωνία τάσης

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.24, οι δύο παραλληλισμένες μονάδες Α και Β μοιράζονται κοινό φορτίο με τρόπο που καθορίζεται από τις χαρακτηριστικές τους

[36,38]. Έστω ότι οι δύο μονάδες λειτουργούν αρχικά στη συχνότητα f_1 και μοιράζονται κοινό φορτίο έτσι ώστε η μονάδα A να παραλαμβάνει φορτίο P_{1A} και η μονάδα B φορτίο P_{1B} . Μια αύξηση του συνολικού φορτίου κατά ΔP θα έχει ως αποτέλεσμα την πτώση της κοινής συχνότητας από f_1 σε f_2 . Τα νέα σημεία λειτουργίας των μονάδων 2A και 2B είναι τέτοια ώστε η αύξηση της φόρτισης των δύο μονάδων κατά ΔP_A και ΔP_B να ικανοποιεί την σχέση $\Delta P_A + \Delta P_B = \Delta P$. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.11.1, η μονάδα B με την μικρότερη κλίση, άρα το μικρότερο στατισμό, παραλαμβάνει το μεγαλύτερο μερίδιο της αύξησης του φορτίου ($\Delta P_B > \Delta P_A$).

Η νέα κατανομή του φορτίου P_{2A} , P_{2B} , η οποία έγινε στα πλαίσια της πρωτεύουσας ρύθμισης είχε ως αποτέλεσμα την μείωση της συχνότητας λειτουργίας. Μεταβάλλοντας την θέση του μηχανισμού στροφών μιας τουλάχιστον μονάδας μετατοπίζουμε παράλληλα την χαρακτηριστική της, γεγονός που παρέχει την δυνατότητα ανακατανομής του φορτίου P_L ανάμεσα στις δύο μονάδες. Στο σχήμα 3.25 η χαρακτηριστική της μονάδας Β έχει μετατοπιστεί προς τα πάνω έτσι ώστε η συχνότητα να επανέλθει στην αρχική της τιμή f_1 και η μονάδα Β να παραλάβει τη συνολική αύξηση του φορτίου ΔΡ. Η μονάδα Α επανέρχεται στο αρχικό σημείο λειτουργίας 3B.

Από το σχήμα 3.24 είναι προφανές ότι, αν δύο μονάδες που εξυπηρετούν κοινό φορτίο είχαν μηδενικό στατισμό, οι χαρακτηριστικές τους θα έπρεπε να συμπίπτουν προκειμένου να λειτουργήσουν παραλληλισμένες, δηλαδή σε κοινή συχνότητα. Όμως, στην περίπτωση αυτή κάθε σημείο της χαρακτηριστικής της μιας μονάδας θα μπορούσε να συνδυαστεί με κατάλληλο σημείο της άλλης και να αποτελέσει σημείο λειτουργίας του συστήματος. Στη πράξη, αυτό σημαίνει ότι, η μία μονάδα θα ανταγωνιζόταν την άλλη, γεγονός που θα οδηγούσε σε ασταθή κατάσταση.

Αυτός είναι ο λόγος που δεν υιοθετούνται μηδενικοί στατισμοί αλλά στατισμοί της τάξης του 4 - 6 %, παρά το γεγονός ότι μηδενικός στατισμός θα εξασφάλιζε μηδενικό σφάλμα συχνότητας. Όμως, είναι δυνατόν μια μόνο μονάδα του συστήματος (η ρυθμίζουσα) να έχει πολύ μικρό στατισμό, γεγονός που θα έχει ως αποτέλεσμα η μονάδα αυτή να παραλαμβάνει κατά την φάση της πρωτεύουσας ρύθμισης το μεγαλύτερο μέρος της απολεσθείσας παραγωγής και να οδηγεί σε πολύ μικρά σφάλματα συχνότητας.





Σχήμα 3.25 Ανακατανομή της φόρτισης των μονάδων Α και Β

Στην ανάλυση του ελέγχου φορτίου-συχνότητας ενδιαφέρει η συνολική αντίδραση όλων των μονάδων παραγωγής και όχι η αντίδραση της κάθε μιας χωριστά. Οι ταλαντώσεις ισχύος μεταξύ των μονάδων και η συμβολή του συστήματος Μεταφοράς δεν αποτελούν επί του παρόντος αντικείμενο μελέτης. Εκείνο που ενδιαφέρει είναι η συμπεριφορά και αντίδραση όλων των μονάδων από κοινού προκειμένου να αντιμετωπίσουν καταστάσεις έλλειψης ή περίσσειας παραγωγής. Κατά συνέπεια, ολόκληρη η παραγωγή εξετάζεται ως μια ισοδύναμη μονάδα.

Στο σχήμα 3.26 παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα δύο μονάδων παραγωγής που λειτουργούν παράλληλα, όπου D είναι ο συντελεστής απόσβεσης ολοκλήρου του φορτίου, H είναι η σταθερά αδράνειας των δύο στροβιλογεννητριών και K_p=1/D, T_p=2H/D. Θεωρώντας ότι οι ρυθμιστές στροφών βρίσκονται σε σταθερή θέση, ισχύει ότι ΔP_{R1} =0 και ΔP_{R2} =0. Εάν γράψουμε την συνάρτηση μεταφοράς ολοκλήρου του συστήματος με είσοδο ΔP_L , έξοδο Δf και εφαρμόσουμε το θεώρημα της τελική τιμής λαμβάνουμε :

$$\Delta f = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D} \cdot \Delta P_L \tag{3.23}$$

Με σύγκριση των εξ. (3.23 – 3.21) προκύπτει η (3.24), όπου R ο στατισμός της ισοδύναμης μονάδας [38]. Επομένως, οι δύο παράλληλες μονάδες συμπεριφέρονται ως μία ισοδύναμη της οποίας ο στατισμός R εκφράζεται από την σχέση (3.24).

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \tag{3.24}$$



Σχήμα 3.26 Δομικό διάγραμμα συστήματος δύο μονάδων παραγωγής

3.12 Ρυθμίζουσα Ενέργεια ή Χαρακτηριστική Συστήματος

Ας θεωρήσουμε ένα αυτόνομο ηλεκτρικό σύστημα στο οποίο συμβαίνει μια αιφνίδια μεταβολή του φορτίου κατά ΔP_L (MW). Κάθε μονάδα του συστήματος θα αντιδράσει σύμφωνα με το στατισμό της και θα μεταβάλει την παραγωγή της κατά ΔP_i MW. Η εξίσωση του στατισμού διατυπωμένη για την i μονάδα στη μορφή της εξ. (3.25) υπολογίζει την μεταβολή της παραγωγής της ΔP_i (MW) για μόνιμο σφάλμα συχνότητας Δf (pu), όπου $P_{N,i}$ η ονομαστική ικανότητα της μονάδας i. Ως γνωστόν, η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται στα πλαίσια της πρωτεύουσας ρύθμισης.

$$\Delta P_i(MW) = \frac{P_{N,i}}{R_i} \cdot \Delta f(pu)$$
(3.25)

Εάν αμεληθεί η αυτορρύθμιση φορτίου, η μεταβολή του φορτίου ΔP_L (MW) πρέπει να εξισορροπηθεί από τις μεταβολές της παραγωγής όλων των μονάδων ΔP_i (MW), άρα ισχύει η σχέση (3.26).

$$\Delta P_L(MW) = -\sum_i \frac{P_{N,i}}{R_i} \cdot \Delta f(pu)$$
(3.26)

Η εξ. (3.26) γράφεται ισοδύναμα ως την (3.27), από την οποία ορίζεται η ρυθμίζουσα ενέργεια C, ως η σταθερά αναλογίας μεταξύ της μεταβολής του φορτίου ΔP_L και του

παραμένοντος σφάλματος συχνότητας Δf [37]. Η ρυθμίζουσα ενέργεια C ή χαρακτηριστική του συστήματος, όπως επίσης ονομάζεται, ορίζεται αναλυτικά από την εξ. (3.28) και κατά συνέπεια, η εξ. (3.27) μετατρέπεται στην (3.29).

$$\Delta P_L(MW) = -\sum_i \frac{P_{N,i}}{f_0 R_i} \cdot \Delta f(Hz)$$
(3.27)

$$C = \frac{1}{f_0} \cdot \sum_i \frac{P_{N,i}}{R_i} \tag{3.28}$$

$$\Delta P_L(MW) = -C \cdot \Delta f(Hz) \tag{3.29}$$

Εάν δεν αγνοηθεί η αυτορρύθμιση φορτίου τότε πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η μεταβολή της συχνότητας Δf προκαλεί αντίστοιχη μεταβολή του φορτίου ΔP_L^* , σύμφωνα με την σχέση (3.30). Επομένως, η μεταβολή ΔP_L^* , λόγω αυτορρύθμισης φορτίου, πρέπει να συνυπολογιστεί προστιθέμενη στην αρχική μεταβολή του φορτίου ΔP_L και άρα, η εξ. (3.27) μετατρέπεται στην (3.31).

$$\Delta P_L^* = D \cdot \Delta f \tag{3.30}$$

$$\Delta P_L + \Delta P_L^* = \Delta P_L + D \cdot \Delta f = -\sum_i \frac{P_{N,i}}{f_0 R_i} \cdot \Delta f(Hz)$$
(3.31)

Συνδυάζοντας την εξ. (3.31) με την (3.29), η οποία εξακολουθεί να ισχύει προκύπτει η εξ. (3.32).

$$C = D + \frac{1}{f_0} \cdot \sum_{i} \frac{P_{N,i}}{R_i}$$
(3.32)

Επομένως, εξ ορισμού, η χαρακτηριστική του συστήματος C είναι η σταθερά αναλογίας που συνδέει το παραμένον σφάλμα συχνότητας Δf (Hz) με την μεταβολή φορτίου ΔP_L (MW) που το προκάλεσε. Γνωρίζοντας την χαρακτηριστική C και το παραμένον σφάλμα Δf , είναι εύκολο να υπολογιστεί η μεταβολή του φορτίου ΔP_L . Η μεταβολή αυτή του φορτίου αναπροσαρμοσμένη κατά την αυτορρύθμιση του φορτίου μοιράζεται στις μονάδες κατά ποσότητες αντιστρόφως ανάλογες του στατισμού τους. Στην συνέχεια, μέσω της δευτερεύουσας ρύθμισης, η οποία μεταβάλει τις χαρακτηριστικές των ρυθμιζουσών μονάδων, η μεταβολή φορτίου ΔP_L ανακατανέμεται με τρόπο ώστε να αναληφθεί τελικά από τις ρυθμίζουσες μονάδες του συστήματος.

3.13 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε βήμα προς βήμα η ανάπτυξη του μοντέλου δυναμικής απόκρισης της συχνότητας ενός ηλεκτρικού συστήματος που απαρτίζεται

από μία μόνο μονάδα παραγωγής η οποία τροφοδοτεί το φορτίο της. Το μοντέλο αυτό υπολογίζει την μεταβολή της συχνότητας τα πρώτα κρίσιμα δευτερόλεπτα μετά από διαταραχή του ισοζυγίου ισχύος η οποία μπορεί να οφείλεται σε ξαφνική απώλεια είτε μέρους της παραγωγής είτε μέρους της ζήτησης φορτίου.

Το μοντέλο αυτό, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί ως βασικό εργαλείο της περαιτέρω έρευνας, οικοδομείται ως άθροισμα των μοντέλων των επί μέρους στοιχείων του συστήματος. Έγινε, δηλαδή, προσομοίωση της γεννήτριας, του στροβίλου, του φορτίου καθώς και του ρυθμιστή στροφών της μονάδας παραγωγής. Κάθε ένα από τα δομικά αυτά στοιχεία του συστήματος επηρεάζει με τα χαρακτηριστικά του την δυναμική απόκριση συχνότητας. Όμως, ο ρόλος του ρυθμιστή στροφών είναι ο πιο σημαντικός δεδομένου ότι αυτός καθορίζει την τελική τιμή στην οποία θα ισορροπήσει η συχνότητα μετά το σύντομο μεταβατικό στάδιο. Αποδείχθηκε ότι, το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί με κάποια προσέγγιση για σύστημα με περισσότερες από μια ομοειδείς μονάδες, θεωρώντας την ισοδύναμη μονάδα της οποίας το αντίστροφο του στατισμού ισούται με το άθροισα των αντίστροφων στατισμών των επί μέρους μονάδων.

Παρουσιάστηκαν, επίσης, οι επιπτώσεις που έχουν οι απότομες μεταβολές της συχνότητας (βυθίσεις ή εξάρσεις), οι οποίες δημιουργούνται από τις διαταραχές του ισοζυγίου ισχύος, στην ομαλή λειτουργία της γεννήτριας και του στροβίλου. Οι επιπτώσεις αυτές είναι πολύ σοβαρές και μπορεί να οδηγήσουν σε ενεργοποίηση κάποιας προστασίας των μονάδων παραγωγής με συνέπεια την απώλεια επιπρόσθετης παραγωγής. Αν αυτό συμβεί, θα επιδεινωθεί η ήδη κρίσιμη κατάσταση και η ασφάλεια του συστήματος θα τεθεί σε κίνδυνο. Για τα απομονωμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, το πρόβλημα είναι ακόμη μεγαλύτερο λόγω του μικρότερου αριθμού μονάδων παραγωγής και της έλλειψης στήριξης από γειτονικά δίκτυα.

Η μελέτη των φαινομένων που σχετίζονται με τις σοβαρές αποκλίσεις της συχνότητας από την ονομαστική της τιμή και τους κινδύνους στους οποίους υπεισέρχεται το σύστημα, αποτελεί χωριστή κατηγορία της ευστάθειας λειτουργίας, η οποία ονομάζεται ευστάθεια συχνότητας. Η κατηγορία αυτή διακρίνεται για λόγους μελέτης από τις άλλες δύο, δηλαδή, την ευστάθεια γωνίας και την ευστάθεια τάσης αν και η ευστάθεια του συστήματος είναι ενιαία και είναι δυνατόν σε μια διαταραχή να προκύψουν φαινόμενα που αφορούν και στις τρεις κατηγορίες.

Η ευστάθεια συχνότητας και οι συναφείς κίνδυνοι έχουν πολύ μεγαλύτερη πιθανότητα εκδήλωσης στα απομονωμένα συστήματα σε σχέση με τα διασυνδεδεμένα και αποτελούν την συνηθέστερη αιτία των γενικών διακοπών τους. Αυτό συμβαίνει επειδή κάθε απώλεια μονάδας παραγωγής στα συστήματα αυτά οδηγεί σε ισχυρότερη βύθιση συχνότητας. Απεναντίας, οι μικρές ηλεκτρικές αποστάσεις τόσο μεταξύ των μονάδων παραγωγής όσο και μεταξύ των μονάδων με τους ζυγούς των φορτίων, μειώνουν τις πιθανότητες εκδήλωσης φαινομένων απώλειας της ευστάθειας λόγω γωνίας ρότορα ή τάσης στα απομονωμένα συστήματα.

Kepálaio 4

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ MONTE-CARLO ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΡΥΘΜΙΣΕΩΝ ΤΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΗΣ ΕΦΕΔΡΕΙΑΣ

Την θεωρία του βίου τέλος είναι και από ταύτης ελευθερίαν (Σκοπός του βίου είναι η γνώση και η ελευθερία που πηγάζει από αυτήν) Αναζαγόρας

4.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναπτύχθηκε αναλυτικά το μοντέλο προσομοίωσης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις διαταραχές του ισοζυγίου παραγωγήςζήτησης. Στην ανάλυση αυτή αναδείχτηκαν οι παράγοντες που παίζουν σημαντικό ρόλο στην ικανότητα του συστήματος να υπερβαίνει την επικίνδυνη μεταβατική κατάσταση και να επανέρχεται σε κατάσταση ισορροπίας. Εν τούτοις, ο κίνδυνος να οδηγηθεί ένα σύστημα σε κατάρρευση μετά από διαταραχή του ισοζυγίου ισχύος είναι πάντοτε υπαρκτός. Ο κίνδυνος αυτός είναι ακόμη μεγαλύτερος στα μικρά αυτόνομα συστήματα, όπου οι εφεδρείες είναι λιγότερες, όπου δεν υπάρχει ενίσχυση από γειτονικά συστήματα και όπου κάθε απώλεια μονάδας, συνήθως, αντιπροσωπεύει σημαντικό ποσοστό της συνολικής παραγωγής.

Για τους παραπάνω λόγους, επιστρατεύεται ένας επιπρόσθετος μηχανισμός, η προστασία αποκοπής φορτίου ή προστασία υποσυχνότητας, η οποία έχει στόχο να διασώσει το σύστημα θυσιάζοντας μέρος από το φορτίο του. Όταν η αποκατάσταση της συχνότητας στα ονομαστικά επίπεδα καθυστερεί και το σύστημα παραμένει σε κίνδυνο δίδεται εντολή για αποκοπή μέρους του φορτίου ώστε το σύστημα να ανακουφιστεί και να διευκολυνθεί η επαναφορά του σε ασφαλή λειτουργία. Η προστασία αυτή ανήκει στην κατηγορία των ειδικών προστασία κάποιου μεμονωμένου στοιχείου ή μηχανήματος αλλά ολοκλήρου του συστήματος [9, 42]. Ο ρόλος της είναι, ασφαλώς, κρίσιμος στα αυτόνομα συστήματα, όμως είναι επίσης σημαντικός στα διασυνδεδεμένα συστήματα όταν οι γραμμές διασύνδεσης τίθενται εκτός λειτουργίας και το ισοζύγιο παραγωγής-ζήτησης διαταράσσεται.

Η προστασία υποσυχνότητας αποτελεί την τελευταία γραμμή άμυνας του συστήματος και η λειτουργία της έχει συνέπειες στους πελάτες. Για τον λόγο αυτό δεν πρέπει να ενεργοποιείται παρά μόνο όταν είναι απολύτως αναγκαία. Μέχρι σήμερα δεν υπάρχει μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδος για τον σχεδιασμό της προστασίας αυτής και την ρύθμιση των Η/Ν υποσυχνότητας. Οι διάφοροι Διαχειριστές συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας υιοθετούν διαφορετικές προσεγγίσεις στο θέμα σύμφωνα με την εμπειρία τους, την στιβαρότητα των αντίστοιχων συστημάτων και τα αποδεκτά επίπεδα διακοπών πελατών.

Ως γνωστόν, στρεφόμενη εφεδρεία είναι η διαθέσιμη ισχύς των μονάδων παραγωγής, οι οποίες λειτουργούν κάτω από την ονομαστική τους φόρτιση και η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί σε ελάχιστο χρόνο, εάν ζητηθεί. Σε όλα τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας τηρείται ένα ελάχιστο επίπεδο στρεφόμενης εφεδρείας, η οποία κρίνεται απαραίτητη για λόγους ασφάλειας, αξιοπιστίας και ποιότητας ισχύος [43]. Αξίζει να σημειωθεί ότι, η απαίτηση για τήρηση στρεφόμενης εφεδρείας οδηγεί σε σημαντική αύξηση του κόστους λειτουργίας.

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται μια νέα μέθοδος που στηρίζεται στην προσομοίωση Monte-Carlo για την πιθανοτική ανάλυση της λειτουργίας και του ελέγχου παραγωγής του συστήματος. Η μέθοδος αυτή χρησιμεύει για την επιλογή των ρυθμίσεων της προστασίας υποσυχνότητας και του αποδεκτού επιπέδου στρεφόμενης εφεδρείας. Παράγονται χρήσιμοι δείκτες και ιστογράμματα που βοηθούν στην υιοθέτηση της επιθυμητής στρατηγικής σε σχέση με τα ζητήματα αυτά. Τέλος, η μέθοδος εφαρμόζεται σε ένα τυπικό αυτόνομο σύστημα με χαρακτηριστικά όμοια με εκείνα του συστήματος Κρήτης και τα αποτελέσματα σχολιάζονται και εξάγονται συμπεράσματα.

4.2 Αλγόριθμος Υπολογισμού Απόκρισης Συχνότητας

Η απόκριση συχνότητας ενός αυτόνομου συστήματος, το οποίο περιλαμβάνει θερμικές μονάδες παραγωγής χωρίς αναθέρμανση αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 2 και περιγράφεται με πολύ καλή προσέγγιση από το γραμμικό μοντέλο του σχήματος 4.1. Η υπόθεση ότι το σύστημα αποτελείται μόνο από θερμικές μονάδες έχει ληφθεί για λόγους απλότητας και δεν μειώνει την γενικότητα της μεθοδολογίας που αναπτύσσεται στη συνέχεια. Το υπόψη μοντέλο προσομοιώνει την δυναμική απόκριση της συχνότητας κατά τα πρώτα κρίσιμα δευτερόλεπτα μετά την διαταραχή. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1, η συμπεριφορά του συστήματος εξαρτάται από ορισμένους παράγοντες, δηλαδή τον στατισμό R, την σταθερά αδράνειας H και τις χρονικές σταθερές T_g , T_t της ισοδύναμης μονάδας καθώς και τον συντελεστή απόσβεσης του φορτίου D. Οι σταθερές K_p και T_p ορίζονται ως: $K_p=1/D$ και $T_p=2H/D$.



Σχήμα 4.1 Δομικό διάγραμμα απόκρισης συχνότητας αυτόνομου συστήματος

Στο σχήμα 4.1, P_R είναι το φορτίο αναφοράς του ρυθμιστή, P_g η έξοδος του ρυθμιστή, P_m η μηχανική ισχύς εξόδου του ισοδύναμου στροβίλου, P_L το φορτίο του συστήματος και $\Delta F(s)$ η απόκλιση της συχνότητας από την ονομαστική της τιμή στο πεδίο της συχνότητας s. Το δομικό διάγραμμα του σχήματος 4.1 μεταφράζεται στις εξισώσεις Laplace (4.1 - 4.3). Οι εξισώσεις αυτές μετασχηματίζονται περαιτέρω στις διαφορικές εξισώσεις (4.4 - 4.6), όπου f η συχνότητα στο πεδίο του χρόνου. Όταν το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία, τα μεγέθη P_R , P_g , P_m , P_L θεωρούνται σταθερά (στην πραγματικότητα αλλάζουν πολύ αργά μέσω της δευτερεύουσας ρύθμισης) και κατά συνέπεια, η συχνότητα διατηρείται αμετάβλητη ($\Delta f=0$). Αντιθέτως, μια αιφνίδια (βηματική) μεταβολή της παραγωγής P_m ή του φορτίου P_L αλλάζει όλα τα παραπάνω μεγέθη, γεγονός που έχει ως συνέπεια την μεταβολή της συχνότητας ($\Delta f \neq 0$).

$$(P_m - P_L) \cdot \frac{K_p}{1 + sT_p} = \Delta F \tag{4.1}$$

$$P_g \cdot \frac{1}{1+sT_t} = P_m \tag{4.2}$$

$$(P_R - \Delta F \cdot \frac{1}{R}) \cdot \frac{1}{1 + sT_g} = P_g \tag{4.3}$$

$$T_{p} \cdot \frac{d}{dt} \Delta f + \Delta f = K_{p} \cdot (P_{m} - P_{L})$$
(4.4)

$$T_t \cdot \frac{d}{dt} P_m + P_m = P_g \tag{4.5}$$

$$T_g \cdot \frac{d}{dt} P_g + P_g = -\frac{1}{R} \cdot \Delta f + P_R \tag{4.6}$$

Η αναλυτική επίλυση των εξισώσεων (4.4 - 4.6) είναι αρκετά πολύπλοκη και συνήθως στη βιβλιογραφία λαμβάνονται ορισμένες απλοποιήσεις. Οι χρονικές σταθερές T_g και T_t παραλείπονται καθώς είναι μικρές (περίπου 1s) συγκρινόμενες με την χρονική σταθερά K_p (περίπου 10s). Από την αναλυτική επίλυση των εξισώσεων αυτών προκύπτει η καμπύλη απόκρισης της συχνότητας ως προς τον χρόνο. Επίσης, υπολογίζεται η τελική τιμή της συχνότητας (εναπομένουσα συχνότητα) καθώς και η αρχική κλίση της καμπύλης απόκρισης, οι οποίες εκφράζονται από τις εξισώσεις (4.7, 4.8). Όπως φαίνεται από την εξίσωση (4.7), η εναπομένουσα συχνότητα εξαρτάται από τον στατισμό R, την απόσβεση του φορτίου D και, ασφαλώς, την βηματική

μεταβολή του φορτίου ή της παραγωγής P_{STEP} . Η αρχική κλίση της καμπύλης απόκρισης της συχνότητας εξαρτάται μόνο από την σταθερά αδράνειας Η και την βηματική μεταβολή P_{STEP} (εξ. 4.8).

$$\lim_{t \to \infty} \Delta f(t) = \frac{R \cdot P_{STEP}}{D \cdot R + 1}$$
(4.7)

$$\frac{d\Delta f(t)}{dt}\bigg|_{t=0} = \frac{P_{STEP}}{2 \cdot H}$$
(4.8)

Η παράλειψη των χρονικών σταθερών Tg και Tt κατά την αναλυτική επίλυση οδηγεί, ασφαλώς, σε απλοποίηση του μοντέλου. Πέραν τούτου, η αποκοπή φορτίου σε διάφορα στάδια και συνθήκες ανάλογα με τις ρυθμίσεις των Η/Ν υποσυχνότητας καθιστά το μοντέλο αρκετά πολύπλοκο για να επιλυθεί με αναλυτικό τρόπο. Για τον λόγο αυτό η επίλυση του μοντέλου γίνεται την αριθμητική μέθοδο Euler [44, 45]. Οι διαφορικές εξισώσεις (4.4 - 4.6) μετασχηματίζονται στις αντίστοιχες εξισώσεις διαφορών (4.9 – 4.11), όπου ΔΤ είναι το χρονικό βήμα της αριθμητικής μεθόδου. Η μέθοδος Euler είναι μια απλή αριθμητική μέθοδος, εσωτερικά ασταθής, οποία δίδει μικρό σφάλμα σε μικρό αριθμό επαναλήψεων. Η μέθοδος επιλέγηκε επειδή ως ασταθής μπορεί να αποκαλύψει τυχόν αστάθεια του συστήματος δεδομένου ότι δεν εισάγει απόσβεσης όπως άλλες αριθμητικές μέθοδοι. Για την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων (4.9 – 4.11) έχει αναπτυχθεί κατάλληλος αλγόριθμος και το αντίστοιχο πρόγραμμα έχει γραφεί σε γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic [46-48]. Ο αλγόριθμος αυτός λαμβάνει υπόψη του τόσο τις χρονικές σταθερές όσο και την λειτουργία των Η/Ν υποσυχνότητας, οι οποίοι προκαλούν μεταβολές του φορτίου κατά την διάρκεια του μεταβατικού φαινομένου.

$$\Delta f(k) = \frac{\Delta f(k-1) \cdot (T_p - \Delta T) + K_p \cdot \Delta T \cdot (P_m(k-1) - P_L)}{T_p}$$
(4.9)

$$P_m(k) = \frac{\Delta T \cdot P_g(k) + T_t \cdot P_m(k-1)}{T_t + \Delta T}$$
(4.10)

$$P_g(k) = \frac{R \cdot T_g \cdot P_g(k-1) + \Delta T \cdot (R \cdot P_R - \Delta f(k))}{R \cdot (\Delta T + T_g)}$$
(4.11)

Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζονται τρεις τυπικές αποκρίσεις συχνότητας, οι οποίες προέκυψαν από εφαρμογή του αλγορίθμου. Η καμπύλη 1 αντιστοιχεί σε απώλεια παραγωγής 0.4 p.u., χωρίς αποκοπή φορτίου. Οι καμπύλες 2 και 3 αντιστοιχούν σε ίδια απώλεια παραγωγής αλλά με αποκοπή φορτίου στα 49 Hz της τάξης των 0.2 p.u. και 0.4 p.u. αντίστοιχα. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2, η συχνότητα μετά το μεταβατικό φαινόμενο σταθεροποιείται στην εναπομένουσα (residual) τιμή της, η οποία είναι μικρότερη από την ονομαστική, εάν η αποκοπή φορτίου είναι μικρότερη από την απώλεια παραγωγής (καμπύλη 1). Εάν η αποκοπή φορτίου είναι ίση με την απώλεια παραγωγής (καμπύλη 2), η συχνότητα μετά το μεταβατικό φαινόμενο επανέρχεται στα ονομαστικά της επίπεδα. Τέλος, για αποκοπή φορτίου μεγαλύτερη

από την απώλεια παραγωγής, η εναπομένουσα συχνότητα είναι μεγαλύτερη της ονομαστικής (καμπύλη 3).



Σχήμα 4.2 Απόκριση συχνότητας μετά από απώλεια παραγωγής και λειτουργία των Η/Ν υποσυχνότητας

Για δεδομένη απώλεια παραγωγής, η απόκριση συχνότητας κατά το μεταβατικό διάστημα εξαρτάται όχι μόνο από το ύψος της αποκοπής φορτίου αλλά και από την χρονική στιγμή που αυτή πραγματοποιείται. Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζονται δύο περιπτώσεις ίσης αποκοπής φορτίου 0.2 p.u., όπου στη καμπύλη 1 η αποκοπή πραγματοποιείται στα 49 Hz ενώ στη καμπύλη 2 η αποκοπή πραγματοποιείται στα 49.9 Hz. Όπως είναι αναμενόμενο, η εναπομένουσα συχνότητα είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις αλλά το μεταβατικό φαινόμενο είναι αρκετά διαφορετικό. Πράγματι, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3, η καθυστέρηση στην αποκοπή φορτίου συνεπάγεται ισχυρότερη βύθιση συχνότητας. Αυτό σημαίνει ότι όσο γρηγορότερη είναι η αντίδραση των H/N υποσυχνότητας τόσο μεγαλύτερο το όφελος για την ασφάλεια του συστήματος.



Σχήμα 4.3 Απόκριση συχνότητας για διαφορετικές χρονικές στιγμές αποκοπής του φορτίου

4.3 Παράμετροι Απόκρισης Συχνότητας

Η καμπύλη απόκρισης συχνότητας περιλαμβάνει όλες τις πληροφορίες σχετικά με την αντίδραση του συστήματος ως προς τον χρόνο μετά από διαταραχή του ισοζυγίου παραγωγής - ζήτησης. Όμως, στα πλαίσια μιας πιθανοτικής ανάλυσης είναι προτιμότερο να έχει κανείς στην διάθεσή του αριθμητικούς δείκτες για ανάλυση και επεξεργασία. Για τον λόγο αυτό ορίζονται κάποιες βασικοί παράμετροι επί της καμπύλης απόκρισης του σχήματος 4.4, οι οποίες περιγράφουν με ικανοποιητικό τρόπο την υπόψη καμπύλη και περιλαμβάνουν τις πλέον σημαντικές και κρίσιμες πληροφορίες.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4, η κατώτατη τιμή της συχνότητας f_{under} χαρακτηρίζει το μέγεθος της διαταραχής και άρα, τον βαθμό επικινδυνότητας στον οποίον το σύστημα υπεισέρχεται. Η εναπομένουσα συχνότητα fresidual είναι η τιμή στην οποία σταθεροποιείται τελικά η συχνότητα μετά το σύντομο μεταβατικό φαινόμενο. Η ανώτατη τιμή της συχνότητας fover δεν πρέπει να υπερβαίνει τα επίπεδα προστασίας υπερσυχνότητας των γεννητριών. Η κλίση tanφ σε ορισμένο σημείο της καμπύλης απόκρισης προσδιορίζει τον ρυθμό μεταβολής της συχνότητας df/dt την συγκεκριμένη χρονική στιγμή, ο οποίος παίζει σημαντικό ρόλο στην λειτουργία των Η/Ν υποσυχνότητας. Ο κρίσιμος για το σύστημα χρόνος t1 είναι ο χρόνος κατά τον οποίο η συχνότητα παραμένει κάτω από το επίπεδο fcriticall, όπου το ρίσκο για την ευστάθεια του συστήματος είναι αυξημένο. Ο κρίσιμος για την γεννήτρια χρόνος t2 είναι ο χρόνος κατά τον οποίο η συχνότητα παραμένει χαμηλότερη από το κάτω όριο $f_{critical2}$ ασφαλούς λειτουργίας της Αντίστοιχα, ο κρίσιμος για την γεννήτρια χρόνος t_3 είναι ο χρόνος κατά τον οποίο η συχνότητα παραμένει υψηλότερη από το άνω όριο f_{critical3} ασφαλούς λειτουργίας της. Ο αλγόριθμος, ο οποίος έχει αναπτυχθεί για τον υπολογισμό της καμπύλης απόκρισης της συχνότητας επεκτείνεται ώστε να υπολογίζει επίσης τις αριθμητικές τιμές όλων των παραπάνω παραμέτρων.



Σχήμα 4.4 Παράμετροι της μεταβατικής περιόδου απόκρισης συχνότητας

4.4 Στρατηγική Αποκοπής Φορτίου

Κάθε στρατηγική αποκοπής φορτίου περιλαμβάνει ορισμένα στάδια λειτουργίας των Η/Ν υποσυχνότητας [7, 33], κάθε ένα από τα οποία καθορίζεται μονοσήμαντα από τις παρακάτω παραμέτρους:

- επίπεδο υποσυχνότητας
- ρυθμός μεταβολής συχνότητας
- χρονική καθυστέρηση
- φορτίο προς αποκοπή

Μεταβάλλοντας είτε τον αριθμό των σταδίων λειτουργίας των Η/Ν είτε απλώς μία παράμετρο ενός σταδίου δημιουργείται μια νέα στρατηγική. Αν και είναι δυνατόν δύο διαφορετικές στρατηγικές να προκαλέσουν ίδια αποκοπή φορτίου σε συγκεκριμένη απώλεια παραγωγής, εν τούτοις κάθε στρατηγική οδηγεί μακροπρόθεσμα σε διαφορετική ακολουθία αποκρίσεων συχνότητας. Για κάθε ακολουθία αποκρίσεων συχνότητας τα παρακάτω δύο ζητήματα είναι μείζονος σημασίας για κάθε Διαχειριστή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

- Ο αναμενόμενος ρυθμός λειτουργίας των Η/Ν υποσυχνότητας και το ύψος του φορτίου αποκοπής είναι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα και την αξιοπιστία της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η χρονική απόκριση της συχνότητας που ακολουθεί κάθε trip Μονάδας παραγωγής έχει ιδιαίτερη σημασία τόσο για την διάρκεια ζωής των στροβίλων όσο και για το ρίσκο απώλειας της ευστάθειας του συστήματος.

Όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 3.3, υπάρχουν νομογραφήματα, τα οποία συσχετίζουν την διάρκεια ζωής των στροβίλων με τον συνολικό χρόνο κατά τον οποίο ο στρόβιλος θα λειτουργήσει σε ορισμένες περιοχές χαμηλών συχνοτήτων. Από την άλλη πλευρά, ο κίνδυνος για την ευστάθεια του συστήματος συναρτάται με το μέγεθος της βύθισης συχνότητας. Όμως, δεν υπάρχει συγκεκριμένο όριο που να εγγυάται την ασφαλή λειτουργία του συστήματος, καθώς πλήθος από απρόβλεπτους παράγοντες παίζουν καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη μιας διαταραχής που προέρχεται από απώλεια παραγωγής. Σημαντικό ρόλο στη εξέλιξη αυτή παίζουν διάφορα χαρακτηριστικά του συστήματος, όπως η σύνθεση των μονάδων παραγωγής, οι ρυθμίσεις της προστασίας υποσυχνότητας των μονάδων κλπ.

4.5 Πιθανοτικοί Δείκτες

Προκειμένου να συγκρίνει κανείς εναλλακτικές στρατηγικές για την ρύθμιση των Η/Ν υποσυχνότητας είναι ανάγκη να ποσοτικοποιηθούν οι παράγοντες που έχουν αναπτυχθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για τον σκοπό αυτό ορίζεται ένα σετ από 31 πιθανοτικούς δείκτες, που περιγράφουν επαρκώς την εξέλιξη μιας διαταραχής του

ισοζυγίου παραγωγής – ζήτησης. Οι δείκτες αυτοί ομαδοποιούνται σε τρεις κύριες ομάδες. Η ομάδα (Α) περιλαμβάνει τους δείκτες που αναφέρονται στη αξιοπιστία του συστήματος παραγωγής, η ομάδα (Β) περιλαμβάνει στους δείκτες που αναφέρονται στην απόκριση συχνότητας και η ομάδα (C) περιλαμβάνει στους δείκτες που αναφέρονται στην αποκοπή φορτίου. Όπως είναι φανερό, η ομάδα (C) περιλαμβάνει τους δείκτες που εκφράζουν το τίμημα που πρέπει να καταβληθεί σε διακοπές πελατών προκειμένου να επιτευχθεί το όφελος της διατήρησης της συχνότητας σε ασφαλή όρια και το οποίο εκφράζεται από τους δείκτες της ομάδας (B).

Α. Δείκτες αξιοπιστίας του συστήματος παραγωγής

- Α1. Αναμενόμενος Ρυθμός Βλαβών του συστήματος παραγωγής (ΑΡΒΣΠ) σε συμβάντα/έτος.
- Α2. Μέσος Χρόνος Ανάμεσα σε Διαδοχικές Απώλειες Μονάδων (ΜΧΑΔΑΜ) σε ώρες.

Β. Δείκτες Απόκρισης Συχνότητας

- Β1. Ελάχιστη Εναπομένουσα Συχνότητα κατά την περίοδο προσομοίωσης (ΕΕΣ) σε Hz.
- B2. Αναμενόμενη Εναπομένουσα Συχνότητα (ΑΕΣ) σε Hz.
- Β3. Μέση Τετραγωνική Απόκλιση των Εναπομενουσών Συχνοτήτων από την Ονομαστική τιμή (ΜΤΑΕΣΟ) σε Ηz.
- Β4. Ελάχιστη Κατώτατη Συχνότητα κατά την περίοδο προσομοίωσης (ΕΚΣ) σε Hz.
- B5. Αναμενόμενη Κατώτατη Συχνότητα (ΑΚΣ) σε Hz.
- Β6. Μέση Τετραγωνική Απόκλιση των Κατώτατων Συχνοτήτων από την Ονομαστική τιμή (ΜΤΑΚΣΟ) σε Hz.
- Β7. Μέγιστη Ανώτατη Συχνότητα κατά την περίοδο προσομοίωσης (ΜΑΣ) σε Hz.
- B8. Αναμενόμενος Κρίσιμος για το σύστημα Χρόνος (ΑΚΣΧ) σε ms.
- Β9. Μέγιστος Κρίσιμος για το σύστημα Χρόνος κατά την περίοδο προσομοίωσης (ΜΚΣΧ) σε seconds.
- Β10. Συσσωρευμένος Κρίσιμος για τους Στροβίλους Χρόνος (ΣΚΣΧ) σε minutes.
- Β11. Αναμενόμενος Κρίσιμος για τους Στροβίλους Χρόνος (ΑΚΣΧ) σε ms.
- B12. Αναμενόμενος Χρόνος Υπερσυχνότητας (AXY) σε ms.
- Β13. Αναμενόμενος Χρόνος ανάμεσα σε Διαδοχικές Κρίσιμες Βυθίσεις Συχνότητας. (ΑΧΔΚΒΣ) σε ώρες.

Γ. Δείκτες Αποκοπής φορτίου

- C1. Αναμενόμενος Χρόνος ανάμεσα σε Διαδοχικά Συμβάντα Αποκοπής Φορτίου (ΑΧΔΣΑΦ) σε ώρες.
- C2. Μέσο Αποκοπτόμενο Φορτίο από λειτουργία του Ρυθμού Μεταβολής της Συχνότητας (ΜΑΦΡΜΣ) σε MW.
- C3. Μέσο Αποκοπτόμενο Φορτίο από λειτουργία του Πρώτου Σταδίου Υποσυχνότητας (ΜΑΦΠΣΥ) σε ΜW.
- C4. Μέσο Αποκοπτόμενο Φορτίο από λειτουργία του Δεύτερου Σταδίου Υποσυχνότητας (ΜΑΦΔΣΥ) σε MW.

- C5. Μέσο Αποκοπτόμενο Φορτίο (ΜΑΦ) σε MW.
- C6. Μέγιστο Αποκοπτόμενο Φορτίο κατά την περίοδο προσομοίωσης (MAXAΦ) σε MW.
- C7. Αναμενόμενος Ετήσιος Αριθμός Λειτουργιών του Ρυθμού Μεταβολής της Συχνότητας (ΑΕΑΛΡΜΣ) σε λειτουργίες/έτος.
- C8. Αναμενόμενος Ετήσιος Αριθμός Λειτουργιών του Πρώτου Σταδίου Υποσυχνότητας (ΑΕΑΛΠΣΥ) σε λειτουργίες/έτος.
- C9. Αναμενόμενος Ετήσιος Αριθμός Λειτουργιών του Δεύτερου Σταδίου Υποσυχνότητας (ΑΕΑΛΔΣΥ) σε λειτουργίες/έτος.
- C10. Αναμενόμενη Ετήσια Μη Διαθέσιμη Ενέργεια λόγω λειτουργίας του Ρυθμού Μεταβολής της Συχνότητας (ΑΕΜΔΕΡΜΣ) σε MWh/έτος.
- C11. Αναμενόμενη Ετήσια Μη Διαθέσιμη Ενέργεια λόγω λειτουργίας του Πρώτου Σταδίου Υποσυχνότητας (ΑΕΜΔΕΠΣΥ) σε MWh/έτος.
- C12. Αναμενόμενη Ετήσια Μη Διαθέσιμη Ενέργεια λόγω λειτουργίας του Δεύτερου Σταδίου Υποσυχνότητας (ΑΕΜΔΕΔΣΥ) σε MWh/έτος.
- C13. Αναμενόμενη Ετήσια Μη Διαθέσιμη Ενέργεια (ΑΕΜΔΕ) σε MWh/έτος.
- C14. Αναμενόμενος Ετήσιος Αριθμός Προσωρινών Διακοπών (ΑΕΑΠΔ) σε συμβάντα/έτος.
- C15. Αναμενόμενο Αποκοπτόμενο Φορτίο κατά τις Προσωρινές Διακοπές (ΑΑΦΠΔ) σε MW/συμβάν.
- C16. Πιθανότητα Αποκοπής Φορτίου δεδομένου ότι υπήρξε Απώλεια Παραγωγής (ΠΑΦΑΠ) σε %.

4.6 Προσομοίωση Συστήματος με την Μέθοδο Monte - Carlo

Η ακολουθιακή μέθοδος Monte - Carlo [29, 30] χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της λειτουργίας ενός αυτόνομου ηλεκτρικού συστήματος στην διάρκεια του χρόνου με ταυτόχρονο υπολογισμό όλων των δεικτών που εισήχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ο αλγόριθμος που αναπτύσσεται στη συνέχεια προσομοιώνει την λειτουργία ενός αυτόνομου συστήματος σε τρία διαφορετικά επίπεδα:

- I. Λειτουργία Κέντρου Ελέγχου Ενέργειας. Στο επίπεδο αυτό προσομοιώνεται ο τρόπος ένταξης και εξόδου των μονάδων και η κατανομή φορτίου σε ωριαία βάση με στόχο την ικανοποίηση της ζήτησης και την οικονομική λειτουργία του συστήματος [38]. Προς το σκοπό αυτό απαραίτητη πληροφορία είναι η διαθεσιμότητα των μονάδων παραγωγής, η οποία προκύπτει από προσομοίωση των αντίστοιχων βλαβών τους.
- II. Φυσική αντίδραση των μονάδων και αποκοπή φορτίου. Μετά την εκδήλωση βλάβης σε μονάδα εν λειτουργία και την επακόλουθη απώλεια παραγωγής υπολογίζονται οι αντιδράσεις όλων των μονάδων με βάση τον στατισμό τους (πρωτεύουσα ρύθμιση) καθώς και η αποκοπή φορτίου εξ αιτίας της ενεργοποίησης των Η/Ν υποσυχνότητας.

III. Δευτερεύουσα ρύθμιση και αξιοποίηση της στρεφόμενης εφεδρείας. Στο επίπεδο αυτό, λαμβάνοντας υπόψη την υπάρχουσα στρεφόμενη εφεδρεία την στιγμή της διαταραχής, υπολογίζονται οι διακοπές πελατών καθώς και η χρονική τους διάρκεια.

Στη συνέχεια αναπτύσσονται εκτενέστερα οι λειτουργίες που περιλαμβάνονται στα τρία αυτά επίπεδα.

Ι. Λειτουργία Κέντρου Ελέγχου Ενέργειας

Ο έλεγχος και η λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται από τους υπεύθυνους του Κέντρου Ελέγχου Ενέργειας με σκοπό την αξιοποίηση των μονάδων παραγωγής κατά τον οικονομικότερο τρόπο ώστε να ικανοποιείται η ζήτηση και το σύστημα να λειτουργεί με ασφάλεια. Βέβαια, η αξιοποίηση αυτή αφορά στις μονάδες παραγωγής που βρίσκονται σε διαθεσιμότητα δεδομένου ότι το σύνολο των μονάδων δεν είναι διαθέσιμο ανά πάσα στιγμή, εξ αιτίας των αναπόφευκτων βλαβών που παρουσιάζονται κατά την λειτουργία τους. Η εκδήλωση βλάβης σε μονάδα παραγωγής μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα είτε την απώλεια (trip) ολόκληρης της μονάδας είτε την μειωμένη ικανότητά της. Η απώλεια μιας μονάδας πραγματοποιείται με το άνοιγμα του διακόπτη της, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την ακαριαία (σε χρόνο ms) απώλεια της αντίστοιχης παραγωγής. Η βηματική αυτή μεταβολή της παραγωγής δημιουργεί σημαντική διαταραχή στο ισοζύγιο παραγωγής-κατανάλωσης και κατά συνέπεια, βύθιση της συχνότητας.

Απεναντίας, η μετάβαση σε καταστάσεις μειωμένης ικανότητας γίνεται σταδιακά σε χρόνους αρκετά μεγαλύτερους, της τάξης των πρώτων λεπτών. Συνήθης βλάβη των ατμοηλεκτρικών μονάδων που οδηγεί σε μειωμένη ικανότητα είναι η απώλεια κάποιων καυστήρων, όμως η πίεση του ατμού που υπάρχει στο τύμπανο εξασφαλίζει την σταδιακή μείωση της ικανότητας της μονάδας. Στις αεριοστροβιλικές μονάδες, μια συνήθης βλάβη που οδηγεί, επίσης, σε μειωμένη ικανότητα είναι η αύξηση της θερμοκρασίας ειδικά κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, όμως και εδώ η μείωση της ικανότητας γίνεται σταδιακά. Κατά συνέπεια, στις βλάβες εκείνες που οδηγούν σε προοδευτική μείωση της ικανότητας των μονάδων υπάρχει επαρκής χρόνος για την σταδιακή διόρθωση της συχνότητας μέσω της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ρύθμισης και κατά άρα, δεν προκαλείται σοβαρή βύθιση συχνότητας.

Στην παρούσα προσομοίωση λαμβάνονται υπόψη μόνο οι βλάβες που οδηγούν σε απώλεια μονάδων, δηλαδή εκείνες που επηρεάζουν σοβαρά την συχνότητα. Οι βλάβες των μονάδων μοντελοποιούνται με την εξαγωγή τυχαίων αριθμών, οι οποίοι αντιστοιχούν στους χρόνους μέχρι την εκδήλωση της επόμενης βλάβης τους. Οι χρόνοι αυτοί ακολουθούν εκθετικές κατανομές δεδομένων ρυθμών βλαβών, οι οποίοι είναι γνωστοί από τα στατιστικά στοιχεία λειτουργίας των μονάδων. Στα πλαίσια της παρούσης μεθόδου όπου η επίλυση γίνεται με αριθμητικό τρόπο είναι, ασφαλώς, δυνατόν να ληφθεί οποιαδήποτε άλλη κατανομή αντί της εκθετικής (π.χ. Weibull, Γάμμα κλπ). Επίσης, κατά τον ίδιο τρόπο μοντελοποιούνται και οι χρόνοι επισκευής των βλαβών.

Οι περιορισμοί του συστήματος Μεταφοράς και οι βλάβες των στοιχείων της Μεταφοράς δεν προσομοιώνονται δεδομένου ότι η προσομοίωσή τους θα οδηγούσε σε υπερβολική πολυπλοκότητα του αλγορίθμου, χωρίς να συνεισφέρει ουσιαστικά

στην ακρίβεια της μεθοδολογίας. Τα γεγονότα αυτά οδηγούν σε μικρό αριθμό περιπτώσεων, κατά τις οποίες η ένταξη των μονάδων και η κατανομή φορτίου λόγω περιορισμών του συστήματος μεταφοράς μπορεί να είναι διαφορετική από την προβλεπόμενη. Όμως, σκοπός της μεθοδολογίας αυτής είναι η ανάλυση των συμβάντων που οδηγούν σε βύθιση συχνότητας. Το γεγονός ότι, σε κάποιες περιπτώσεις με μικρή πιθανότητα εμφάνισης, η σύνθεση της παραγωγής είναι κάπως διαφορετική από την προβλεπόμενη από τον αλγόριθμο δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα. Αυτό συμβαίνει διότι κατά τις περιπτώσεις αυτές οι οποίες έχουν μικρή πιθανότητα εμφάνισης πρέπει επί πλέον να συμβεί απώλεια παραγωγής, ενδεχόμενο το οποίο έχει, επίσης, μικρή πιθανότητα, ώστε να προκύψει τελικά συμβάν υποσυχνότητας. Πέραν τούτου, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι, τελικός σκοπός της μελέτης είναι η σύγκριση διαφορετικών στρατηγικών ρύθμισης των Η/Ν υποσυχνότητας, άρα, η όποια παραδοχή σε σχέση με το σύστημα Μεταφοράς επηρεάζει κατά τον ίδιο τρόπο όλες τις συγκρινόμενες στρατηγικές σε ικανό βάθος χρόνου κατά τον οποίον προσομοιώνεται το σύστημα.

ΙΙ. Φυσική αντίδραση των μονάδων και αποκοπή φορτίου

Ως γνωστόν, μετά από συμβάν απώλειας παραγωγής, η πρωτεύουσα ρύθμιση των μονάδων επαναφέρει μερικώς την συγνότητα και την σταθεροποιεί. Η παρούσα μέθοδος υπολογίζει σημείο προς σημείο την μεταβατική απόκριση της συγνότητας, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την πρωτεύουσα ρύθμιση όσο και την διαδικασία αποκοπής φορτίου εξ αιτίας της πιθανής λειτουργίας των Η/Ν υποσυχνότητας. Οι σύγχρονοι ψηφιακοί Η/Ν παρέχουν την δυνατότητα καταμέτρησης και παρακολούθησης όχι μόνο της στιγμιαίας τιμής της συχνότητας αλλά και του ρυθμού μεταβολής της. Επομένως, η αποκοπή φορτίου πραγματοποιείται είτε όταν η συγνότητα f κατέλθει κάτω από ορισμένο επίπεδο γωρίς άλλη συνθήκη είτε με την επί πλέον συνθήκη, ο ρυθμός μεταβολής της (df/dt) να είναι μεγαλύτερος από συγκεκριμένο όριο. Παράλληλα, υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης της επιθυμητής γρονικής καθυστέρησης, γεγονός που σημαίνει ότι οι παραπάνω συνθήκες πρέπει να διατηρηθούν για χρόνο ίσο με τον προεπιλεγέντα ώστε η εντολή πτώσης (trip) να οδεύσει προς τους διακόπτες ισχύος των γραμμών διανομής. Λαμβανομένου υπόψη ότι, το μεταβατικό φαινόμενο απόκρισης της συχνότητας διαρκεί ολίγα μόνο δευτερόλεπτα, ένας χρόνος προσομοίωσης περί τα 20 δευτερόλεπτα είναι, συνήθως, αρκετός για να περιγράψει επαρκώς το φαινόμενο.

ΙΙΙ. Δευτερεύουσα ρύθμιση και αξιοποίηση της στρεφόμενης εφεδρείας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η δευτερεύουσα ρύθμιση είναι ένας επιπρόσθετος μηχανισμός, ο οποίος προσπαθεί να επαναφέρει την ήδη σταθεροποιημένη συχνότητα στα ονομαστικά της επίπεδα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των ρυθμιζουσών μονάδων, οι οποίες ελέγχονται από το Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας. Είναι ένας μηχανισμός πολύ βραδύτερος σε σχέση με την πρωτεύουσα ρύθμιση, της τάξης μερικών MW/min και αξιοποιεί την υπάρχουσα στρεφόμενη εφεδρεία των ρυθμιζουσών μονάδων. Ο παρών αλγόριθμος υπολογίζει την μη διαθέσιμη ενέργεια σε κάθε διαταραχή κατά την οποία πραγματοποιήθηκε αποκοπή φορτίου. Η μη διαθέσιμη ενέργεια εξαρτάται από τη στρεφόμενη εφεδρεία την στιγμή της διαταραχής, η οποία θα αξιοποιηθεί μέσω της δευτερεύουσας ρύθμισης. Ο αλγόριθμος συγκρίνει την στρεφόμενη εφεδρεία που υπήρχε λίγο πριν την απώλεια της παραγωγής με το άθροισμα της ισχύος που απαιτείται για επαναφορά της συχνότητας στην ονομαστική της τιμή συν το φορτίο αποκοπής. Διακρίνονται τρεις δυνατές περιπτώσεις:

- Εάν η στρεφόμενη εφεδρεία είναι ίση ή μεγαλύτερη από το παραπάνω άθροισμα, τότε ολόκληρο το φορτίο μπορεί να αποκατασταθεί αμέσως. Το αποτέλεσμα είναι διακοπές μικρής μόνο διάρκειας.
- Εάν αντιθέτως η στρεφόμενη εφεδρεία είναι μικρότερη από το παραπάνω άθροισμα, τότε μέρος μόνο του φορτίου μπορεί να αποκατασταθεί αμέσως, ενώ το υπόλοιπο θα αποκατασταθεί όταν κάποιες διαθέσιμες γρήγορες μονάδες (Αεριοστρόβιλοι) ξεκινήσουν να παράγουν. Αυτό συνεπάγεται ότι κάποιες διακοπές καταναλωτών θα διαρκέσουν περισσότερο χρόνο της τάξης των 10-20 min. Η διάρκεια εκκίνησης των μονάδων αυτών λαμβάνεται από προσομοίωση των τυχαίων χρόνων εκκίνησης, οι οποίοι, επίσης, ακολουθούν γνωστές εκθετικές κατανομές.
- Εάν, όπως προηγουμένως, η στρεφόμενη εφεδρεία είναι μικρότερη από το παραπάνω άθροισμα αλλά δεν υπάρχει διαθέσιμη γρήγορη μονάδα στο σύστημα, τότε οι διακοπές πελατών θα συνεχιστούν για αρκετό χρόνο έως ότου είτε το φορτίο του συστήματος μειωθεί είτε άλλες διαθέσιμες μονάδες αρχίσουν να παράγουν.

Στη συνέχεια περιγράφονται τα διαδοχικά βήματα του αλγορίθμου αφού προηγουμένως γίνει η ανάγνωση των χαρακτηριστικών του συστήματος και των μέσων ωριαίων φορτίων της ετήσιας καμπύλης.

- Οι μονάδες παραγωγής εντάσσονται και απο-εντάσσονται στο σύστημα σύμφωνα με λίστα κατάταξης, η οποία έχει καταστρωθεί με βάση την οικονομικότητα λειτουργίας τους (ειδική κατανάλωση –κόστος καυσίμου). Η φόρτιση των μονάδων λαμβάνει υπόψη την οικονομική λειτουργία αλλά και τα τεχνικά ελάχιστα των μονάδων, τα οποία δεν πρέπει να παραβιάζονται.
- Εάν ο συνολικός χρόνος λειτουργίας μιας μονάδας υπερβεί τον τυχαίο χρόνο εκδήλωσης βλάβης, ο οποίος έχει εξαχθεί από την προσομοίωση των βλαβών, τότε η μονάδα οδηγείται σε έξοδο (trip) και ένας νέος τυχαίος χρόνος βλάβης παράγεται.
- Εάν ο χρόνος που μια μονάδα βρίσκεται εκτός διαθεσιμότητας υπερβεί τον αντίστοιχο χρόνο επισκευής, η μονάδα τίθεται και πάλι στη θέση της στη λίστα των διαθέσιμων μονάδων και ένας νέος τυχαίος χρόνος επισκευής της μονάδας παράγεται.
- Οταν συμβεί ενδεχόμενο βλάβης μονάδας παραγωγής, τότε η καμπύλη απόκρισης συχνότητας υπολογίζεται σημείο προς σημείο λαμβάνοντας υπόψη τόσο την πρωτεύουσα ρύθμιση όλων των μονάδων που βρίσκονται σε λειτουργία όσο και την πιθανή ενεργοποίηση των Η/Ν υποσυχνότητας. Πιο συγκεκριμένα το βήμα αυτό περιλαμβάνει τα εξής επί μέρους στάδια:
 - Η ικανότητα παραγωγής, ο στατισμός, η αδράνεια και οι χρονικές σταθερές του συστήματος υπολογίζονται στις δεδομένες συνθήκες τη στιγμή εκδήλωσης της διαταραχής.
 - Η αριθμητική επίλυση των εξισώσεων διαφορών (4.9 4.11) προσφέρει σημείο προς σημείο την χρονική απόκριση της συχνότητας.
 - Σε κάθε χρονικό σημείο, όπου οι συνθήκες ενεργοποίησης κάποιων Η/Ν ικανοποιούνται σύμφωνα με τις ισχύουσες ρυθμίσεις, γίνεται αποκοπή του αντίστοιχου φορτίου του συστήματος. Τότε, οι εξισώσεις (4.9 – 4.11) προσαρμόζονται κατάλληλα ώστε ο υπολογισμός της συχνότητας, το επόμενο χρονικό σημείο, να λαμβάνει πλέον υπόψη το νέο μειωμένο φορτίο του συστήματος.

- Στη συνέχεια υπολογίζονται οι παράμετροι που έχουν εισαχθεί στο κεφάλαιο
 4.3 οι οποίοι χρησιμεύσουν για τον υπολογισμό των πιθανοτικών δεικτών.
- Υπολογίζεται η αναλυτική τιμή της εναπομένουσας συχνότητας και η αναλυτική τιμή της αρχικής κλίσης της συχνότητας, οι οποίες συγκρίνονται με τις αντίστοιχες αριθμητικές τιμές.
- Υπολογίζεται η μη διαθέσιμη ενέργεια, συγκρίνοντας την υπάρχουσα στρεφόμενη εφεδρεία πριν από την απώλεια παραγωγής με το άθροισμα της ισχύος που απαιτείται για την αποκατάσταση της συχνότητας στα ονομαστικά επίπεδα συν το φορτίο που αποκόπηκε.
- Προσδιορίζεται η λίστα των μονάδων που θα είναι διαθέσιμες την επόμενη ώρα, λαμβάνοντας υπόψη τις βλάβες και επισκευές που έλαβαν χώρα.
- Στο τέλος κάθε χρόνου υπολογίζονται όλοι οι πιθανοτικοί δείκτες για ολόκληρη την περίοδο προσομοίωσης που έχει παρέλθει μέχρι εκείνη την χρονική στιγμή.
- Κριτήριο για τον τερματισμό του αλγορίθμου αποτελεί ο κανόνας ότι κανείς από τους πιθανοτικούς δείκτες δεν μεταβάλλεται περισσότερο από 2% μετά την παρέλευση και του τελευταίου έτους.

Στο σχήμα 4.5 παρουσιάζεται το απλοποιημένο διάγραμμα ροής του υπόψη αλγορίθμου.



Σχήμα 4.5 Απλοποιημένο διάγραμμα ροής του αλγόριθμου

Οι πιθανοτικοί δείκτες παρέχουν σημαντικές πληροφορίες, οι οποίες μπορούν να φανούν χρήσιμες στην υιοθέτηση της κατάλληλης στρατηγικής αποκοπής φορτίου σύμφωνα με την πολιτική του Διαχειριστή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η πολιτική αυτή αφορά στα αποδεκτά επίπεδα υποσυχνότητας, καταπόνησης των μονάδων παραγωγής, ποιότητας ισχύος, μη διαθέσιμης ενέργειας και αξιοπιστίας της ηλεκτρικής ενέργειας στο επίπεδο του τελικού χρήστη. Με χρησιμοποίηση της παρούσας μεθοδολογίας μπορούν να εξεταστούν εναλλακτικές στρατηγικές ρύθμισης των Η/Ν υποσυχνότητας και να επιλεγεί εκείνη η οποία αποδίδει τους πιο κατάλληλους και επιθυμητούς δείκτες.

Όπως είναι προφανές, ότι κερδίζει κανείς στο επίπεδο ασφάλειας του συστήματος είναι αναγκασμένος να το καταβάλλει ως τίμημα στο επίπεδο διακοπών πελατών και επιβάρυνσης της ποιότητας ενέργειας. Επομένως, εναπόκειται σε κάθε Διαχειριστή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας να επιλέξει την χρυσή τομή ανάμεσα στις δύο αυτές προτεραιότητες. Η παρούσα μεθοδολογία προσφέρει τα εφόδια και τις κατάλληλες πληροφορίες για τον προσδιορισμό της χρυσής τομής. Αποτελεί σημαντική βελτίωση έναντι της συνήθως χρησιμοποιούμενης εμπειρικής μεθόδου, σύμφωνα με την οποία το ίδιο το σύστημα χρησιμοποιείται για τον έλεγχο μιας στρατηγικής και οι διορθωτικές αλλαγές γίνονται στην πορεία, ανάλογα με την αντίδραση του συστήματος στην πράξη. Είναι προφανές ότι η εμπειρική μέθοδος παρουσιάζει αρκετές αδυναμίες δεδομένου ότι πρέπει να παρέλθει αρκετός χρόνος και να υπάρξουν αρκετά γεγονότα προκειμένου να εξαγθούν ασφαλή συμπεράσματα. Επί πλέον, τα συστήματα ηλεκτρισμού αλλάζουν διαρκώς με την εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής και την παράλληλη αύξηση του φορτίου, κατά συνέπεια δεν υπάρχει επαρκής διαθέσιμος χρόνος για τον έλεγχο και την επιβεβαίωση μιας στρατηγικής κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας του συστήματος.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε μπορεί, επίσης, να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της πολιτικής όσον αφορά την τηρούμενη στρεφόμενη εφεδρεία. Οι πιο συνήθεις κανόνες που εφαρμόζονται σχετικά με τα επίπεδα της διαθέσιμης στρεφόμενης εφεδρείας είναι είτε τήρηση εφεδρείας ίσης με το 10% της ζήτησης φορτίου είτε ίσης με την μεγαλύτερη φόρτιση από τις λειτουργούσες μονάδες που βρίσκονται σε λειτουργία. Σε αυτόνομα συστήματα, είναι πιθανόν οι κανόνες αυτοί να μην οδηγούν σε ικανοποιητικό αποτέλεσμα όσον αφορά το κόστος της στρεφόμενης εφεδρείας ή την ασφάλεια του συστήματος. Μπορεί, για παράδειγμα η μέγιστη μονάδα του συστήματος να είναι αρκετά μεγάλη και η διατήρηση αντίστοιχης εφεδρείας να οδηγεί σε υπερβολικό κόστος λειτουργίας. Από την άλλη πλευρά, εφεδρεία της τάξης του 10% της ζήτησης, ίσως, να μην είναι ικανοποιητική.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να διερευνήσει εναλλακτικές στρατηγικές στρεφόμενης εφεδρείας συγκρίνοντας τους αντίστοιχους πιθανοτικούς δείκτες που αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 4.5.

Πέραν τούτων, η παρούσα μεθοδολογία θα μπορούσε να αξιοποιηθεί προκειμένου να εξετασθούν εναλλακτικές πολιτικές συντήρησης. Όπως είναι προφανές, η πολιτική των συντηρήσεων επηρεάζει τους ρυθμούς βλαβών των μονάδων. Κατά συνέπεια, το αυξημένο κόστος των συντηρήσεων μπορεί να συγκριθεί με το όφελος που προκύπτει από την μείωση της μη διαθέσιμης ισχύος, την αύξηση της ποιότητας ισχύος και την βελτίωση της ασφάλειας του συστήματος.
Το πρόγραμμα σε ηλεκτρονικό υπολογιστή το οποίο καταστρώθηκε σε εφαρμογή της μεθοδολογίας υπολογίζει, επίσης, χρήσιμα ιστογράμματα πιθανοτικών κατανομών. Υπολογίζονται ιστογράμματα των υποσυχνοτήτων, των φορτίων αποκοπής, των χρόνων πλήρους αποκατάστασης καθώς και η τυπική μέρα από πλευράς εμφάνισης υποσυχνοτήτων. Τα ιστογράμματα αυτά παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες ώστε να διερευνηθεί αν υπάρχει συσχέτιση της ώρας της ημέρας με την εμφάνιση υποσυχνοτήτων στο σύστημα, να υπολογιστεί το πιθανό ύψος του φορτίου αποκοπής, να εκτιμηθεί η πιθανή διάρκεια διακοπών κλπ. Παραδείγματα των ιστογραμμάτων αυτών παρουσιάζονται στην ανάλυση ενός τυπικού συστήματος που ακολουθεί.

4.7 Ανάλυση Τυπικού Συστήματος

Για τον έλεγχο και την δοκιμή της προτεινόμενης μεθόδου χρησιμοποιήθηκε ένα αυτόνομο σύστημα με χαρακτηριστικά παρόμοια με εκείνα του συστήματος Κρήτης. Αξίζει να αναφερθεί ότι, τον Οκτώβριο του 2001 συνέβη Γενική Διακοπή στο σύστημα Κρήτης μετά την αρχική απώλεια δύο μονάδων παραγωγής και την επακόλουθη, σοβαρή βύθιση της συχνότητας. Η λειτουργία των Η/Ν υποσυχνότητας δεν στάθηκε ικανή για την διάσωση του συστήματος παρά το γεγονός ότι η υπάρχουσα στρατηγική είχε δοκιμαστεί κατά το παρελθόν σε πλήθος άλλων περιπτώσεων και είχε λειτουργήσει αποτελεσματικά. Το παράδειγμα αυτό επιβεβαιώνει, πράγματι, την ανάγκη για πιθανοτική ανάλυση του προβλήματος, στα πλαίσια της οποίας είναι δυνατό να προσδιοριστούν οι πιθανότητες για την εμφάνιση οιωνδήποτε ενδεχομένων.

Το προς ανάλυση σύστημα περιλαμβάνει 23 μονάδες παραγωγής, οι περισσότερες από τις οποίες είναι παλιές και παρουσιάζουν υψηλές αριθμητικές τιμές των ρυθμών βλαβών, των χρόνων επισκευής και των στατισμών τους. Η ονομαστική ισχύς του συστήματος ανέρχεται σε 521.6 MW και η αιχμή του φορτίου σε 430 MW. Τα χαρακτηριστικά των μονάδων παραγωγής καταγράφονται στον Πίνακα 4.1, στον οποίο οι μονάδες κατατάσσονται κατά αύξουσα σειρά με βάση το κόστος λειτουργίας τους λόγω καυσίμου.

Μονάδα	Ονομαστική ικανότητα (MW)	Τεχνικά ελάχιστα (MW)	Ρυθμός βλαβών (συμβ./έτος)	Χρόνος επισκευής (ώρες)	Στατισμός Μονάδων R (puHz/puMW)	Σταθερά χρόνου ρυθμιστή (s)	Σταθερά χρόνου στροβίλου (s)	Σταθερά αδράνειας (s)
U1	23.5	18	5.1	16.8	0.22	0.0719	1.263	4.5
U2	23.5	18	5.2	24	0.09	0.0719	1.263	4.5
U3	23.5	18	5	21.6	0.09	0.0719	1.263	4.5
U4	14.1	8	6.1	36	0.09	0.1092	1.422	4
U5	14.1	8	6.2	38.4	0.1	0.1092	1.422	4
U6	5.9	4	7	48	0.08	0.1318	1.146	4
U7	11.5	3	5.5	50.4	0.07	0.07	1.014	5
U8	11.5	3	5.6	48	0.1	0.07	1.014	5
U9	11.5	3	5.4	55.2	0.07	0.07	1.014	5
U10	11.5	3	5.7	48	0.07	0.07	1.014	5
U11	42	12	5	36	0.06	0.0603	0.806	4
U12	20	6	3	48	0.55	0.1865	1.796	4
U13	42	12	5.1	38.4	0.06	0.0603	0.806	4
U14	20	6	3	48	0.55	0.1865	1.796	4
U15	40	3	7	24	0.04	0.0603	0.806	3.5
U16	57	8	4.5	26.4	0.15	0.0603	0.806	4.5
U17	57	8	4.4	28.8	0.15	0.0603	0.806	4.5
U18	16	5	6	21.6	0.06	0.0783	0.566	4
U19	15	3	5.6	26.4	0.06	0.0783	0.566	3
U20	15	3	5.7	36	0.06	0.0783	0.566	3
U21	19	3	6.1	24	0.04	0.0523	0.902	3.5
U22	15	5	6.2	33.6	0.04	0.0523	0.902	3.5
U23	13	3	6	48	0.13	0.0783	0.566	3

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά μονάδων συστήματος

Στην συνέχεια αναλύονται τέσσερις διαφορετικές στρατηγικές και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2. Ως κρίσιμα επίπεδα υποσυχνότητας και υπερσυχότητας, σύμφωνα με τους ορισμούς του κεφ. 4.3, λαμβάνονται $f_{critical1}$ =48.9Hz, $f_{critical2}$ =49.3 Hz και $f_{critical3}$ =50.5 Hz. Οι στρατηγικές που εξετάζονται και αναλύονται είναι οι ακόλουθες:

- Στρατηγική 1: Δεν υπάρχει προστασία υποσυχνότητας και ως ελάχιστη στρεφόμενη εφεδρεία λαμβάνεται το 10% του συνολικού φορτίου.
- Στρατηγική 2: Υπάρχουν δύο επίπεδα λειτουργίας των Η/Ν υποσυχνότητας. Το πρώτο επίπεδο ορίζεται στα 49.9Hz με χρονική καθυστέρηση 0.2s και το φορτίο που αποκόπτεται ισούται με 7% του συνολικού φορτίου συστήματος. Το δεύτερο επίπεδο ορίζεται στα 49Hz χωρίς χρονική καθυστέρηση και το φορτίο που αποκόπτεται ισούται με 4% του συνολικού. Ως ελάχιστη στρεφόμενη εφεδρεία λαμβάνεται το 10% του συνολικού φορτίου.
- Στρατηγική 3: Υπάρχουν δύο επίπεδα λειτουργίας των Η/Ν υποσυχνότητας, εκ των οποίων το ένα περιλαμβάνει συνθήκη ρυθμού μεταβολής της συχνότητας. Το πρώτο επίπεδο ορίζεται στα 49.9Hz με συνθήκη μεταβολής

της συχνότητας df/dt>1Hz/s και το φορτίο που αποκόπτεται ισούται με 10% του συνολικού. Το δεύτερο επίπεδο ορίζεται στα 49Hz με χρονική καθυστέρηση 0.2s και το φορτίο που αποκόπτεται ισούται με 5% του συνολικού. Ως ελάχιστη στρεφόμενη εφεδρεία λαμβάνεται το 10% του συνολικού φορτίου.

Στρατηγική 4: Είναι όμοια με την στρατηγική 3 με μόνη διαφορά ότι, ως ελάχιστη στρεφόμενη εφεδρεία λαμβάνεται το 15% του συνολικού φορτίου.

		Στρατηγική 1	Στρατηγική 2	Στρατηγική 3	Στρατηγική 4
ΔΕΙΚΤΕΣ		Ελάχιστο επίπεδο στρεφόμενης εφεδρείας			
		10%			15%
A1	ΑΡΣΒΣΠ (συμβ./έτος)	134.4	133.9	133.7	134.6
A2	ΜΧΑΔΑΜ (ώρες)	65.18	65.42	65.52	65.08
B1	EEΣ (Hz)	48.72	49.27	49.34	49.35
B2	$AE\Sigma$ (Hz)	49.75	49.79	49.77	49.78
B3	ΜΤΑΕΣΟ (Ηz)	0.31	0.24	0.28	0.28
B4	ΕΚΣ (Hz)	48.1	48.74	48.89	48.89
B5	ΑΚΣ (Ηz)	49.61	49.62	49.62	49.63
B6	ΜΤΑΚΣΟ (Ηz)	0.48	0.45	0.45	0.45
B7	MAΣ (Hz)	50	50.04	50	50
B8	AKΣX (ms)	170.3	5.8	0.5	0.4
B9	MK _Σ X (sec)	19.25	1.48	0.32	0.28
B10	$\Sigma K \Sigma X$ (minutes)	190.3	36	43.5	43
B11	AKSX (ms)	841.3	161.3	197.8	195.1
B12	AXY (ms)	0	0	0	0.02
B13	ΑΧΔΚΒΣ (ώρες)	1800	11232	438000	438000
C1	ΑΧΔΣΑΦ (ώρες)	-	463	1450	1503
C2	ΜΑΦΡΜΣ (MW)	-	0	20.2	20.6
C3	ΜΑΦΠΣΥ (MW)	-	16.6	8.7	7.9
C4	ΜΑΦΔΣΥ (MW)	-	7	0	0
C5	MAΦ (MW)	-	15.9	15.9	16.5
C6	MAXAΦ (MW)	-	30.6	33.5	33.1
C7	ΑΕΑΛΡΜΣ (λειτ/έτος)	-	0	3.79	4.51
C8	ΑΕΑΛΡΜΣ (λειτ./έτος)	-	17.53	2.25	1.32
C9	ΑΕΑΛΔΣΥ (λειτ./έτος)	-	1.36	0	0
C10	ΕΜΔΕΡΜΣ(MWh/έτος)	-	0	15.3	4.3
C11	ΑΕΜΔΕΠΣΥ(MWh/έτος)	-	58.3	3.9	1.9
C12	ΑΕΜΔΕΔΣΥ(MWh/έτος)	-	1.9	0	0
C13	ΑΕΜΔΕ (MWh/έτος)	-	60.2	19.2	6.2
C14	ΑΕΑΠΔ (λειτ./έτος)	-	19.6	45.6	35.7
C15	ΑΑΦΠΔ (MW/συμβάν)	-	18.6	5.9	4.9
C16	ПАФАП (%)	-	14.1	4.5	4.3

Πίνακας 4.2 Δείκτες του τυπικού συστήματος

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.2, ο αναμενόμενος ρυθμός βλαβών του συστήματος παραγωγής (περίπου 134 συμβάντα/έτος) είναι υψηλός και ίδιος περίπου για τις τέσσερις περιπτώσεις που εξετάζονται. Ο ρυθμός αυτός αντιστοιχεί σε απώλεια μιας μονάδας κάθε 65 ώρες, κατά μέσον όρο.

Λαμβανομένου υπόψη ότι, στην στρατηγική 3, το φορτίο που μετέχει στην προστασία υποσυχνότητας (15% του συνολικού) είναι περισσότερο του φορτίου της

στρατηγικής 2 (11% του συνολικού), θα περίμενε, ίσως, κανείς ότι σε ετήσια βάση η μη διατιθέμενη ενέργεια λόγω διακοπών των πελατών θα ήταν περισσότερη στη στρατηγική 3. Εν τούτοις, όπως φαίνεται από τον δείκτη C13 του Πίνακα 4.2, η αναμενόμενη μη διαθέσιμη ενέργεια είναι σημαντικά μικρότερη στην στρατηγική 3, δηλαδή 19.2 MWh/έτος έναντι 60 MWh/έτος της στρατηγικής 2.

Βέβαια, το κέρδος αυτό, από τις ολιγότερες διακοπές πελατών, θα μπορούσε να έχει το τίμημα του σε αυξημένο ρίσκο για την ασφάλεια του συστήματος, παράγοντας που περιγράφεται από τους δείκτες απόκρισης συχνότητας. Εν τούτοις, όπως φαίνεται από τους σημαντικούς δείκτες της ομάδας Β (Πίνακας 4.2), η στρατηγική 3 έχει καλύτερες επιδόσεις έναντι της στρατηγικής 2 στους δείκτες B4, B8, B9 και B13, ενώ έχει χειρότερες στους δείκτες B10 και B11. Οι καλύτερες επιδόσεις αφορούν στην ελάχιστη κατώτατη συχνότητα (48.89Hz έναντι 48.74Hz), στον αναμενόμενο κρίσιμο για το σύστημα χρόνο (0.5 ms έναντι 5.8 ms), στον μέγιστο κρίσιμο για το σύστημα χρόνο (0.32s έναντι 1.48s) και στον αναμενόμενο χρόνο ανάμεσα σε διαδοχικές κρίσιμες βυθίσεις συχνότητας (438000 ώρες έναντι 1232 ώρες). Οι χειρότερες επιδόσεις αφορούν στο συσσωρευμένο κρίσιμο για τους στροβίλους χρόνο (43.5s έναντι 36 s) και στον αναμενόμενο κρίσιμο για τους στροβίλους χρόνο (197.8ms έναντι 161.3ms). Όμως, οι χρόνοι αυτοί δεν κρίνονται επικίνδυνοι δεδομένου ότι ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης είναι πολύ μεγαλύτερος από την διάρκεια ζωής των στροβίλων και οι κρίσιμοι χρόνοι μικρότεροι από τους μέγιστους επιτρεπόμενους που δίνουν οι κατασκευαστές (νομογράφημα 3.5).

Επίσης, ας σημειωθεί ότι, η πιθανότητα αποκοπής φορτίου με την προϋπόθεση ότι υπήρξε απώλεια μονάδας είναι 4.6% στη στρατηγική 3 έναντι 14.1% στην στρατηγική 2. Τα παραπάνω αποτελέσματα συνηγορούν ότι, η στρατηγική 3 υπερτερεί σημαντικά της στρατηγικής 2 τόσο ως προς τον περιορισμό των διακοπών πελατών όσο και ως προς την βελτίωση ασφάλειας λειτουργίας του συστήματος.

Τα πλεονεκτήματα της στρατηγικής 3 οφείλονται στην επιτυχέστερη επιλογή των ρυθμίσεων και ιδιαίτερα στην αξιοποίηση του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3, η ταχεία, αμέσως μετά την διαταραχή, αποκοπή φορτίου συμβάλλει πολύ πιο αποτελεσματικά στην αποκατάσταση της συχνότητας και την ασφάλεια του συστήματος έναντι ισόποσης αποκοπής φορτίου η οποία καθυστερεί ελάχιστα μόλις δευτερόλεπτα. Πράγματι, οι δείκτες C10, C11, C12 του Πίνακα 4.2 αποδεικνύουν ότι, η στρατηγική 3 αξιοποιεί σε μεγάλο βαθμό τον ρυθμό πτώσης της συχνότητας και λιγότερο τη χαμηλή στάθμη συχνότητας. Η αναμενόμενη ετήσια μη διαθέσιμη ενέργεια λόγω λειτουργίας του ρυθμού ανέρχεται σε 15.3MWh/έτος (79.7% της συνολικής μη διαθέσιμης) ενώ λόγω λειτουργίας του πρώτου σταδίου υποσυγνότητας φθάνει μόλις τις 3.9MWh/έτος (20,3% της συνολικής). Αντιθέτως, η στρατηγική 2 στερείται της δυνατότητας αξιοποίησης του ρυθμού λόγω διαφορετικής επιλογής των ρυθμίσεων και η μη διαθέσιμη ενέργεια προέρχεται αποκλειστικά από την λειτουργία των δύο επιπέδων υποσυχνότητας. Από την ανάλυση αυτή γίνεται σαφές ότι, η ρύθμιση με εμπειρικό τρόπο όλων των παραμέτρων των εγκατεστημένων Η/Ν υποσυχνότητας είναι αδύνατον να οδηγήσει στη βέλτιστη για το σύστημα λύση.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.2, η στρατηγική 1 κατά την οποία δεν χρησιμοποιείται η προστασία υποσυχνότητας μπορεί να οδηγήσει σε κινδύνους για την ασφάλεια του συστήματος δεδομένου ότι:

- η μέγιστη βύθιση συχνότητας κατέρχεται στα 48.1Hz (δείκτης B4), συχνότητα που εγγίζει τα επίπεδα ενεργοποίησης της προστασίας υποσυχνότητας των μονάδων και κατά συνέπεια, μπορεί να οδηγήσει σε επιπρόσθετη απώλεια παραγωγής ακόμη και σε black out.
- ο μέγιστος κρίσιμος για το σύστημα χρόνος (δείκτης B9) ανέρχεται σε 19.25s, ενώ στη στρατηγική 3 ήταν μόλις 0.32s.
- ο συσσωρευμένος κρίσιμος για τους στροβίλους χρόνος (δείκτης B10) ανέρχεται σε 190.3s έναντι 36s της στρατηγικής 2 και 43.5s της στρατηγικής 3.

Στο σχήμα 4.6 παρουσιάζονται σε μορφή ιστογράμματος οι κατανομές των κατώτατων τιμών της συχνότητας (f_{under}) για τις στρατηγικές 1 και 3. Η πλειοψηφία των κατώτατων τιμών (περίπου 25%) βρίσκονται στην περιοχή από 49.6Hz έως 49.7Hz. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6, τα ιστογράμματα των δύο στρατηγικών είναι παρόμοια στην ασφαλή περιοχή (συχνότητες άνω των 49Hz), όμως, είναι εντελώς διαφορετικά στην μη ασφαλή περιοχή (συχνότητες κάτω των 49Hz). Ο λόγος είναι ότι, για διαταραχές που οδηγούν σε μικρές βυθίσεις συχνότητας, πάνω από 49Hz, συνήθως δεν ενεργοποιείται η προστασία αποκοπής φορτίου της στρατηγικής 3 και κατά συνέπεια, η συμπεριφορά του συστήματος είναι παρόμοια με εκείνη της στρατηγικής 1 στην οποία δεν υπάρχει προστασία υποσυχνότητας.



Σχήμα 4.6. Ιστόγραμμα εμφάνισης κατώτατων τιμών συχνότητας

Στο ιστόγραμμα του σχήματος 4.7 απεικονίζεται μια τυπική ημέρα αντιστοιχούσα στην στρατηγική 3, δηλαδή παρουσιάζονται οι μέσες κατώτατες τιμές συχνότητας για κάθε ώρα τις ημέρας. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, η πιο κρίσιμη περίοδος της ημέρας κατά την οποία εμφανίζονται οι χαμηλότερες συχνότητες είναι ενωρίς το πρωί. Η μορφή του ιστογράμματος φαίνεται να ακολουθεί την ημερήσια καμπύλη

φορτίου. Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη δεδομένου ότι, απώλεια μιας μονάδας σε περίοδο χαμηλών φορτίων αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής παραγωγής και κατά συνέπεια, προξενεί ισχυρότερη βύθιση συχνότητας.



Σχήμα 4.7. Μέσες κατώτατες τιμές συχνότητας για κάθε ώρα της ημέρας

Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζεται ο ετήσιος αριθμός συμβάντων αποκοπής φορτίου σε συνάρτηση με το μέγεθος του φορτίου αποκοπής για τις στρατηγικές 2 και 3. Στην στρατηγική 2, οι πιο πιθανές τιμές του φορτίου αποκοπής κυμαίνονται στο διάστημα από 17MW έως 25MW, η δε συχνότητα εμφάνισης τους είναι περίπου 1.2 συμβάντα/έτος. Στην στρατηγική 3, η πιο πιθανή τιμή του φορτίου αποκοπής είναι 13MW, η δε συχνότητα εμφάνισης είναι περίπου 1 συμβάν/έτος



Σχήμα 4.8. Ιστόγραμμα εμφάνισης τιμών του φορτίου αποκοπής

Στο σχήμα 4.9 παρουσιάζεται ιστόγραμμα των χρόνων πλήρους αποκατάστασης του φορτίου για τις διακοπές μακράς διάρκειας (μεγαλύτερης των 2 λεπτών). Ο πλέον πιθανός χρόνος πλήρους αποκατάστασης διακοπής πελατών είναι 15 λεπτά για στρεφόμενη εφεδρεία 10% και 12 λεπτά για στρεφόμενη εφεδρεία 15%.



Σχήμα 4.9. Ιστόγραμμα εμφάνισης χρόνων πλήρους αποκατάστασης φορτίου για στρεφόμενη εφεδρεία 10% και 15%

Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσει κανείς ότι, τα υψηλότερα επίπεδα στρεφόμενης εφεδρείας βελτιώνουν τους δείκτες που αφορούν στην μη διαθέσιμη ενέργεια και στην ποιότητα ισχύος, όμως δεν επηρεάζουν σημαντικά τους δείκτες που αφορούν στην ευστάθεια και ασφάλεια του συστήματος. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος για τις στρατηγικές 3 και 4, οι οποίες είναι όμοιες καθ' όλα εκτός από την στρεφόμενη εφεδρεία, η οποία είναι 10% και 15% αντίστοιχα. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.2, η αναμενόμενη ετήσια μη διαθέσιμη ενέργεια C13 είναι 6.2MWh/έτος στη στρατηγική 4 έναντι 19.2MWh/έτος στη στρατηγική 3. Επίσης, ο αναμενόμενος ετήσιος αριθμός προσωρινών διακοπών C14 είναι χαμηλότερος στη στρατηγική 4 σε σχέση με την 3 (35.7 συμβάντα/έτος έναντι 45.6 συμβάντων/έτος). Τέλος, το αναμενόμενο μη διαθέσιμο φορτίο εξ αιτίας των προσωρινών διακοπών C15 είναι μικρότερο στη στρατηγική 4 (4.9 MW/συμβάν).

Η βύθιση συχνότητας εξαρτάται κυρίως από την πρωτεύουσα ρύθμιση των μονάδων και την λειτουργία των Η/Ν υποσυχνότητας ενώ η υπάρχουσα στρεφόμενη εφεδρεία βοηθά κυρίως στην δυνατότητα γρήγορης αποκατάστασης των διακοπών πελατών και επομένως, επηρεάζει την μη διαθέσιμη ενέργεια και την ποιότητα ισχύος. Η οριακή βελτίωση των δεικτών απόκρισης συχνότητας (ομάδα Β) στην στρατηγική 4 οφείλεται στο γεγονός ότι, η απαίτηση για μεγαλύτερη στρεφόμενη εφεδρεία συνεπάγεται, συνήθως, την λειτουργία επιπρόσθετης μονάδας, η οποία συμβάλλει επίσης – μέσω της πρωτεύουσας ρύθμισής της – στην αντίδραση του συστήματος μετά την διαταραχή.

Το μοντέλο των μονάδων παραγωγής που χρησιμοποιήθηκε δεν έχει λάβει υπόψη του τους περιοριστές ισχύος (limiters) των ρυθμιστών φορτίου-συχνότητας των μονάδων. Η παρουσία των limiters, είναι δυνατόν, σε σοβαρές απώλειες παραγωγής, να περιορίσει την ικανότητα των μονάδων για ανάληψη φορτίου. Στις περιπτώσεις αυτές οι μονάδες, κατά το στάδιο της πρωτεύουσας ρύθμισης, θα αναλάβουν λιγότερο φορτίο από εκείνο που προβλέπεται από τον στατισμό τους και κατά συνέπεια, η απόκριση συχνότητας θα είναι χειρότερη της αναμενόμενης.

Η αδυναμία αυτή μπορεί να αρθεί αν οι μονάδες λειτουργούν σε φορτίο χαμηλότερο από το ονομαστικό τους και υπάρχει ικανό περιθώριο για ανάληψη ολόκληρου του επί πλέον φορτίου που θα απαιτηθεί. Αυτό σημαίνει ότι, η στρεφόμενη εφεδρεία δεν είναι συγκεντρωμένη στην μονάδα αιχμής που είναι η πιο αντιοικονομική από τις λειτουργούσες αλλά κατανεμημένη στις περισσότερες ή σε όλες τις Μονάδες του συστήματος. Η στρεφόμενη εφεδρεία αυτού του τύπου ονομάζεται **ρυθμιστική** εφεδρεία και παίζει, ασφαλώς, σημαντικό ρόλο στην ασφάλεια του συστήματος. Όμως, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το κόστος της ρυθμιστικής εφεδρείας είναι πολύ μεγαλύτερο από το κόστος ισόποσης συγκεντρωμένης εφεδρείας δεδομένου ότι το φορτίο που δεν εξυπηρετείται (λόγω κράτησης εφεδρείας) από τις μονάδες βάσης αναλαμβάνεται από την πιο αντιοικονομική μονάδα (αιχμής) που βρίσκεται σε λειτουργία. Το θέμα αυτό διερευνάται διεξοδικά στο κεφάλαιο 5.

Από την εφαρμογή της μεθόδου σε ένα τυπικό σύστημα προκύπτει το συμπέρασμα ότι, περισσότερες διακοπές πελατών από την λειτουργία των Η/Ν υποσυχνότητας δεν οδηγούν αναγκαστικά σε ασφαλέστερη λειτουργία του συστήματος. Επί πλέον, αν η αποκοπή φορτίου είναι υπερβολικά μεγάλη, μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρή υπερσυχνότητα με συνέπεια απώλεια και άλλων μονάδων και αλυσιδωτές διαταραχές στο σύστημα. Η σωστή επιλογή των παραμέτρων των Η/Ν και κυρίως, η αξιοποίηση του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας ώστε η αποκοπή φορτίου να πραγματοποιείται αμέσως μετά την διαταραχή, εξασφαλίζει τα καλύτερα αποτελέσματα.

4.8 Σύγκλιση της Μεθόδου

Στο σημείο αυτό αξίζει να διερευνηθεί η ικανότητα σύγκλισης της μεθόδου και η ταχύτητα με την οποία αυτή καταλήγει στις τελικές τιμές. Τα διαγράμματα των σχημάτων 4.13, 4.14, 4.15 παρουσιάζουν την πορεία σύγκλισης των διαφόρων δεικτών σε συνάρτηση με τα χρόνια προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν στην προσομοίωση του τυπικού συστήματος που αναλύθηκε προηγουμένως για τα δεδομένα της στρατηγικής 3.

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα αυτά, όλοι οι δείκτες δεν παρουσιάζουν την ίδια ταχύτητα σύγκλισης. Κάποιοι από αυτούς όπως οι A1, A2, B6 κλπ συγκλίνουν μέσα σε λίγα σχετικά χρόνια ενώ άλλοι όπως οι B3, B4, B13, C3, C7, C10 κλπ χρειάζονται πολύ περισσότερα. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο, αν λάβει κανείς υπόψη του ότι, όλοι οι δείκτες δεν αφορούν σε γεγονότα ίσης συχνότητας εμφάνισης. Για

παράδειγμα η λειτουργία του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας (δείκτης C7) είναι γεγονός πολύ μικρότερης συχνότητας εμφάνισης σε σχέση με την απώλεια μονάδας (δείκτης A1) δεδομένου ότι μικρό μόνο ποσοστό των 'trip' των μονάδων προξενεί λειτουργία της προστασίας υποσυχνότητας. Κατά συνέπεια, η ταχύτητα σύγκλισης είναι πιο αργή στους δείκτες που αφορούν σε γεγονότα μικρής συχνότητας εμφάνισης.

Στο σχήμα 4.10 παρουσιάζονται τα σχετικά σφάλματα των δεικτών της ομάδας Α σε συνάρτηση με τα χρόνια προσομοίωσης. Μετά από 100 χρόνια προσομοίωσης του συστήματος, το σφάλμα του δείκτη Α1 έχει πέσει στο 5% και το σφάλμα του δείκτη Α2 στο 4.7%.

Αντίστοιχα, στο σχήμα 4.11 παρουσιάζονται τα σχετικά σφάλματα των δεικτών της ομάδας B σε συνάρτηση με τα χρόνια προσομοίωσης. Με εξαίρεση τους δείκτες B8, B9 και B13, οι υπόλοιποι δείκτες εμφανίζουν σφάλμα μικρότερο του 13%, ήδη μετά τα 30 χρόνια προσομοίωσης. Όμως, για την άριστη σύγκλιση τόσο των δεικτών B8, B9, B13, όσο και των υπολοίπων δεκτών της ομάδας B, απαιτούνται 1000 χρόνια προσομοίωσης, οπότε το σφάλμα μειώνεται κάτω από το 1%.

Επίσης, το σχήμα 4.12 παρουσιάζει τα σχετικά σφάλματα των δεικτών της ομάδας C σε συνάρτηση με τα χρόνια προσομοίωσης. Στο διάγραμμα αυτό, είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε ότι, τα σφάλματα των δεικτών εμφανίζουν μια συγχρονισμένη ταλάντωση με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μικρότερες τιμές στα 200 χρόνια προσομοίωσης σε σχέση με τα 300. Στα 300 χρόνια, η μεγαλύτερη τιμή σφάλματος ανέρχεται στο 16.5 % ενώ στα 1000 χρόνια πέφτει κάτω από το 1%.



Χρόνια προσομοίωσης

Σχήμα 4.10. Σχετικό σφάλμα δεικτών ομάδας Α



Χρόνια προσομοίωσης

Σχήμα 4.11. Σχετικό σφάλμα δεικτών ομάδας Β



Σχήμα 4.12 Σχετικό σφάλμα δεικτών ομάδας C



Σχήμα 4.13. Διαγράμματα σύγκλισης δεικτών



Σχήμα 4.14. Διαγράμματα σύγκλισης δεικτών



Σχήμα 4.15. Διαγράμματα σύγκλισης δεικτών

4.9 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

Η προστασία αποκοπής φορτίου και η στρεφόμενη εφεδρεία αποτελούν τους βασικούς μοχλούς μέσω των οποίων ο Διαχειριστής του συστήματος καλείται να επιτύχει ορισμένο επίπεδο ασφάλειας του ηλεκτρικού συστήματος κατά την λειτουργία του. Η βελτίωση της ασφάλειας λειτουργίας μέσω των δύο αυτών μοχλών δεν επιτυγχάνεται, ασφαλώς, χωρίς το ανάλογο τίμημα.

Η αύξηση της στρεφόμενης εφεδρείας συνεπάγεται μεγαλύτερο κόστος λειτουργίας το οποίο ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του συστήματος παραγωγής μπορεί να είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο. Ένα σύστημα με μεγάλες μονάδες παραγωγής σε σχέση με την αιχμή του φορτίου καθώς και με σημαντική διασπορά των τιμών ειδικού κόστους καυσίμου των μονάδων, έχει ως συνέπεια υψηλότερο κόστος στρεφόμενης εφεδρείας. Άρα, η τήρηση στρεφόμενης εφεδρείας έχει μια πολύ σημαντική διάσταση, την οικονομική της πλευρά.

Επίσης, η προστασία αποκοπής φορτίου επιτυγχάνει την οχύρωση του συστήματος με τίμημα τις διακοπές πελατών κάθε φορά που η συχνότητα βυθίζεται. Μια πολύ δραστική προστασία αποκοπής φορτίου η οποία θα προκαλούσε διακοπές ακόμη και σε γεγονότα μικρής βύθισης συχνότητας (π.χ. μόλις στα 49.8 Hz), θα ήταν, ασφαλώς, ευνοϊκή από πλευράς ασφάλειας λειτουργίας, όμως θα επέφερε πολύ συχνές και δυσάρεστες διακοπές πελατών. Το τίμημα, επομένως, στην περίπτωση αυτή είναι η ποιότητα και αξιοπιστία της τροφοδότησης των πελατών.

Επομένως, το βασικό ερώτημα που τίθεται είναι, που βρίσκεται η χρυσή τομή ανάμεσα στην ασφάλεια λειτουργίας από την μία πλευρά και στο κόστος και στην αξιοπιστία τροφοδότησης των πελατών από την άλλη. Πόσο, δηλαδή, αυξάνεται η ασφάλεια του συστήματος όταν η προστασία αποκοπής φορτίου γίνεται πιο δραστική και το μέγεθος της στρεφόμενης εφεδρείας μεγαλύτερο; Είναι γραμμική η σχέση μετάβασης προς την μία ή την άλλη κατεύθυνση;

Η προσέγγιση στα σοβαρά αυτά ζητήματα γίνεται στο παρόν κεφάλαιο μέσα από μια πιθανοτική ανάλυση της λειτουργίας του συστήματος. Προς το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η ακολουθιακή αριθμητική μέθοδος Monte-Carlo για την προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος για ικανό αριθμό ημερολογιακών ετών. Μέσα από την προσομοίωση αυτή παράγονται και υπολογίζονται κατάλληλοι πιθανοτικοί δείκτες αξιοπιστίας και ασφάλειας οι οποίοι ποσοτικοποιούν τόσο το τίμημα όσο και το όφελος που προκύπτουν από κάθε δυνατή επιλογή σε σχέση με την προστασία αποκοπής φορτίου και την στρεφόμενη εφεδρεία.

Το μοντέλο που δημιουργήθηκε προσομοιώνει την λειτουργία του συστήματος σε τρία επίπεδα τα οποία εξελίσσονται σε διαφορετικούς χρονικούς ορίζοντες:

Κατά αρχάς, γίνεται προσομοίωση της ωριαίας λειτουργίας του συστήματος όπως αυτή πραγματοποιείται από το Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας. Η προσομοίωση αυτή περιλαμβάνει την ένταξη και από-ένταξη των διαθέσιμων μονάδων παραγωγής για την ικανοποίηση της ζήτησης φορτίου, την οικονομική κατανομή του φορτίου ανάμεσα στις μονάδες, τον σεβασμό στα τεχνικά τους ελάχιστα και την τήρηση της στρεφόμενης εφεδρείας.

- Παράγονται με τυχαίο τρόπο γεγονότα βλαβών των μονάδων τα οποία ανταποκρίνονται σε δεδομένους ρυθμούς βλαβών. Σε κάθε γεγονός υπολογίζεται η καμπύλη βύθισης συχνότητας μέχρι την ισορρόπησή της στην τελική τιμή λόγω λειτουργίας της πρωτεύουσας ρύθμισης των μονάδων. Παράλληλα, υπολογίζεται η αποκοπή φορτίου από την ενεργοποίηση των ηλεκτρονόμων υποσυχνότητας. Το επίπεδο αυτό λειτουργίας εκτείνεται σε χρονικό ορίζοντα ολίγων δεκάδων δευτερολέπτων.
- Τέλος, σε κάθε γεγονός απώλειας παραγωγής, προσομοιώνονται οι δράσεις που αφορούν στην επαναφορά της συχνότητας στα ονομαστικά επίπεδα και στην αποκατάσταση των διακοπών πελατών που προήλθαν από την λειτουργία της προστασίας αποκοπής φορτίου. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της δευτερεύουσας ρύθμισης και, πιθανόν, της έναρξης μονάδων παραγωγής μικρού χρόνου εκκίνησης. Το επίπεδο αυτό λειτουργίας εκτείνεται σε χρονικό ορίζοντα ολίγων δεκάδων πρώτων λεπτών.

Η προσομοίωση αυτή του συστήματος δίδει την δυνατότητα υπολογισμού πολύ χρήσιμων πιθανοτικών δεικτών, όπως είναι η αναμενόμενη εναπομένουσα συχνότητα μετά από γεγονότα απώλειας παραγωγής, ο αναμενόμενος κρίσιμος για τους στροβίλους και για το σύστημα χρόνος παραμονής της συχνότητας κάτω από ορισμένα επίπεδα, το μέσο αποκοπτόμενο φορτίο από την λειτουργία της προστασίας υποσυχνότητας, ο αναμενόμενος ετήσιος αριθμός λειτουργιών της προστασίας αυτής, η αναμενόμενη μη διαθέσιμη ενέργεια εξ αιτίας της λειτουργίας της προστασίας υποσυχνότητας κλπ.

Σε πολλά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, ελλείψει εναλλακτικού τρόπου, χρησιμοποιείται το ίδιο το σύστημα για την δοκιμή και επιβεβαίωση ή απόρριψη της μιας ή της άλλης στρατηγικής αποκοπής φορτίου και πολιτικής στρεφόμενης εφεδρείας. Μέσα από την εμπειρία της λειτουργίας, την θετική ή αρνητική, γίνονται οι κατάλληλες διορθωτικές κινήσεις και λαμβάνονται οι αποφάσεις σε σχέση με τα κρίσιμα αυτά ζητήματα. Όμως, ο τρόπος αυτός έχει σοβαρά μειονεκτήματα και εμπεριέχει κινδύνους λάθους εκτίμησης δεδομένου ότι τα γεγονότα βύθισης συχνότητας και διακύβευσης της ασφάλειας δεν είναι αρκετά συχνά και επιπλέον το σύστημα αλλάζει συνεχώς και εξελίσσεται και κατά συνέπεια, δεν παρέχεται ικανός χρόνος για την επιβεβαίωση ή μη συγκεκριμένης στρατηγικής.

Απεναντίας, η προσομοίωση ενός συστήματος με την παρούσα του σύνθεση για μεγάλο αριθμό ετών λειτουργίας, της τάξης των χιλιάδων, παρέχει την δυνατότητα εκδήλωσης και ανάλυσης κάθε δυνατού ενδεχόμενου και υπολογισμού των δεικτών οι οποίοι δίδουν την πιθανότητα εμφάνισης των γεγονότων αυτών και των επιπτώσεών τους. Με τον τρόπο αυτό, ο Διαχειριστής του συστήματος μπορεί να δοκιμάσει, εκ του ασφαλούς, κάθε δυνατή προστασία αποκοπής φορτίου και διαφορετική στρεφόμενη εφεδρεία ώστε να επιλέξει εκείνες που εξασφαλίζουν τα απαιτούμενα επίπεδα τιμών των πιθανοτικών δεικτών που εκείνος θεωρεί ικανοποιητικά.

Επίσης, το πρόγραμμα το οποίο αναπτύχθηκε στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, υπολογίζει χρήσιμα ιστογράμματα που αφορούν στις πιθανότητες εμφάνισης των διαφόρων τιμών κατώτατων συχνοτήτων, των τιμών των κατώτατων συχνοτήτων στην διάρκεια μιας τυπικής ημέρας, των διαφόρων τιμών φορτίου αποκοπής πελατών, των χρόνων πλήρους αποκατάστασης διακοπών πελατών κλπ. Παρατηρείται ότι οι

χαμηλότερες τιμές των κατώτατων συχνοτήτων εμφανίζονται την νύκτα και τις πρώτες πρωινές ώρες. Το γεγονός αυτό είναι λογικό, αν σκεφθεί κανείς ότι, η λειτουργία μικρότερου αριθμού μονάδων λόγω χαμηλών φορτίων τις ώρες αυτές, έχει ως αποτέλεσμα, η απώλεια μιας εξ αυτών να αντιστοιχεί, συνήθως, σε μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής παραγωγής και κατά συνέπεια, να προκαλεί ισχυρότερη βύθιση συχνότητας.

Η προσομοίωση απέδειξε επίσης ότι, αυξημένες διακοπές πελατών από μια δραστικότερη προστασία αποκοπής φορτίου δεν εξασφαλίζουν οπωσδήποτε υψηλότερη επίπεδα ασφάλειας. Οι σύγχρονοι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι υποσυχνότητας παρέχουν την δυνατότητα καταμέτρησης και αξιοποίησης όχι μόνο της στιγμιαίας τιμής της συχνότητας αλλά, επίσης, του ρυθμού μεταβολής της, δηλαδή της πρώτης παραγώγου της συχνότητας ως προς τον χρόνο. Η δυνατότητα χρησιμοποίησης του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας για την αποκοπή του φορτίου προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα. Όπως αποδεικνύεται στο κεφάλαιο αυτό, ορισμένη αποκοπή φορτίου που υλοποιείται την στιγμή έναρξης της βύθισης, έχει ως αποτέλεσμα την διατήρηση της συχνότητας σε υψηλότερα επίπεδα έναντι ισόποσης αποκοπής του φορτίου η οποία υλοποιείται λίγο καθυστερημένα με κριτήριο την στιγμιαία τιμή της υποσυχνότητας.

Με την παρούσα προσομοίωση δίδεται η δυνατότητα ποσοτικοποίησης των πλεονεκτημάτων χρησιμοποίησης του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας και επιλογής της βέλτιστης προστασίας από ένα σύνολο εναλλακτικών λύσεων οι οποίες δοκιμάζονται. Οι δυνατές λύσεις είναι πάρα πολλές δεδομένου ότι, κάθε προστασία απαρτίζεται από ένα αριθμό σταδίων λειτουργίας της, κάθε ένα από τα οποία περιλαμβάνει τέσσερις παραμέτρους δηλαδή, την συχνότητα ενεργοποίησης, τον ρυθμό ενεργοποίησης, την χρονική καθυστέρηση απελευθέρωσης της εντολής και το φορτίο προς αποκοπή.

Για την διερεύνηση σύγκλισης της αριθμητικής μεθόδου και του απαιτούμενου αριθμού ετών προσομοίωσης, έχουν σχεδιαστεί τα αντίστοιχα διαγράμματα σύγκλισης των πιθανοτικών δεικτών κατά την εφαρμογή της μεθόδου στο τυπικό σύστημα. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα αυτά, όλοι οι δείκτες δεν παρουσιάζουν ίδια ταχύτητα σύγκλισης. Αυτό είναι αναμενόμενο, αν ληφθεί υπόψη ότι, όλοι οι δείκτες δεν αφορούν σε γεγονότα ίσης συχνότητας εμφάνισης. Επί παραδείγματι, η ενεργοποίηση του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας είναι γεγονός πολύ πιο σπάνιο σε σχέση με τα γεγονότα απώλειας μονάδων παραγωγής. Η μέθοδος παρουσιάζει ικανοποιητικό χρόνο σύγκλισης και μετά από χίλια χρόνια προσομοίωσης, το σχετικό σφάλμα όλων των δεικτών έχει σχεδόν μηδενιστεί (μικρότερο από 1%).



ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Φύσις κρύπτεσθαι φιλεί (Η φύση αγαπά να κρύπτει τα μυστικά της) Ηράκλειτος

5.1 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks ή ANN) είναι εμπνευσμένα από τη βιολογία και αποτελούνται από στοιχεία που ονομάζονται τεχνητοί νευρώνες οι οποίοι συμπεριφέρονται κατά τρόπο ανάλογο των στοιχειωδών λειτουργιών των βιολογικών κυττάρων. Οι τεχνητοί νευρώνες είναι οργανωμένοι κατά τέτοιο τρόπο ώστε να προσομοιώνουν την λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου. Παρά την όχι και τόσο μεγάλη ομοιότητα τους με τον εγκέφαλο, επιτυγχάνουν να προσεγγίσουν σημαντικό αριθμό χαρακτηριστικών της δομής και λειτουργίας του εγκεφάλου. Για παράδειγμα, διαθέτουν μαζική παραλληλία, έχουν κατανεμημένη αναπαράσταση της πληροφορίας, διαθέτουν ικανότητα μάθησης και γενίκευσης με βάση την εμπειρία, έχουν ανοχή στα σφάλματα και μπορούν να επεξεργαστούν μια ομάδα δεδομένων ώστε να ξεχωρίσουν τα ουσιωδέστερα χαρακτηριστικά της. Τα νευρωνικά δίκτυα βρίσκουν ποικιλία εφαρμογών στις μέρες μας, από την πρόβλεψη των ηλεκτρικών φορτίων έως την ανάλυση αξιοπιστίας κατασκευών και την θραυστομηχανική.

Διακρίνονται τρεις κατηγορίες συστημάτων ευφυΐας με ηλεκτρονικούς υπολογιστές, τα συστήματα με κανόνες, τα προσαρμόσιμα συστήματα (adaptive intelligence) και τα υβριδικά συστήματα. Η πληροφορία εξόδου ενός νευρωνικού δικτύου είναι είτε διάνυσμα (vector) είτε δυαδική (binary) είτε ασαφής (fussy) η οποία παρέχει και τον βαθμό αβεβαιότητας. Οι βασικοί παράμετροι σχεδίασης των νευρωνικών δικτύων είναι οι ακόλουθοι:

- Τοπολογία του δικτύου και στρατηγική διασύνδεσης των μονάδων (αρχιτεκτονική)
- ii. Χαρακτηριστικά των μονάδων
- iii. Διαδικασία εκπαίδευσης
- iv. Σύνολα εκπαίδευσης και ελέγχου
- ν. Αναπαράσταση εισόδου/εξόδου, προεπεξεργασία και μετεπεξεργασία

Η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου μπορεί να οριστεί ως η διαδικασία τροποποίησης των βαρών των συνδέσεων ώστε χρησιμοποιώντας το σύνολο δεδομένων (εκπαίδευσης) να πλησιάζουμε σταδιακά την επιθυμητή συμπεριφορά, συγκρίνοντας την τρέχουσα απόκριση του δικτύου με την επιθυμητή.

Με βάση την τοπολογία και δομή των νευρωνικών δικτύων διακρίνονται οι παρακάτω τύποι:

- i. Επαναληπτικά δίκτυα (με συνδέσεις ανάδρασης)
- ii. Δίκτυα εμπρόσθιας τροφοδότησης (feedforward)
- iii. Δίκτυα με δομή επιπέδων ή ιεραρχική
- iv. Δίκτυα με ανταγωνιστικές (competitive) συνδέσεις

Μια σημαντική εφαρμογή των νευρωνικών δικτύων αφορά στην μοντελοποίηση αγνώστων συστημάτων με μη γραμμική συμπεριφορά, χωρίς να είναι απαραίτητη η γνώση κάποιου μαθηματικού μοντέλου. Κάθε δίκτυο χαρακτηρίζεται από μια κατάσταση, ένα σύνολο εισόδων με βάρη που προέρχονται από άλλους νευρώνες και μια ή περισσότερες εξισώσεις που περιγράφουν την δυναμική λειτουργία του. Τα βάρη ανανεώνονται μέσω της διαδικασίας εκπαίδευσης η οποία πραγματοποιείται με την ελαχιστοποίηση κάποιας συνάρτησης κόστους (σφάλματος). Οι βέλτιστες τιμές των βαρών αποθηκεύονται (ως δυνάμεις των διασυνδέσεων μεταξύ των νευρώνων) και χρησιμοποιούνται κατά την εκτέλεση της εργασίας για την οποία προορίζεται το νευρωνικό δίκτυο.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1, ο τεχνητός νευρώνας αποτελείται από ένα σύνολο κλάδων διασύνδεσης, ένα κόμβο άθροισης και μια συνάρτηση μεταφοράς ή ενεργοποίησης (μη γραμμικότητα). Ο αλγόριθμος εκπαίδευσης αποτελείται από ένα προκαθορισμένο σύνολο κανόνων που σκοπό έχουν την επίλυση του προβλήματος εκπαίδευσης. Στα προβλήματα μοντελοποίησης με επιθυμητά ζεύγη εισόδου-εξόδου βρίσκει εφαρμογή η επιβλεπόμενη μάθηση. Μια κατηγορία δικτύων που συχνά χρησιμοποιείται στην πράξη είναι το πολυεπίπεδο percepton του οποίου η εκπαίδευση πραγματοποιείται μέσω του αλγόριθμου ανάστροφης διάδοσης του σφάλματος (backpropagation learning).



Σχήμα 5.1. Δομή του j νευρώνα εξόδου νευρωνικού δικτύου

Αλγόριθμος εκπαίδευσης μέσω ανάστροφης διάδοσης σφάλματος

Ένα σύνολο εκπαίδευσης αποτελείται από N ζεύγη της μορφής $[\vec{x}, d]$, όπου \vec{x} το διάνυσμα εισόδου (πρότυπο) και \vec{d} το διάνυσμα των επιθυμητών εξόδων, όταν εφαρμοστεί ως είσοδος το πρότυπο \vec{x} . Το σφάλμα στην έξοδο του τυχαίου νευρώνα j, ο οποίος είναι κόμβος εξόδου, κατά την n-οστή επανάληψη, δίδεται από την σχέση $e_j(n)=d_j(n)-y_j(n)$, όπου d_j και y_j είναι αντίστοιχα η επιθυμητή και η πραγματική έξοδος του νευρώνα j όταν εφαρμόζεται η x(n), {n=1,...N}

Η μέση τιμή των σφαλμάτων για όλα τα N πρότυπα E_{av} ορίζεται από την σχέση 5.1 και η εκπαίδευση έχει σκοπό την ελαχιστοποίηση της τιμής αυτής. Για τον λόγο αυτό εφαρμόζεται μια διαδικασία, όπου τα βάρη w_{ji} ενημερώνονται μετά την εφαρμογή κάθε προτύπου, σύμφωνα με τα σφάλματα που παρουσιάζονται.

$$E_{av} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} E(n) = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^{N} \sum_{j \in C} e^{2}(n)$$
(5.1)

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1, ο νευρώνας j τροφοδοτείται από τις εξόδους των νευρώνων του προηγουμένου επιπέδου. Επομένως, η έξοδος $u_j(n)$ δίδεται από την σχέση 5.2, όπου p είναι το σύνολο των νευρώνων του προηγουμένου επιπέδου. Το βάρος w_{j0} είναι η πόλωση και αντιστοιχεί σε εξωτερική είσοδο y_0 =-1. Η έξοδος $y_j(n)$ του νευρώνα j, κατά την επανάληψη n, δίδεται από την σχέση 5.3.

$$u_{j}(n) = \sum_{i=0}^{p} w_{ji}(n) y_{i}(n)$$
(5.2)

$$y_{j}(n) = f(u_{j}(n))$$
 (5.3)

Σε κάθε επανάληψη, ο αλγόριθμος εκπαίδευσης προχωρεί σε διόρθωση των βαρών όλων των νευρώνων. Ανάλογα με την θέση κάθε νευρώνα, ισχύει μία από τις παρακάτω δύο περιπτώσεις :

a. Εάν πρόκειται για νευρώνα εξόδου, τότε η επιθυμητή έξοδος είναι γνωστή και κατά συνέπεια, είναι άμεσα υπολογίσιμη η τιμή του σφάλματος e_j(n). Σε κάθε επανάληψη, η διόρθωση Δw_{ji}(n) του βάρους w_{ji}(n) δίδεται με βάση τον κανόνα δέλτα, από την σχέση 5.4, όπου δj(n) είναι η τοπική κλίση, η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση 5.5 και η ο ρυθμός μάθησης.

$$\Delta w_{Ji}(n) = \eta \cdot \delta_{j}(n) \cdot y_{i}(n)$$
(5.4)

$$\delta_{j}(n) = -\frac{\partial E(n)}{\partial e_{j}(n)} \cdot \frac{\partial e_{j}(n)}{\partial y_{j}(n)} \cdot \frac{\partial y_{j}(n)}{\partial u_{j}(n)} = e_{j}(n) \cdot f'(u_{j}(n))$$
(5.5)

b. Εάν ο νευρώνας είναι εσωτερικός, η τιμή του σφάλματος δεν είναι άμεσα υπολογίσιμη αλλά προκύπτει αναδρομικά σε συνάρτηση με τα σφάλματα των νευρώνων με τους οποίους ο υπόψη νευρώνας έχει απευθείας σύνδεση. Συγκεκριμένα, για το τον νευρώνα i του πρώτου κρυμμένου επιπέδου από το επίπεδο εξόδου, η διόρθωση Δw_{il}(n) δίδεται από την σχέση 5.6, όπου η τοπική κλίση δ_i(n) ορίζεται από την εξίσωση (5.7). Η κλίση, δηλαδή, εξαρτάται τόσο από τη συνάρτηση ενεργοποίησης του συγκεκριμένου νευρώνα όσο και από το άθροισμα των γινομένων των τοπικών κλίσεων του επόμενου επιπέδου με τα αντίστοιχα βάρη που συνδέουν τον νευρώνα i με το επίπεδο αυτό.

$$\Delta w_{il}(n) = \eta \cdot \delta_i(n) \cdot y_l(n) \tag{5.6}$$

$$\delta_j(n) = f'(u_j(n)) \cdot \sum_j \delta_j(n) \cdot w_{jl}(n)$$
(5.7)

Κατά την εφαρμογή του αλγόριθμου ανάστροφης διάδοσης σφάλματος ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα :

- i. Αρχικοποίηση των βαρών και πολώσεων με τυχαίες τιμές στο διάστημα [-1, 1].
- ii. Διέλευση ορθής φοράς (forward pass) για τον υπολογισμό των εξόδων όλων των νευρώνων. Στην φάση αυτή τα βάρη παραμένουν αναλλοίωτα και η έξοδος κάθε νευρώνα υπολογίζεται με βάση τις εξισώσεις 5.3 και 5.8. Οι υπολογισμοί ξεκινούν από το επίπεδο εισόδου και προχωρούν σταδιακά μέχρι το επίπεδο εξόδου.

$$u_{i}(n) = \sum_{l=0}^{q} w_{il}(n) \cdot y_{l}(n)$$
(5.8)

iii. Διέλευση αντίστροφης φοράς (reverse pass) ξεκινώντας από το επίπεδο εξόδου και προχωρώντας βήμα-βήμα προς τα πίσω. Υπολογίζονται οι τιμές της τοπικής κλίσης κάθε νευρώνα και αναπροσαρμόζονται τα βάρη σύμφωνα με τον κανόνα δέλτα που αναπτύχθηκε προηγουμένως.

Η ανωτέρω διαδικασία των δύο διελεύσεων εκτελείται για κάθε πρότυπο του συνόλου εκπαίδευσης. Όταν εκτελεστεί το σύνολο των προτύπων εκπαίδευσης, έχει πραγματοποιηθεί μια εποχή (epoch). Κατά την συνολική διαδικασία εκπαίδευσης

εκτελούνται επαναλήψεις των εποχών, μέχρις ότου τα βάρη του δικτύου σταθεροποιηθούν σε συγκεκριμένες τιμές και το δίκτυο οδηγηθεί σε σύγκλιση της μέσης τιμής των σφαλμάτων για όλα τα πρότυπα εκπαίδευσης.

Ασφαλώς, για να υπολογιστεί η τοπική κλίση είναι απαραίτητο η συνάρτηση ενεργοποίησης να είναι συνεχής και παραγωγίσιμη. Προς τον σκοπό αυτό, συνήθεις συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται είναι η λογιστική, η υπερβολική εφαπτομένη και η γραμμική συνάρτηση. Για να αποφευχθεί το πρόβλημα κορεσμού των τιμών της συνάρτησης ενεργοποίησης, οι είσοδοι x κανονικοποιούνται, ώστε να λαμβάνουν τιμές σε προκαθορισμένο διάστημα τιμών [x_{min}, x_{max}].

Ανάλογα με την μέθοδο αναπροσαρμογής των βαρών διακρίνονται δύο τύποι εκπαίδευσης, ανά πρότυπο και ανά εποχή. Στην πρώτη περίπτωση τα βάρη αναπροσαρμόζονται μετά την εφαρμογή κάθε προτύπου. Στην δεύτερη περίπτωση (match mode) τα βάρη ενημερώνονται έπειτα από την παρουσίαση στο δίκτυο του συνόλου των προτύπων της εποχής. Γι κάθε εποχή υπολογίζεται η μέση τιμή των τετραγώνων των σφαλμάτων σύμφωνα με την σχέση 5.1.

Ο αλγόριθμος της ανάστροφης διάδοσης σφάλματος γενικά δεν συγκλίνει και στην πράξη χρησιμοποιούνται ορισμένα κριτήρια τερματισμού της διαδικασίας. Επίσης, συχνά χρησιμοποιείται ένα ανεξάρτητο σύνολο αξιολόγησης (validation set) το οποίο δεν έχει χρησιμοποιηθεί κατά την διαδικασία εκπαίδευσης. Το σύνολο αυτό αξιοποιείται για την αξιολόγηση διάφορων τεχνητών νευρωνικών δικτύων και την επιλογή του βέλτιστου για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος.

5.2 Αντίστροφο Πρόβλημα

Στο τέταρτο κεφάλαιο έγινε πιθανοτική ανάλυση του προβλήματος επιλογής των ρυθμίσεων της προστασίας υποσυχνότητας καθώς και της τηρούμενης στρεφόμενης εφεδρείας. Η επιλογή αυτή πραγματοποιείται μέσα από ένα σύνολο εναλλακτικών λύσεων με κριτήριο την ικανοποίηση σημαντικών δεικτών που αφορούν στην ασφάλεια του συστήματος (απόκριση συχνότητας) και στην ποιότητα της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος (αποκοπή φορτίου). Στο διάγραμμα 5.2 παρουσιάζεται σχηματικά η αναπτυχθείσα μέθοδος για τον υπολογισμό των δεικτών, όπου είσοδοι είναι τα δεδομένα του συστήματος, η στρατηγική αποκοπής φορτίου και η τηρούμενη στρεφόμενη εφεδρεία, ενώ έξοδοι είναι οι δείκτες απόκρισης συχνότητας και οι δείκτες αποκοπής φορτίου. Η μέθοδος αυτή θα ονομάζεται στο εξής υπολογιστική μέθοδος για διάκριση από την μεθοδολογία που θα αναπτυχθεί παρακάτω και η οποία χρησιμοποιεί την υπολογιστική μέθοδο.



Σχήμα 5.2. Δομικό διάγραμμα υπολογιστικής μεθόδου

Θεωρώντας ότι το σύστημα παραμένει σταθερό και επιλέγοντας συγκεκριμένη στρεφόμενη εφεδρεία, το πρόβλημα απλοποιείται σε εκείνο του σχήματος 5.3.



Σχήμα 5.2 Απλοποιημένο διάγραμμα

Το διάγραμμα του σχήματος 5.3 βοηθά στη διατύπωση δύο αντίστροφων προβλημάτων, τα οποία παρουσιάζουν σημαντικό ενδιαφέρον στη πράξη. Τα προβλήματα αυτά προκύπτουν από κυκλική εναλλαγή εισόδων και εξόδων, όπως φαίνεται στα σχήματα 5.4 - 5.4 και η διατύπωσή τους είναι η εξής :

- Αντίστροφο Πρόβλημα 1° (ΑΠ1): Με δεδομένους τους επιθυμητούς δείκτες της ομάδας Β που αφορούν στην απόκριση συχνότητας (π.χ. ελάχιστη κατώτατη συχνότητα, αναμενόμενος κρίσιμος για το σύστημα χρόνος κλπ) ποια είναι η κατάλληλη στρατηγική και τι δείκτες αποκοπής φορτίου συνεπάγεται η εφαρμογή της;
- Αντίστροφο πρόβλημα 2° (ΑΠ2): Με δεδομένους τους επιθυμητούς δείκτες της ομάδας C που αφορούν στη αποκοπή φορτίου (π.χ. μέσο αποκοπτόμενο φορτίο, αναμενόμενος χρόνος ανάμεσα σε διαδοχικά συμβάντα αποκοπής φορτίου κλπ) ποια είναι η κατάλληλη στρατηγική και τι δείκτες απόκρισης συχνότητας αυτή συνεπάγεται;



Σχήμα 5.4 Πρώτο αντίστροφο πρόβλημα



Σχήμα 5.5 Δεύτερο αντίστροφο πρόβλημα

5.3 Κατάστρωση του προβλήματος

Όπως αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 4.4, κάθε στρατηγική αποκοπής φορτίου περιλαμβάνει ένα αριθμό από στάδια n, κάθε ένα από τα οποία ορίζεται από τις ακόλουθες μεταβλητές :

- επίπεδο υποσυχνότητας (f)
- ρυθμός μεταβολής της συχνότητας (df/dt)
- χρονική καθυστέρηση (t)
- φορτίο αποκοπής (P)

Άρα, κάθε στρατηγική S εκφράζεται μονοσήμαντα από ένα Πίνακα S, διαστάσεων 4xn, όπως περιγράφεται στην εξ. (5.9).

$$S = \begin{bmatrix} f_1 & f_2 & \dots & f_n \\ \left(\frac{df}{dt}\right)_1 & \left(\frac{df}{dt}\right)_2 & \dots & \left(\frac{df}{dt}\right)_n \\ t_1 & t_2 & \dots & t_n \\ P_1 & P_2 & \dots & P_n \end{bmatrix}$$
(5.9)

Ο Πίνακας S μπορεί εύκολα να μετασχηματιστεί στο διάνυσμα I_s , στο οποίο όλες οι γραμμές του Πίνακα S έχουν γίνει στήλες και έχουν τοποθετηθεί κατά διαδοχική σειρά (εξ. 5.10).

$$I_{S} = \left[f_{1} \ f_{2} \ \dots \ f_{n} \left(\frac{df}{dt}\right)_{1} \left(\frac{df}{dt}\right)_{2} \ \dots \ \left(\frac{df}{dt}\right)_{n} t_{1} t_{2} \ \dots \ t_{n} P_{1} P_{2} \ \dots \ P_{n}\right]^{T}$$
(5.10)

Με παρόμοιο τρόπο, είναι δυνατόν, οι δείκτες που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4.5 να εκφραστούν υπό την μορφή διανυσμάτων. Οι δείκτες της ομάδας B συγκροτούν το διάνυσμα I_B και οι δείκτες τις ομάδας C συγκροτούν το διάνυσμα I_{C_1} τα οποία εκφράζονται από τις σχέσεις (5.11, 5.12).

$$I_B = [B1 \ B2 \dots B13]^T$$
(5.11)

$$I_C = [C1 \ C2 \dots C16]^T$$
(5.12)

Αριθμητικοί περιορισμοί

Το πρόβλημα απλοποιείται αν ληφθούν υπόψη ορισμένοι ρεαλιστικοί, αριθμητικοί περιορισμοί. Το πλήθος n των σταδίων λειτουργίας των Η/Ν υποσυχνότητας είναι ένας θετικός ακέραιος αριθμός, του οποίου η μέγιστη τιμή δεν υπερβαίνει το 3. Πράγματι, δεν έχει νόημα να θέσει κανείς 5 ή 7 στάδια λειτουργίας των Η/Ν γιατί αυτό σημαίνει ότι τα στάδια θα βρίσκονται πολύ κοντά το ένα με το άλλο και άρα, στη πράξη, δεν θα υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ τους. Το πλήθος των τριών σταδίων μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ικανοποιητικό ανώτατο όριο. Άρα, ο περιορισμός που αφορά στο πλήθος των σταδίων εκφράζεται από την σχέση (5.13).

$$1 \le n \le 3$$
 $n \in N$ $\dot{\eta}$ $n = 1, 2, 3$ (5.13)

Για n=3, η σχέση (5.10) μετατρέπεται στην (5.14)

$$I_{S} = \begin{bmatrix} f_{1} \ f_{2} \ f_{3} \left(\frac{df}{dt}\right)_{1} \left(\frac{df}{dt}\right)_{2} \left(\frac{df}{dt}\right)_{3} t_{1} \ t_{2} \ t_{3} \ P_{1} \ P_{2} \ P_{3} \end{bmatrix}^{T}$$
(5.14)

Επίσης, ας ληφθεί υπόψη ότι, τα ίδια τα στοιχεία του διανύσματος I_s δεν λαμβάνουν οποιεσδήποτε τιμές αλλά τιμές ρεαλιστικές για τις εξεταζόμενες συνθήκες που κυμαίνονται μέσα σε προβλεπόμενα διαστήματα τιμών.

Ως γνωστόν, τα στοιχεία f_1 , f_2 , f_3 του διανύσματος I_S εκφράζουν τα επίπεδα υποσυχνότητας στα οποία ρυθμίζεται η ενεργοποίηση της προστασίας και είναι λογικό οι τιμές που λαμβάνουν να κείνται ανάμεσα σε κάποια όρια f_{min} και f_{max} Συνήθεις τιμές για τα όρια αυτά είναι f_{min} =48Hz και f_{max} =50Hz. Άρα, ισχύει ο περιορισμός (5.15).

$$f_{\min} \le f_1, f_2, f_3 \le f_{\max}$$
(5.15)

Τα στοιχεία $(df/dt)_1$, $(df/dt)_2$, $(df/dt)_3$ εκφράζουν τους ρυθμούς μεταβολής της συχνότητας για τους οποίους είναι επιθυμητή η ενεργοποίηση της προστασίας

αποκοπής φορτίου και οι ρεαλιστικές τιμές τους δεν υπερβαίνουν τα 1.5Hz/s. Γενικά, ισχύει ο περιορισμός (5.16).

$$\left(\frac{df}{dt}\right)_{\min} \le \left(\frac{df}{dt}\right)_{1}, \left(\frac{df}{dt}\right)_{2}, \left(\frac{df}{dt}\right)_{3} \le \left(\frac{df}{dt}\right)_{\max}$$
(5.16)

Επίσης, τα στοιχεία t_1 , t_2 , t_3 εκφράζουν τους χρόνους καθυστέρησης μέχρι την απελευθέρωση της εντολής trip από τους H/N και οι τιμές τους είναι, συνήθως, μικρότερες από 0.4s. Γενικά, ισχύει ο περιορισμός (5.17).

$$t_{\min} \le t_1, t_2, t_3 \le t_{\max} \tag{5.17}$$

Τέλος, τα στοιχεία P_1 , P_2 , P_3 εκφράζουν τα φορτία αποκοπής για κάθε ένα από τα τρία στάδια λειτουργίας της προστασίας υποσυχνότητας και είναι λογικό οι τιμές τους να οριστούν μικρότερες του 30% του συνολικού φορτίου συστήματος. Γενικά, ισχύει ο περιορισμός (5.18).

$$P_{\min} \le P_1, P_2, P_3 \le P_{\max}$$
(5.18)

Κατά την διατύπωση των δύο αντίστροφων προβλημάτων, οι δείκτες των ομάδων Β και C λαμβάνουν αντίστοιχα γνωστές επιθυμητές τιμές, οι οποίες αποτελούν τα κριτήρια που πρέπει να ικανοποιούνται από την ζητούμενη στρατηγική. Βέβαια, οι 13 δείκτες της ομάδας Β και οι 16 της ομάδας C συνιστούν ένα πολυπληθές σύνολο κριτηρίων που στην πράξη, συνήθως, δεν είναι εύχρηστο και αναγκαίο. Πέραν τούτου, πολλά από τα κριτήρια αυτά είναι αλληλο-συσχετιζόμενα, γεγονός που σημαίνει ότι η ικανοποίηση του ενός συνεπάγεται αντίστοιχη ικανοποίηση του άλλου. Για τον λόγο αυτό επιλέγονται 4 σημαντικοί δείκτες της ομάδας Β και οι άλλου. Για τον λόγο αυτό επιλέγονται 4 σημαντικοί δείκτες της ομάδας σορά η ζητούμενη στρατηγική. Τα διανύσματα I_B, I_C μετατρέπονται σε I*_B, I*_C και οι σχέσεις 5.11, 5.12 μετασχηματίζονται στις 5.19, 5.20. Επομένως, το διάγραμμα του σχήματος 5.2

$$I *_{B} = [Bi \ Bj \ Bm \ Bn]^{T}$$

$$I *_{C} = [Co \ Cp \ Cq \ Cr]^{T}$$
(5.19)
(5.20)



Σχήμα 5.6 Νέα διατύπωση της υπάρχουσας υπολογιστικής μεθόδου

5.4 Διαδικασία επίλυσης

Λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς των εξ. (5.13 - 5.18), στους οποίους υπόκεινται οι μεταβλητές κάθε στρατηγικής I_{S} είναι δυνατόν να δημιουργηθούν με στατιστικά τυχαίο τρόπο οσεσδήποτε τυχαίες στρατηγικές. Αυτό γίνεται εφικτό, παράγοντας διαδοχικά τυχαίους αριθμούς που θα ικανοποιούν τους παραπάνω περιορισμούς και θα αποδίδονται στις υπόψη μεταβλητές, δηλαδή στα στοιχεία του διανύσματος I_{S} .

Μετά την δημιουργία κάθε στρατηγικής, η υπολογιστική μέθοδος του σχήματος 4.1.5 μπορεί να υπολογίσει τους αντίστοιχους δείκτες, δηλαδή τα διανύσματα I_B^* και I_C^* . Με τον τρόπο αυτό, δημιουργείται κάθε φορά μια απεικόνιση του διανύσματος εισόδου I_S^* στις αντίστοιχες εξόδους I_B^* και I_C^* (σχέση 5.21) και παράγεται ένα **πρότυπο** { I_S , I_B , I_C }.

$$\{I^*{}_S\} \leftrightarrow \{I^*{}_B, I^*{}_C\}$$

$$(5.21)$$

Έχοντας δημιουργήσει ένα ικανό σύνολο προτύπων, είναι δυνατόν να σχεδιαστεί ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (ANN), το οποίο θα εκπαιδευτεί κατά την αντίστροφη φορά δηλαδή με είσοδο το διάνυσμα I_B^* και εξόδους τα I_S^* και I_C^* . Στόχος είναι η δημιουργία κατάλληλου νευρωνικού το οποίο λαμβάνοντας ως εισόδους τα κριτήρια I_B^* θα είναι σε θέση να υπολογίζει την επιθυμητή στρατηγική I_S^* και τους δείκτες I_C^* που αυτή συνεπάγεται, σύμφωνα με την απεικόνιση (5.22). Κατά παρόμοιο τρόπο, μπορεί να δημιουργηθεί αντίστοιχο νευρωνικό δίκτυο που θα λαμβάνει ως εισόδους τα κριτήρια I_C και θα υπολογίζει την επιθυμητή στρατηγική I_S και τους δείκτες I_B που αυτή συνεπάγεται, σύμφωνα με την απεικόνιση (5.23).

$$\{I^*{}_B\} \leftrightarrow \{I^*{}_S, I^*{}_C\}$$

$$(5.22)$$

$$\{I^*_C\} \leftrightarrow \{I^*_S, I^*_B\}$$

$$(5.23)$$

Κάθε νέο σύνολο κριτηρίων δεν αποτελεί οπωσδήποτε και αποδεκτό σύνολο κριτηρίων δεδομένου ότι οι δείκτες δεν είναι στατιστικά ανεξάρτητοι αλλά αλληλοσχετιζόμενοι. Για τον λόγο αυτό πρέπει τα κριτήρια αυτά να εξεταστούν ως προς την συμβατότητα τους.

Κατά συνέπεια, το μοντέλο μας αποτελείται από τρία δομικά στοιχεία, την γεννήτρια των προτύπων, τον στατιστικό επεξεργαστή και τα νευρωνικά δίκτυα, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7 Δομικά στοιχεία του μοντέλου

Γεννήτρια προτύπων

Στο σχήμα 5.8 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου υπολογισμού των προτύπων, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια γα την εκπαίδευση των δύο νευρωνικών δικτύων. Τα βήματα που ακολουθεί ο αλγόριθμος είναι τα ακόλουθα :

- Κατά αρχάς δημιουργείται μια τυχαία στρατηγικής {I*s}_i. Η στρατηγική αυτή μπορεί να διαθέτει ένα, δύο ή τρία στάδια λειτουργίας των Η/Ν, καθώς επίσης κάθε στάδιο μπορεί να αξιοποιεί ή μη τον ρυθμό μεταβολής της συχνότητας (df/dt). Αυτό επιτυγχάνεται με τα ακόλουθα τρία επί μέρους βήματα :
 - Παράγεται με ίσες πιθανότητες ο τυχαίος αριθμός 1 ή 2 ή 3, ο οποίος αποφασίζει για το πλήθος των σταδίων της στρατηγικής.
 - Στη συνέχεια για κάθε στάδιο, παράγεται εκ νέου τυχαίος αριθμός 0 ή
 1, ο οποίος προσδιορίζει αν το στάδιο αυτό θα είναι εφοδιασμένο ή μη
 με τον ρυθμό df/dt.
 - Για κάθε ένα από τα στάδια, τα οποία αποφασίστηκαν, προσδιορίζονται πάλι με την δημιουργία τυχαίων αριθμών οι τιμές των παραμέτρων της στρατηγικής, δηλαδή οι τιμές του διανύσματος {I*s}_i.
 Οι τυχαίοι αυτοί αριθμοί εξάγονται από ομοιόμορφες κατανομές αριθμών που σέβονται τους αντίστοιχους περιορισμούς των εξ. (5.13 -5.18).

- Μετά την δημιουργία της τυχαίας στρατηγικής, χρησιμοποιείται η υπολογιστική μέθοδος για τον προσδιορισμό των δεικτών απόκρισης συχνότητας {I*_B}_i και των δεικτών αποκοπής φορτίου {I*_C}_i.
- Στη συνέχεια αποθηκεύονται οι παράμετροι της υπόψη στρατηγικής $\{I^*s\}_i$ καθώς και οι δείκτες των διανυσμάτων $\{I^*B\}_i$ και $\{I^*C\}_i$ που από κοινού συγκροτούν το υπ αριθμόν i πρότυπο.
- Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται αρκετές φορές για την δημιουργία του επιθυμητού πλήθους προτύπων.



Σχήμα 5.8 Διάγραμμα ροής αλγορίθμου της γεννήτριας προτύπων

Σχεδιασμός των νευρωνικών δικτύων

Ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο προσδιορίζεται από τον αλγόριθμο εκπαίδευσης, την αρχιτεκτονική του και τις συναρτήσεις μεταφοράς. Ένας τύπος νευρωνικού δικτύου που συχνά χρησιμοποιείται στην πράξη για την επίλυση τεχνικών προβλημάτων είναι το πολύ-επίπεδο νευρωνικό δίκτυο με αλγόριθμο εκπαίδευσης τον back propagation (μεταφορά του σφάλματος προς τα πίσω) [49-54]. Η πολυπλοκότητα του τύπου αυτού νευρωνικού δικτύου εξαρτάται από τον αριθμό των κρυμμένων επιπέδων και το πλήθος των νευρώνων σε κάθε επίπεδο. Δεν υπάρχει γενικός κανόνας σχεδιασμού ενός νευρωνικού δικτύου για την επίλυση συγκεκριμένου προβλήματος. Προς τον σκοπό αυτό επιστρατεύεται η υπάρχουσα εμπειρία ενώ δια της μεθόδου δοκιμής και σφάλματος μπορούν να επιλεχθούν κατάλληλες τιμές των διαφόρων παραμέτρων του νευρωνικού δικτύου.

Το σχήμα 5.9 παρουσιάζει το δομικό διάγραμμα του νευρωνικού δικτύου ANN1 που χρησιμοποιείται για την επίλυση του πρώτου αντίστροφου προβλήματος. Το νευρωνικό αυτό αντιστοιχίζει μονοσήμαντα x διαφορετικά διανύσματα I*_B του συνόλου εκπαίδευσης τα οποία αποτελούν τα πρότυπα ή κλάσεις σε μια δυαδική έξοδο η οποία απαρτίζεται από z ψηφία, όπως απεικονίζεται παρακάτω:

 $(I^*{}_B)_1 \leftrightarrow 0_1 0_2 \cdots 0_{z-1} 1_z = D_1$ $(I^*{}_B)_2 \leftrightarrow 0_1 0_2 \cdots 1_{z-1} 0_z = D_2$ $\dots \dots \dots$ $(I^*{}_B)_x \leftrightarrow 1_1 1_2 \cdots 1_{z-1} 1_z = D_x$

Κάθε ένα από τα z ψηφία της δυαδικής εξόδου λαμβάνει τιμή 0 ή 1. Κατά συνέπεια, ο δυαδικός αριθμός που περιλαμβάνει z ψηφία μπορεί να λάβει 2^z διαφορετικές τιμές. Κάθε μια από τις τιμές αυτές αποτελεί την ταυτότητα $D_j (1 <= j <= x)$ μια διαφορετικής κλάσης $I^*{}_B$ από τις συνολικά x κλάσεις που περιλαμβάνει το σύνολο εκπαίδευσης. Επομένως, προκειμένου να υπάρχει μονοσήμαντη αντιστοιχία μεταξύ των ταυτοτήτων D_j και των διανυσμάτων των κλάσεων $I^*{}_B$, οι αριθμοί x και z πρέπει να έχουν ειδική σχέση μεταξύ τους, δηλαδή πρέπει $x=2^z$. Για παράδειγμα, εάν z=11, τότε το x πρέπει να είναι 2048 δεδομένου ότι ο μεγαλύτερος 11ψήφιος δυαδικός αριθμός είναι 2047 και περιλαμβανομένου και του μηδενός δίδει 2048 αριθμούς. Κάθε νέο διάνυσμα $I^*{}_B$ ταξινομείται από το νευρωνικό δίκτυο σε μια από τις υπάρχουσες ταυτότητες, η οποία αντιστοιχεί σε κάποιο διάνυσμα $I^*{}_B$ το οποίο συνοδεύεται από τα αντίστοιχα διανύσματα $I^*{}_S$ και $I^*{}_C$.

Ο προτεινόμενος τύπος νευρωνικού δικτύου (δυαδικής απεικόνισης) επιτυγχάνει πολύ καλύτερη απόδοση σε σχέση με τον συνηθισμένο τύπο πολύ-επίπεδου νευρωνικού δικτύου. Αυτό συμβαίνει επειδή στο εξεταζόμενο πρόβλημα, ο αριθμός των εξόδων είναι πολύ μεγαλύτερος από τον αριθμό των εισόδων και επιπλέον, όλες οι είσοδοι και έξοδοι δεν είναι στατιστικά ανεξάρτητες μεταξύ τους. Πράγματι, ο αριθμός των εισόδων είναι 4, όσα δηλαδή τα στοιχεία του διανύσματος I_B^* ενώ ο αριθμός των εξόδων εξόδων είναι 16, όσα δηλαδή τα συνολικά στοιχεία των διανυσμάτων I_S^* και I_C^* .

Το νευρωνικό δίκτυο αποτελείται από δύο επίπεδα. Το δεύτερο επίπεδο περιλαμβάνει z νευρώνες όσα τα ψηφία (bits) της ψηφιακής εξόδου. Μετά από δοκιμή και σφάλμα υπολογίζεται ότι ο βέλτιστος αριθμός νευρώνων του πρώτου επιπέδου ισούται με (1/3) x. Ως συνάρτηση μεταφοράς και για τα δύο επίπεδα ορίζεται η "logsigmoid". Για την καλύτερη απόδοση του νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιείται προεπεξεργαστής ο οποίος μετασχηματίζει γραμμικά το υπάρχον πεδίο ορισμού των εισόδων Ι*_B στο διάστημα [-1, 1]. Για την επίλυση του δευτέρου αντιστρόφου προβλήματος σχεδιάζεται ένα ανάλογο νευρωνικό δίκτυο ANN2.



Σχήμα 5.9 Αρχιτεκτονική ANN1 για το πρώτο αντίστροφο πρόβλημα

Στατιστικός επεξεργαστής

Κάθε νέο διάνυσμα I_B^* ή I_C^* δεν αποτελεί αποδεκτό σύνολο κριτηρίων καθώς οι περισσότεροι από τους δείκτες που περιλαμβάνονται στα διανύσματα αυτά δεν είναι στατιστικά ανεξάρτητοι. Αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη όταν ένα νέο σύνολο κριτηρίων πρέπει να οριστεί. Η στατιστική επεξεργασία των προτύπων που παρήχθησαν από την γεννήτρια προτύπων και ιδιαίτερα τα διαγράμματα "scatter" αποκαλύπτουν τις συσχετίσεις μεταξύ των διαφόρων δεικτών. Τα διαγράμματα αυτά παρέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες ώστε να επιλεγούν σωστά τα σύνολα των κριτηρίων, όπως αποσαφηνίζεται πλήρως στην εφαρμογή που ακολουθεί (παράγραφος 5.5).

Πλήρες μοντέλο

To διάγραμμα του σχήματος 5.10 παρουσιάζει το πλήρες μοντέλο της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε. Τα διπλά βέλη αντιστοιχούν στην φάση εκπαίδευσης, τα μονά βέλη στην φάση προσομοίωσης και οι διακεκομμένες γραμμές στην φάση επιλογής των κριτηρίων. Η γεννήτρια προτύπων χρησιμοποιεί την υπολογιστική μέθοδο για να παράγει ένα σύνολο προτύπων $\{I^*s, I^*b, I^*c\}$ το οποίο διαιρείται στο σύνολο εκπαίδευσης και στο σύνολο ελέγχου. Τα νευρωνικά δίκτυα ANN1 και ANN2 εκπαιδεύονται ώστε να αντιστοιχίσουν τα διανύσματα I^*b και I^*c σε ψηφιακές ταυτότητες. Η στατιστική επεξεργασία εξασφαλίζει την συμβατότητα κάθε νέου συνόλου κριτηρίων. Όταν ένα νέο διάνυσμα κριτηρίων $(I^*b)'$ ή $(I^*c)'$ προσομοιώνεται από το ANN1 ή στο ANN2 αντίστοιχεί σε ένα πρότυπο-κλάση $\{I^*s, I^*b, I^*c\}$. Με τον τρόπο αυτό, το νέο διάνυσμα κριτηρίων αντιστοιχεί στην στρατηγική εκείνη η οποία εξασφαλίζει καλύτερα τα κριτήρια του διανύσματος.



Σχήμα 5.10 Σχηματικό διάγραμμα του πλήρους μοντέλου της μεθοδολογίας

5.5 Εφαρμογή μεθοδολογίας στο τυπικό σύστημα

Η προηγούμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται στο τυπικό σύστημα Κρήτης, όπου η ελάχιστη στρεφόμενη εφεδρεία λαμβάνεται ίση με 10% της ζήτησης φορτίου. Επίσης, η κρίσιμη για το σύστημα συχνότητα λαμβάνεται ίση με 48.90Hz, η κρίσιμη για τους στροβίλους συχνότητα ίση με 49.30Hz και η κρίσιμη για τους στροβίλους υπερσυχνότητα 50.50Hz.

Επιλογή κριτηρίων και σύγκλισή τους

Ως πλέον σημαντικά κριτήρια από την ομάδα Β λαμβάνονται οι δείκτες B1, B4, B7, B10 δηλαδή, η ελάχιστη εναπομένουσα συχνότητα, η ελάχιστη κατώτατη συχνότητα, η μέγιστη ανώτατη συχνότητα και ο συσσωρευμένος κρίσιμος για τους στροβίλους χρόνος. Οι δείκτες αυτοί συνιστούν το διάνυσμα των κριτηρίων I*_B. Αντίστοιχα, ως σημαντικά κριτήρια της ομάδα C θεωρούνται οι δείκτες C5, C8, C13 και C16, δηλαδή, το μέσο αποκοπτόμενο φορτίο, ο αναμενόμενος ετήσιος αριθμός λειτουργίας της προστασίας εξ αιτίας του χαμηλού επιπέδου υποσυχνότητας, η αναμενόμενη ετήσια μη διαθέσιμη ενέργεια, και η πιθανότητα αποκοπής φορτίου δεδομένου ότι υπήρξε απώλεια παραγωγής. Οι δείκτες αυτοί συνιστούν το διάνυσμα των κριτηρίων Ι*_c. Η επιλογή των παραπάνω κριτηρίων είναι κατά βούληση και κάποιος μπορεί να επιλέξει διαφορετικούς από τους παραπάνω δείκτες εφ όσον τους θεωρεί πλέον σημαντικός και η μέθοδος λειτουργεί κατά τον ίδιο τρόπο.

Μια σημαντική πτυχή της προσομοίωσης Monte-Carlo είναι ο απαιτούμενος χρόνος προσομοίωσης ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια. Προς τον σκοπό αυτόν, έχουν σχεδιαστεί τα διαγράμματα 5.11 και 5.12 τα οποία παρουσιάζουν τα σχετικά σφάλματα των παραπάνω δεικτών συναρτήσει των χρόνων προσομοίωσης. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, όταν ο χρόνος προσομοίωσης φθάσει τα 1000 χρόνια το σχετικό σφάλμα όλων των κριτηρίων μειώνεται κάτω του 1%.

Κατά συνέπεια, η γεννήτρια προτύπων, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή 1650 προτύπων, λαμβάνει ως χρόνο προσομοίωσης τα 1000 έτη για την κάθε τυχαία στρατηγική η οποία εξετάζεται. Ο Πίνακας 5.10 παρουσιάζει τα 25 πρώτα πρότυπα από την εφαρμογή του αλγόριθμου της γεννήτριας προτύπων.







Σχήμα 5.12 Σχετικό σφάλμα κριτηρίων Ι*_C σε συνάρτηση με τα χρόνια προσομοίωσης

Απόδοση νευρωνικών δικτύων

Το σύνολο των 1650 προτύπων που παρήχθησαν από την γεννήτρια προτύπων χωρίζεται σε δύο υποσύνολα, το σύνολο εκπαίδευσης με 1023 πρότυπα και το σύνολο ελέγχου με 627 πρότυπα. Πρέπει να σημειωθεί ότι, ο αριθμός 1023 δεν είναι τυχαίος αλλά ο μέγιστος δυαδικός αριθμός που απαρτίζεται από 9 ψηφία. Αυτό σημαίνει ότι,

μια 9ψήφια δυαδική έξοδος του νευρωνικού δικτύου μπορεί να απεικονίσει όλα τα 1023 πρότυπα του συνόλου εκπαίδευσης.

Στο σημείο αυτό έγινε χρήση του λογισμικού πακέτου Matlab [55, 56] και των συναρτήσεων που περιλαμβάνει για την κατάστρωση και επίλυση των δύο νευρωνικών δικτύων ANN1 και ANN2. Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει την απόδοση των δύο νευρωνικών δικτύων μετρούμενη σε μέσο τετραγωνικό σφάλμα (mse) για διαφορετικούς αριθμούς νευρώνων και αλγόριθμους εκπαίδευσης. Όπως προκύπτει από τον Πίνακα αυτό, η αρχιτεκτονική δύο επιπέδων με 341 και 9 νευρώνες αντίστοιχα σε συνδυασμό με τον αλγόριθμο εκπαίδευσης "tainnoss" επιτυγχάνουν την καλύτερη σύγκλιση. Ο Πίνακας 5.2 παρουσιάζει κάποια στατιστικά στοιχεία των δύο επιλεγέντων νευρωνικών δικτύων ΑΝΝ1 και ΑΝΝ2.

Δονατοιστουμική	Αλγόριθμος	Απόδοση (mse)	
Αρχιιεκιονικη	εκπαίδευσης	ANN1	ANN2
341/9	trainnos	0.0021	0.0024
140/120/9	trainnos	0.0026	0.0029
250/9	trainnos	0.0029	0.0032
341/9	trainbfg	0.0035	0.0039
341/9	trainscg	0.0044	0.0048

Πίνακας 5.1 Σύγκριση διαφορετικών σχεδιασμών των νευρωνικών ANN1 και ANN2

Πίνακας 5.2 Στατιστικά στοιχεία των ΑΝΝ1 και ΑΝΝ2

Νευρώνες πρώτου επιπέδου	341
Νευρώνες δευτέρου επιπέδου	9
Πρότυπα εκπαίδευσης	1023
Πρότυπα ελέγχου	627
Συνολικός αριθμός επαναλήψεων	35000
Χρόνος εκπαίδευσης (h)	15
Απόδοση του ΑΝΝ1 (mse)	0.0021
Απόδοση του ANN2 (mse)	0.0024

Ο Πίνακας 5.3 παρουσιάζει το μέσο σχετικό σφάλμα των κριτηρίων του διανύσματος I_B^* όταν χρησιμοποιηθεί το σύνολο ελέγχου στο νευρωνικό δίκτυο ANN1. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα αυτόν, η προσέγγιση υπολογισμού των δεικτών B1, B4 και B7 είναι πολύ καλή με μέσο σφάλμα μικρότερο του 1% ενώ ο δείκτης B7 παρουσιάζει λίγο μεγαλύτερο σφάλμα (4.52%).

Πίνακας 5.3 Μέσο σχετικό σφάλμα δεικτών $I^{*}{}_{\rm B}$ χρησιμοποιώντας το σύνολο ελέγχου

B1	B4	B7	B10
(Hz)	(Hz)	(Hz)	(min)
0.25%	0.42%	0.69%	4.52%

Επιλογή συμβατών κριτηρίων και αποτελέσματα

Με κατάλληλη στατιστική επεξεργασία του συνόλου των 1650 προτύπων είναι δυνατόν να αποκαλυφθεί ο βαθμός ανεξαρτησίας των διαφόρων δεικτών μεταξύ τους και οι τυχόν αλληλο-συσχετίσεις. Οι Πίνακες 5.4 και 5.5 παρουσιάζουν τους συντελεστές συσχέτισης (correlation coefficients) των δεικτών των διανυσμάτων I_{B}^{*} και I_{C}^{*} . Όπως φαίνεται από τους Πίνακες αυτούς, κάποια ζεύγη δεικτών παρουσιάζουν υψηλό βαθμό αλληλο-συσχέτισης (π.χ. B1 με B4) ενώ άλλα ζεύγη είναι σχεδόν στατιστικά ανεξάρτητα (π.χ. C5 με C8).

Πίνακας 5.4 Συντελεστές συσχέτισης δεικτών $I\ast_{\rm B}$

	B4	B7	B10
B1	0.972	0.782	-0.544
B4		0.750	-0.550
B7			-0.353

Πίνακας 5.5 Συντελεστές συσχέτισης δεικτών I_{C}^{*}

	C8	C13	C16
C5	0.199	0.380	0.233
C8		0.422	0.774
C13			0.557

Προκειμένου να γίνει πιο λεπτομερής στατιστική επεξεργασία σχεδιάζονται τα διαγράμματα "scatter" για κάθε δείκτη του διανύσματος I_B^* σε σχέση με κάθε άλλο δείκτη του ίδιου διανύσματος (σχήματα 5.13 – 5.18). Λαμβανομένου υπόψη του μεγάλου πλήθους των σημείων (1650), τα διαγράμματα αυτά καθορίζουν τις περιοχές των πιθανών ζευγών. Προς το σκοπό αυτό, χαράσσεται η περιβάλλουσα όλων των σημείων κάθε διαγράμματος. Με δεδομένη την τιμή του ενός δείκτη, είναι δυνατόν να προσδιοριστούν τα όρια διακύμανσης του άλλου δείκτη. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα 5.12, εάν ο δείκτης B1 επιλεγεί 49.50Hz οι δυνατές τιμές που μπορεί να λάβει ο δείκτης B4 κυμαίνονται στο διάστημα από 48.70Hz έως 49.30Hz. Τα διαγράμματα αυτά πρέπει να ληφθούν υπόψη όταν επιλέγεται ένα νέο σετ κριτηρίων ώστε να είναι αποδεκτό.

To νέο σύνολο κριτηρίων $(I_B)_N = \{B1, B4, B7, B10\} = \{49.43Hz, 49.01Hz, 51.15Hz, 22.23min\}$ αποτελεί ένα αποδεκτό ή συμβατό σετ κριτηρίων, όπως φαίνεται από τα διαγράμματα 5.13 – 5.18. Εάν, όμως, ο δείκτης B10 λάβει την τιμή 400min αντί της τιμής 22.23min τότε, το παραπάνω σετ κριτηρίων μετατρέπεται σε μη συμβατό σετ, όπως είναι προφανές από τα διαγράμματα 5.15 και 5.17.



Σχήμα 5.13 Διάγραμμα scatter του δείκτη B4 σε σχέση με τον δείκτη B1



Σχήμα 5.14 Διάγραμμα scatter του δείκτη B7 σε σχέση με τον δείκτη B1



Σχήμα 5.15 Διάγραμμα scatter του δείκτη B10 σε σχέση με τον δείκτη B1



Σχήμα 5.16 Διάγραμμα scatter του δείκτη B7 σε σχέση με τον δείκτη B4



Σχήμα 5.17 Διάγραμμα scatter του δείκτη B10 σε σχέση με τον δείκτη B4



Σχήμα 5.18 Διάγραμμα scatter του δείκτη B10 σε σχέση με τον δείκτη B7
To véo set two sumbatíon krithríw $(I^*_B)_N$ to opoio den antíkel oúte sto súnolo ekpaideustic oúte sto súnolo elégicou, tažinometral apó to neuronikó díktuo ANN1 sthu kontinótern proc autó klásh $(I^*_B)_{CL}$. H klásh auth eínal $(I^*_B)_{CL} = \{B1, B4, B7, B10\} = \{49.41$ Hz, 48.97Hz, 51.11Hz, 23.11min $\}$.

Η σύγκριση των δύο αυτών συνόλων $(I^*_B)_N$ και $(I^*_B)_{CL}$ δείχνει ότι τα σύνολα αυτά είναι κατά προσέγγιση ίσα εφόσον τα σχετικά σφάλματα των αντίστοιχων στοιχείων τους είναι: 0.04%, 0.08%, 0.08% και 3.96%. Η κλάση $(I^*_B)_{CL}$ είναι μέρος ενός προτύπου $\{(I^*_S)_{CL}, (I^*_B)_{CL}, (I^*_C)_{CL}\}$ σύμφωνα με την εκτεθείσα μεθοδολογία και το οποίο περιλαμβάνει και το διάνυσμα της ζητούμενης στρατηγικής $\{(I^*_S)_{CL}, H$ στρατηγική λοιπόν αυτή $\{(I^*_S)_{CL}, \eta$ οποία ανήκει στο ίδιο πρότυπο με την κλάση $(I^*_B)_C$ είναι η στρατηγική που εξασφαλίζει την βέλτιστη ικανοποίηση των κριτηρίων του διανύσματος $(I^*_B)_N$. Η στρατηγική αυτή απαρτίζεται από δύο στάδια λειτουργίας των Η/Ν υποσυχνότητας και τα χαρακτηριστικά της παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.6. Συγκεκριμένα, το επίπεδο υποσυχνότητας του πρώτου σταδίου είναι 49.71Hz, ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας είναι 0.92Hz/s, η χρονική καθυστέρηση 0.05s και το φορτίο αποκοπής 15% της ζήτησης. Το δεύτερο στάδιο απαρτίζεται από υποσυχνότητα 49.32Hz, ρυθμό 0.17Hz/s, χρονική καθυστέρηση 0.17s και φορτίο αποκοπής 11% της ζήτησης.

Πρώτο στάδιο	f1(Hz)	df1/dt (Hz/s)	t1 (s)	P1(pu)
H/N	49.71	0.92	0.05	0.15
Δεύτερο στάδιο	f2(Hz)	df2/dt (Hz/s)	t2 (s)	P2(pu)
H/N	49.32	0.17	0.10	0.11

Πίνακας 5.6 Στρατηγική ικανοποιούσα τα κριτήρια $(I^*{}_B)_N$

Οι Πίνακες 5.7 και 5.8 παρουσιάζουν τους δείκτες απόκρισης συχνότητας (ομάδα B) και τους δείκτες αποκοπής φορτίου (ομάδα C), οι οποίοι υπολογίζονται όταν εφαρμοστεί η παραπάνω στρατηγική $(I^*{}_{\rm S})_{\rm CL}$.

Πίνακας 5.7 Δείκτες ομάδας B από εφαρμογή της στρατηγικής $(I\ast_S)_{CL}$

B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
49.41	49.82	0.29	48.97	49.65	0.46	51.11
B8	B9	B10	B11	B12	B13	
0	0	23.11	181.2	26	464006	

Πίνακας 5.8 Δείκτες ομάδας C από εφαρμογή της στρατηγικής (I*s)_{CL}

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
1204	25.3	12.4	0	17.1	44.3	3.6	2.1
C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
0	13.2	5.9	0	19.1	5.7	32.1	3.8

Έλεγχος αποτελεσμάτων

Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή της μεθοδολογίας στο τυπικό σύστημα Κρήτης λαμβάνονται δύο τυχαίες διαταραχές του ισοζυγίου ισχύος. Για κάθε διαταραχή γίνεται προσομοίωση του συστήματος με εφαρμογή των εξισώσεων διαφορών 4.9-4.11 και υπολογίζεται η απόκριση συχνότητας κατά το μεταβατικό στάδιο χωρίς και με την υπόψη στρατηγική. Ζητούμενο είναι κατά πόσον τα κριτήρια $(I^*_B)_N$ που τέθηκαν ως προαπαιτούμενα για τον υπολογισμό της στρατηγικής του Πίνακα 5.6, ικανοποιούνται κατά τις διαταραχές αυτές. Επίσης, εξετάζεται η αποτελεσματικότητα της υπόψη στρατηγικής, δηλαδή κατά πόσο αυτή βελτιώνει την καμπύλη απόκριση συχνότητας σε σχέση με την ασφάλεια του συστήματος.

Το σχήμα 5.19 παρουσιάζει την απόκριση συχνότητας σε μια σημαντική διαταραχή κατά την οποία συμβαίνει απώλεια 40% της παραγωγής όταν η ζήτηση φορτίου είναι 221MW. Η έντονη κόκκινη γραμμή του σχήματος 5.19 παρουσιάζει την απόκριση συχνότητας χωρίς την προστασία υποσυχνότητας ενώ η λεπτή μπλε γραμμή δείχνει την απόκριση συγνότητας όταν εφαρμοστεί η στρατηγική $(I^*_{B})_{S}$. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.19, τα κριτήρια B1 και B4 ικανοποιούνται μόνο μετά την εφαρμογή της υπόψη στρατηγικής. Η ικανοποίηση των κριτηρίων αυτών επιτυγχάνεται χωρίς να παραβιάζεται το κριτήριο B7 που αφορά στην ανώτατη συχνότητα κατά το μεταβατικό φαινόμενο. Πράγματι, η ανώτατη συχνότητα ανέρχεται στα 50.10Hz, τιμή μικρότερη από το όριο των 51.15Hz του κριτηρίου B7. Το κριτήριο B10 είναι ένα αθροιστικό κριτήριο και κατά συνέπεια δεν μπορεί να επαληθευτεί από μια μόνο διαταραχή. Το κριτήριο αυτό καθορίζει τον μέγιστο συσσωρευμένο χρόνο κατά τον οποίο η συχνότητα του συστήματος παραμένει κάτω από ένα όριο, κρίσιμο για τους στροβίλους (49.30Hz). Όμως, αξίζει να σημειωθεί ότι, ο χρόνος ο οποίος προστίθεται στον συσσωρευμένο χρόνο κατά την διαταραχή αυτή ανέρχεται σε 1.43s χωρίς προστασία υποσυγνότητας ενώ μειώνεται στα 0.37s μετά την εφαρμογή της υπόψη στρατηγικής.



Σχήμα 5.19 Απόκριση συχνότητας σε απώλεια 40% της παραγωγής και ζήτηση φορτίου 221MW.

Το σχήμα 5.20 παρουσιάζει την απόκριση συχνότητας σε γεγονός απώλειας 20% της παραγωγής όταν η ζήτηση φορτίου είναι 221MW. Ομοίως στο σχήμα αυτό, η έντονη κόκκινη γραμμή απεικονίζει την απόκριση συχνότητας χωρίς την προστασία υποσυχνότητας ενώ η λεπτή μπλε γραμμή την απόκριση συχνότητας με την εν λόγω στρατηγική. Όπως είναι φανερό από το σχήμα 5.19, το πρώτο επίπεδο υποσυχνότητας ενεργοποιείται λίγο κάτω από τα 49.71Hz εξ αιτίας της χρονικής καθυστέρησης της προστασίας κατά 0.05s. Λαμβανομένου υπόψη ότι, η συχνότητα κατά το μεταβατικό φαινόμενο δεν υποχωρεί κάτω από τα 49.32Hz, που είναι το δεύτερο επίπεδο υποσυχνότητας της εφαρμοσθείσας στρατηγικής, το επίπεδο αυτό δεν ενεργοποιείται. Τα κριτήρια B1, B4, B7 ικανοποιούνται και χωρίς τη εφαρμογή της στρατηγικής, όμως η απόκριση συχνότητας και η ασφάλεια του συστήματος βελτιώνεται αισθητά μετά την εφαρμογή της. Η εναπομένουσα συχνότητα ανέρχεται στα 49.92Hz έναντι 49.65Hz στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται η προστασία υποσυχνότητας. Τέλος, ας σημειωθεί ότι η διαταραχή αυτή συμβάλει στο κριτήριο B10 με χρόνο ο οποίος από 48s μειώνεται σε μηδέν όταν γίνει χρήση της στρατηγικής (I*s)cL.



Σχήμα 5.20 Απόκριση συχνότητας σε απώλεια 20% της παραγωγής και ζήτηση φορτίου 221MW.

Ο συγκεντρωτικός Πίνακας 5.9 παρουσιάζει την ικανοποίηση των κριτηρίων και στις δύο διαταραχές, πριν και μετά την εφαρμογή της στρατηγικής $(I^*{}_B)_N$.

	troncage. Fire			
	Πρώτη δι	ιαταραχή	Δεύτερη δ	διαταραχή
	$(40\% \alpha \pi \omega \lambda \epsilon)$	ι παραγωγης)	$(20\% \alpha \pi \omega \lambda \epsilon)$	α παραγωγης)
Κριτήρια	Χωρίς	με την	Χωρίς	με την
	προστασία	υπολογισθείσα	προστασία	υπολογισθείσα
	υποσυχνότητας	στρατιγική	υποσυχνότητας	στρατιγική
B1 (f εναπομείνασα > 49.43 Hz)	49.41 Hz	49.80 Hz ✓	49.65 Hz ✓	49.92 Hz ✓
B4 (f κατώτατη > 49.01 Hz)	48.70 Hz	49.22 Hz ✓	49.26 Hz ✓	49.65 Hz ✓
B7 (f ανώτατη < 51.15 Hz)	49.72 Hz ✓	50.10 Hz ✓	49.82 Hz ✓	50.05 Hz ✓
B10 (t συσσωρευμ. < 22.23 min)	(+1.43 s)	(+0.37s)	(+0.48 s)	(+0 s)

Πίνακας	5.9	Ικανοποίη	ιση κ	ριτηρίων
-1				

					ΣT	ΡΑΤΗΓΙ	IKH									∆EII	ΚΤΕΣ			
α/α	f1	(df/dt)1	t1	P1	f2	(df/dt)2	t2	P2	f3	(df/dt)3	t3	P3	B1	B4	B7	B10	C5	C8	C13	C16
1	48.92	0.00	0.06	0.17	48.73	0.28	0.18	0.00	48.65	0.48	0.03	0.00	49.35	48.82	50.41	45.45	30.90	4.89	9.71	0.038
2	48.58	0.54	0.17	0.08	49.47	0.04	0.35	0.00	48.46	0.42	0.27	0.00	48.82	48.28	50.00	200.41	12.09	0.28	0.50	0.002
3	50.00	1.38	0.28	0.03	49.81	1.09	0.40	0.06	49.73	0.00	0.24	0.10	49.27	48.84	50.50	9.18	23.94	0.27	15.67	0.002
4	48.87	0.63	0.29	0.24	49.71	0.00	0.07	0.00	48.65	0.03	0.27	0.00	48.85	48.35	50.55	157.08	39.99	0.71	1.73	0.005
5	49.02	0.88	0.03	0.18	49.62	1.04	0.02	0.00	48.85	0.00	0.13	0.00	48.86	48.37	50.00	196.62	30.70	1.16	3.94	0.008
6	48.18	0.39	0.11	0.07	48.67	0.07	0.37	0.00	49.27	1.33	0.35	0.00	48.77	48.18	50.00	212.44	0.00	0.00	0.00	0.000
7	48.87	1.42	0.37	0.07	48.10	0.15	0.38	0.13	49.96	0.00	0.21	0.05	48.93	48.30	50.25	54.54	13.89	0.00	15.78	0.000
8	48.81	1.22	0.34	0.01	48.43	0.17	0.27	0.29	48.69	1.10	0.04	0.30	48.85	48.30	51.24	172.65	49.07	0.00	1.38	0.004
9	48.05	0.95	0.22	0.17	49.04	0.93	0.13	0.06	48.67	1.37	0.17	0.00	48.82	48.31	50.00	219.35	9.39	0.00	1.07	0.003
10	49.32	0.27	0.24	0.26	48.26	1.16	0.04	0.00	49.83	0.00	0.07	0.00	49.43	49.01	51.15	24.79	55.90	12.53	14.60	0.090
11	49.02	0.80	0.38	0.29	48.31	0.00	0.10	0.24	48.22	1.10	0.34	0.00	48.82	48.29	50.75	193.77	43.88	0.29	0.75	0.003
12	48.42	0.69	0.18	0.23	49.65	1.32	0.29	0.06	48.98	0.00	0.02	0.21	49.38	48.96	50.74	41.14	40.67	0.00	11.91	0.000
13	49.17	1.15	0.09	0.04	49.37	1.08	0.14	0.22	49.68	1.49	0.32	0.00	48.85	48.33	50.14	185.67	36.68	0.00	1.91	0.005
14	49.93	0.25	0.11	0.06	48.87	0.00	0.31	0.00	48.44	0.60	0.34	0.00	48.98	48.41	50.11	52.97	14.29	84.35	14.82	0.589
15	48.40	1.15	0.32	0.13	49.63	1.38	0.03	0.26	48.96	0.98	0.27	0.19	48.81	48.26	50.10	222.87	40.41	0.00	0.37	0.002
16	49.91	0.59	0.33	0.09	48.27	0.09	0.11	0.18	49.79	0.46	0.03	0.08	49.45	49.10	50.02	4.26	17.95	2.64	15.24	0.018
17	48.76	0.71	0.07	0.02	48.38	0.00	0.01	0.00	48.64	0.58	0.18	0.08	48.86	48.32	50.00	197.97	2.72	0.58	2.68	0.009
18	49.02	1.04	0.06	0.01	49.23	0.97	0.11	0.20	49.53	1.38	0.29	0.00	48.85	48.36	50.07	201.64	33.62	0.00	3.18	0.007
19	49.25	1.36	0.02	0.02	48.53	0.00	0.25	0.06	48.44	0.00	0.39	0.00	49.04	48.34	50.00	228.84	9.49	0.01	4.15	0.009
20	48.52	1.14	0.11	0.14	48.72	1.07	0.26	0.03	49.03	1.48	0.33	0.23	48.81	48.21	50.00	214.65	0.00	0.00	0.00	0.000
21	48.47	0.33	0.21	0.10	48.78	0.34	0.28	0.08	49.72	1.23	0.19	0.00	49.10	48.46	50.00	205.31	13.77	0.00	2.99	0.008
22	48.36	0.10	0.35	0.14	49.30	0.99	0.25	0.00	48.87	0.45	0.18	0.00	48.82	48.24	50.00	205.58	22.26	0.25	0.39	0.002
23	48.75	0.00	0.38	0.03	49.34	1.38	0.36	0.07	48.58	0.51	0.07	0.20	48.98	48.42	50.24	179.81	19.76	0.68	3.83	0.005
24	49.10	1.27	0.08	0.18	49.93	1.29	0.26	0.00	48.87	0.00	0.17	0.00	48.81	48.21	50.00	178.12	24.54	0.02	0.05	0.000
25	48.08	1.28	0.27	0.28	48.29	1.22	0.32	0.00	49.13	0.13	0.10	0.00	48.76	48.13	50.00	218.45	0.00	0.00	0.00	0.000

Πίνακας 5.10 Παραγωγή προτύπων από την εφαρμογή του αλγορίθμου της γεννήτριας

5.6 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

Στο προηγούμενο κεφάλαιο επιλύθηκε το πρόβλημα επιλογής της προστασίας αποκοπής φορτίου από ένα σύνολο εναλλακτικών λύσεων. Η επιλογή γίνεται δια σύγκρισης κατάλληλων πιθανοτικών δεικτών οι οποίοι υπολογίζονται από την προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος με χρησιμοποίηση της αριθμητικής μεθόδου Monte-Carlo. Οι δείκτες αυτοί χωρίζονται σε δύο σύνολα, στους δείκτες απόκρισης συχνότητας (ασφάλειας) και στους δείκτες αποκοπής φορτίου (ποιότηταςαξιοπιστίας). Επομένως, το μοντέλο που αναπτύχθηκε δέχεται ως είσοδο τυχούσα στρατηγική προστασίας αποκοπής φορτίου και υπολογίζει ως έξοδο δύο διακριτά σύνολα πιθανοτικών δεικτών.

Με αντιστροφή της λογικής αυτής πρότασης, είναι δυνατόν να διατυπωθούν δύο αντίστροφα προβλήματα, τα οποία είναι εγγύτερα και πιο χρήσιμα για τα ερωτήματα που, συνήθως, τίθενται από την πράξη :

<u>Πρώτο πρόβλημα.</u> Με δεδομένους επιθυμητούς δείκτες απόκρισης συχνότητας, ποια είναι η στρατηγική εκείνη η οποία τους εξασφαλίζει και τι δείκτες αποκοπής φορτίου συνεπάγεται η εφαρμογή της;

Δεύτερο πρόβλημα. Με δεδομένους, επιθυμητούς δείκτες αποκοπής φορτίου, ποια είναι η στρατηγική εκείνη η οποία τους εξασφαλίζει και τι δείκτες απόκρισης συχνότητας συνεπάγεται η εφαρμογή της;

Τα δύο αυτά προβλήματα αναλύονται και λαμβάνουν απάντηση στο παρόν κεφάλαιο με χρησιμοποίηση μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης. Προς τον σκοπό αυτό, αναπτύχθηκε αλγόριθμος ο οποίος παράγει, κατά τυχαίο τρόπο, ένα αριθμό στρατηγικών προστασίας αποκοπής φορτίου. Οι στρατηγικές αυτές χρησιμοποιούνται ως είσοδοι στην προσομοίωση κατά Monte-Carlo που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και υπολογίζονται τα αντίστοιχα σύνολα πιθανοτικών δεικτών. Κάθε τυχαία στρατηγική μαζί με τα αντίστοιχα σύνολα δεικτών της, συγκροτεί ένα πρότυπο. Τα πρότυπα αυτά χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση δύο τεχνητών νευρωνικών δικτύων που επιλύουν τα παραπάνω δύο αντίστροφα προβλήματα.

Ο τύπος τεχνητού νευρωνικού δικτύου που χρησιμοποιήθηκε είναι το πολυ-επίπεδο «percepton» με αλγόριθμο μάθησης μέσω ανάστροφης διάδοσης σφάλματος και δυαδική έξοδο. Προς τον σκοπό αυτό, έγινε αντιστοίχιση των στρατηγικών του συνόλου εκπαίδευσης με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς της δυαδικής εξόδου. Έγινε χρήση του πακέτου λογισμικού Matlab και των συναρτήσεών του κατά την εφαρμογή της μεθόδου στο τυπικό απομονωμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Δοκιμάστηκαν πέντε διαφορετικά δίκτυα τα οποία προέκυψαν αλλάζοντας την αρχιτεκτονική και τον αλγόριθμο εκπαίδευσης. Με βάση την απόδοση των δικτύων κατά την χρησιμοποίηση του συνόλου ελέγχου, αποδείχθηκε ότι ο τύπος δικτύου με την βέλτιστη απόδοση είναι εκείνος των δύο επιπέδων με 341 και 9 νευρώνες αντίστοιχα και με συνάρτηση εκπαίδευσης την trainnos. Η απόδοση των δύο δικτύων για κάθε ένα από τα δύο αντίστροφα προβλήματα κατά την χρησιμοποίηση του συνόλου ελέγχου, ήταν mse=0.024 και 0.024 αντίστοιχα.

Στην φάση αξιοποίησης των δικτύων αυτών επιλέγεται κάποιος αριθμός πιθανοτικών δεικτών οι οποίοι λαμβάνουν επιθυμητές τιμές και αποτελούν τα κριτήρια που πρέπει να ικανοποιεί η ζητούμενη στρατηγική. Λαμβανομένου υπόψη ότι, τόσο οι δείκτες απόκρισης συχνότητας όσο και οι δείκτες αποκοπής φορτίου είναι σε κάποιο βαθμό αλληλο-συσχετιζόμενοι, οι επιλεγόμενοι δείκτες δεν μπορούν να λάβουν αυθαίρετα οποιεσδήποτε τιμές. Για τον λόγο αυτό έγινε στατιστική επεξεργασία των προτύπων και αποκαλύφθηκαν οι αλληλο-συσχετίσεις των δεικτών. Με βάση τα διαγράμματα scatter γίνεται έλεγχος κάθε νέου συνόλου κριτηρίων που απαρτίζεται από τους επιθυμητούς δείκτες είτε απόκρισης συχνότητας είτε αποκοπής φορτίου, έτσι ώστε το σύνολο αυτό των πιθανοτικών δεικτών να είναι ένα αποδεκτό σύνολο κριτηρίων.

Η εφαρμογή της μεθόδου στο τυπικό σύστημα έδειξε πολύ καλά αποτελέσματα και παρουσίασε σφάλματα μικρότερα του 1% για τα τρία κριτήρια και μικρότερο του 4% για το τέταρτο από τα τέσσερα επιλεχθέντα κριτήρια.

Επομένως, η μέθοδος απαντάει ευθέως στο ερώτημα προσδιορισμού της κατάλληλης προστασίας αποκοπής φορτίου λαμβάνοντας ως προϋπόθεση οποιοδήποτε σύνολο πιθανοτικών δεικτών με επιθυμητές τιμές. Επί πλέον, ελέγχεται η συμβατότητα των κριτηρίων αυτών, εξετάζεται δηλαδή κατά πόσο είναι εφικτή η συνύπαρξή τους και η εφαρμογή του ενός δεν αποκλείει το άλλο.



ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΠΙ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΠΟΥ ΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΗΛΕΚΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Ουδέν χρήμα μάτην γίνεται, αλλά πάντα εκ λόγου τε και υπ' ανάγκης (Τίποτα δεν γίνεται τυχαία, αλλά όλα προέρχονται από λογική αιτία και αναγκαιότητα) Λεύκιππος

6.1 Εισαγωγή

Κατά την λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, η ζήτηση φορτίου μεταβάλλεται συνεχώς στην διάρκεια του χρόνου και η απαιτούμενη ισορροπία ανάμεσα στην παραγωγή και στην ζήτηση επιτυγχάνεται με την κατάλληλη ένταξη και από-ένταξη των διαθέσιμων μονάδων παραγωγής. Ο ρόλος αυτός ανήκει στο Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας (ΚΕΕ) το οποίο έχει την ευθύνη επιτήρησης και ελέγχου ολόκληρου του συστήματος και παράλληλα εκτελεί την βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου. Σκοπός είναι, κάθε χρονική στιγμή, η διαθέσιμη ισχύς των στρεφόμενων μονάδων να είναι μεγαλύτερη από την ζήτηση φορτίου παρέχοντας ένα περιθώριο «ασφάλειας» το οποίο ονομάζεται στρεφόμενη εφεδρεία SR (Spinning Reserve). Η SR χρησιμοποιείται για να καλύψει είτε τις αργές αυξητικές μεταβολές του φορτίου είτε μέρος της ισχύος κατά την ξαφνική απώλεια μονάδων παραγωγής [57-61].

Είναι προφανές ότι, η SR μεταβάλλεται συνεχώς με το χρόνο και βρίσκεται στα χαμηλότερα επίπεδα λίγο πριν την ένταξη μιας μονάδας παραγωγής ενώ αυξάνεται κατακόρυφα αμέσως μετά την ένταξη της μονάδας στο σύστημα. Ο τρόπος αυτός λειτουργίας του συστήματος απαιτεί την συνεχή ύπαρξη SR, η οποία δεν μπορεί να είναι μηδενική. Ο Διαχειριστής του συστήματος καθορίζει την ελάχιστη απαιτούμενη στρεφόμενη εφεδρεία MinSRr (*Minimum Spinning Reserve Requirements*) η οποία προσδιορίζει την χρονική στιγμή κατά την οποία παραγωγής. Η MinSRr επηρεάζει, ασφαλώς, την στιγμιαία στρεφόμενη εφεδρεία ISR (*Instantaneous Spinning Reserve*), η οποία είναι η διαθέσιμη SR κάθε χρονική στιγμή.

Οι διάφοροι Διαχειριστές συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας υιοθετούν διαφορετικές πολιτικές σε σχέση με την τήρηση της SR. Κάποιοι λαμβάνουν ως κανόνα την διατήρηση MinSRr ίσης με ένα ποσοστό του φορτίου (π.χ. 10%). Άλλοι διατηρούν SR ίση με την φόρτιση της μεγαλύτερης μονάδας του συστήματος ενώ ορισμένοι προσπαθούν για λόγους οικονομίας να κρατήσουν την ελάχιστη δυνατή.

Πολύ συχνά αναφέρεται στην βιβλιογραφία [62-66] ότι η SR είναι απαραίτητη για την διατήρηση της ασφάλειας του συστήματος, θεωρώντας ότι ολόκληρη η ISR θα αξιοποιηθεί σε γεγονότα απώλειας παραγωγής. Επίσης, υπάρχει η πεποίθηση μεταξύ των μηχανικών των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας ότι όσο περισσότερη ISR υπάρχει τόσο πιο ασφαλές είναι το σύστημα κατά την λειτουργία του. Όπως αποδεικνύεται και από την εμπειρία, η πραγματικότητα είναι λίγο διαφορετική δεδομένου ότι η ISR συμβάλει στην ασφάλεια υπό προϋποθέσεις οι οποίες θα διερευνηθούν στην συνέχεια. Η γενική διακοπή στο σύστημα Κρήτης, τον Οκτώβριο του 2001, συνέβη μετά από αλλεπάλληλη απώλεια παραγωγής η οποία οδήγησε σε σταδιακή πτώση της συχνότητας μέχρι την ολική διακοπή του συστήματος (black out) χωρίς να αξιοποιηθεί ολόκληρη η υπάρχουσα ISR.

Επίσης, άλλες δημοσιεύσεις [60, 61, 67] αναφέρονται στην ικανότητα απόκρισης των μονάδων αλλά, συνήθως, λαμβάνεται η ικανότητα ανάληψης ή απόρριψης φορτίου υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας η οποία είναι εντελώς διαφορετική από την αντίδραση της μονάδας σε γεγονότα απώλειας παραγωγής ή φορτίου και ξαφνικής απόκλισης της συχνότητας από τα ονομαστικά επίπεδα.

6.2 Στρεφόμενη Εφεδρεία και Απόκριση Μονάδων

Ελάχιστη και στιγμιαία SR – παρατηρήσεις

Στο διάγραμμα του σχήματος 6.1 παρουσιάζεται μια τυπική περίπτωση μεταβολής της SR στη διάρκεια 10 ωρών λειτουργίας του συστήματος. Με συνεχή κόκκινη γραμμή παρουσιάζεται η MinSRr, με στικτή μπλε γραμμή η ISR ενώ τα βέλη προς τα πάνω απεικονίζουν την ένταξη κάποιας νέας μονάδας στο σύστημα και τα βέλη προς τα κάτω την από-ένταξη (σταμάτημα) κάποιας μονάδας. Στο διάγραμμα διακρίνονται δύο περιοχές. Αριστερά της κατακόρυφου a-b το φορτίο βαίνει μειούμενο και κατά συνέπεια, η απαίτηση σε ελάχιστη SR μειώνεται συνεχώς ενώ δεξιά της κατακόρυφου τόσο το φορτίο όσο και η ελάχιστη SR αυξάνονται. Στην αριστερή περιοχή, εάν το σταμάτημα της πιο δαπανηρής από τις λειτουργούσες μονάδες δεν οδηγεί σε μείωση της ISR κάτω από το επίπεδο της MinSRr, τότε η μονάδα αυτή μπορεί να σταματήσει. Αμέσως μετά την από-ένταξη της μονάδας αυτής η ISR βρίσκεται κοντά στην ελάχιστη απαιτούμενη ενώ λίγο πριν σταματήσει η μονάδα, η ISR βρίσκεται στα υψηλότερα επίπεδα. Στην δεξιά περιοχή όπου το φορτίο αυξάνεται, όταν η διαθέσιμη ISR περιοριστεί στα επίπεδα της MinSRr, μια νέα μονάδα παραγωγής εντάσσεται στο σύστημα με αποτέλεσμα την αύξηση της ISR. Αυτό σημαίνει ότι, η ISR γίνεται ίση με την MinSRr συν την ικανότητα της νέας μονάδας που μόλις εντάχθηκε στο σύστημα.

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα 6.1, η ISR είναι μια πριονωτή συνάρτηση. Το διάγραμμα παρουσιάζει μια αξονική συμμετρία ως προς τον κατακόρυφο άξονα a-b. Αυτό συνεπάγεται ότι, οι ενέργειες του ΚΕΕ όσον αφορά στην από-ένταξη των μονάδων παραγωγής μέχρι την ελάχιστη ζήτηση θα επαναληφθούν κατά την αντίστροφη σειρά καθώς η ζήτηση αρχίζει να αυξάνεται. Η μονάδα που σταμάτησε τελευταία είναι εκείνη που θα ενταχθεί πρώτη στο σύστημα.



Σχήμα 6.1 Χρονική μεταβολή MinSRr και ISR

Απόκριση και ρυθμός φόρτισης των μονάδων

Το σχήμα 3.17 παρουσιάζει το απλοποιημένο διάγραμμα μηχανο-υδραυλικού ρυθμιστή στροφών μιας θερμικής μονάδας παραγωγής. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, ο ρυθμιστής διαθέτει δύο ανεξάρτητες εισόδους, την είσοδο 1 και την είσοδο 2. Η πρώτη είσοδος αφορά στο επιθυμητό σημείο λειτουργίας (set point P_R), το οποίο μπορεί να αλλάξει είτε τοπικά από τον χειριστή της μονάδας είτε από το ΚΕΕ μέσω της δευτερεύουσας ρύθμισης. Η είσοδος αυτή καθορίζει την παραγωγή της μονάδας P_R σε συνθήκες ονομαστικής συχνότητας.

Ο ρυθμός μεταβολής της εισόδου αυτής, που ονομάζεται και ρυθμός ανάληψης ή απόρριψης φορτίου εξαρτάται από το είδος της μονάδας και γενικά είναι ένας μάλλον

αργός ρυθμός. Κυμαίνεται από 1% της ονομαστικής ικανότητας της μονάδας ανά λεπτό έως 30% της ονομαστικής ικανότητας ανά λεπτό για ορισμένες υδροστροβιλικές μονάδες. Κατά συνέπεια, μια μονάδα ονομαστικής ικανότητας 23.50MW δεν μπορεί να αναλάβει περισσότερο από 7MW/min.

Η είσοδος 2 ενεργοποιείται από τις μεταβολές της συχνότητας Δf και η απόκριση στην είσοδο αυτή, η οποία αντιπροσωπεύει την πρωτεύουσα ρύθμιση, είναι πολύ πιο ταχεία. Η μονάδα μπορεί να αναλάβει σε λίγα δευτερόλεπτα επιπρόσθετο φορτίο ΔP, του οποίου το ύψος εξαρτάται από τις αριθμητικές τιμές του στατισμού R και της πτώσης συχνότητας Δf.

Εάν υποτεθεί ότι, η προηγούμενη μονάδα, ισχύος 23.50MW, έχει στατισμό 9% και σταθερά στροβίλου 1.25s, η δε πτώση συχνότητας είναι 0.39Hz, η μονάδα θα αναλάβει 2.10MW σε περίπου δύο δευτερόλεπτα, όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 5.4. Η απόκριση αυτή της μονάδας, δηλαδή 1.15MW/s, αντιπροσωπεύει ρυθμό πολύ μεγαλύτερο από τον ρυθμό ανάληψης φορτίου των 7MW/min που αντιστοιχεί στη είσοδο 1 του ρυθμιστή. Επί πλέον, ο ρυθμός απόκρισης μέσω στατισμού δεν είναι σταθερός αλλά εξαρτάται από την απόκλιση της συχνότητας Δf σύμφωνα με την εξ. 6.1, όπου P_N είναι η ονομαστική ικανότητα της μονάδας, και f_N η ονομαστική συχνότητα.

 $R = (\Delta f / f_N) / (\Delta P / P_N)$

6.3 Αναλυτικό Μοντέλο Συστήματος και Μέθοδος Υπολογισμού Σχέσης των Διαφόρων Παραμέτρων

Στο κεφάλαιο 4 χρησιμοποιήθηκε το απλοποιημένο μοντέλο της ισοδύναμης μονάδας για την προσομοίωση του συστήματος. Το μοντέλο αυτό υπολογίζει την απόκριση συχνότητας κατά τα πρώτα κρίσιμα δευτερόλεπτα μετά την διαταραχή του ισοζυγίου ισχύος. Το απλοποιημένο μοντέλο προσφέρει απλούστευση στον αλγόριθμο και ταχύτητα στους υπολογισμούς, όμως έχει το μειονέκτημα ότι δεν μπορεί να αποδώσει την συμπεριφορά της κάθε μονάδας χωριστά. Επίσης, στο μοντέλο αυτό δεν έχει ληφθεί υπόψη ο ρόλος των περιοριστών ισχύος (limiters) των ρυθμιστών στροφών, οι οποίοι μπορεί να περιορίσουν την απόκριση των μονάδων και την φυσική τους τάση για ανάληψη φορτίου όταν η συχνότητα πέφτει. Για την ανάλυση της συμπεριφοράς του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη και τους περιοριστές ισχύος, είναι ανάγκη να χρησιμοποιηθεί ένα πιο λεπτομερειακό μοντέλο στο οποίο θα φαίνεται η συμβολή κάθε μονάδας, όπως αυτό που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 3.11 με την προσθήκη και των περιοριστών ισχύος. Το σχήμα 6.2 παρουσιάζει το πλήρες δομικό διάγραμμα ενός συστήματος n θερμικών μονάδων παραγωγής χωρίς

(6.1)

αναθέρμανση από το οποίο παράγονται οι εξισώσεις διαφορών (6.2.1 - 6.2.3n+2), οι οποίες περιγράφουν αναλυτικά το πρόβλημα.

$$P_m(k-1) = P_{m1}(k-1) + P_{m2}(k-1) + \dots + P_{mn}(k-1)$$
(6.2.1)

$$\Delta f(k) = \frac{\Delta f(k-1) \cdot (T_p - \Delta T) + K_p \cdot \Delta T \cdot (P_m(k-1) - P_L)}{T_p}$$
(6.2.2)

$$P_{m1}(k) = \frac{\Delta T \cdot P_{g1}(k) + T_{t1} \cdot P_{m1}(k-1)}{T_{t1} + \Delta T}$$
(6.2.3)

$$P_{m2}(k) = \frac{\Delta T \cdot P_{g2}(k) + T_{t2} \cdot P_{m2}(k-1)}{T_{t2} + \Delta T}$$
(6.2.4)

$$P_{mn}(k) = \frac{\Delta T \cdot P_{gn}(k) + T_{tn} \cdot P_{mn}(k-1)}{T_{tn} + \Delta T}$$
(6.2.n+2)

.....

.....

$$P_{g1}(k) = \frac{R_1 \cdot T_{g1} \cdot P_{g1}(k-1) + \Delta T \cdot (R_1 \cdot P_{R1} - \Delta f(k))}{R_1 \cdot (\Delta T + T_{g1})}$$
(6.2.n+3)

$$P_{g2}(k) = \frac{R_2 \cdot T_{g2} \cdot P_{g2}(k-1) + \Delta T \cdot (R_2 \cdot P_{R2} - \Delta f(k))}{R_2 \cdot (\Delta T + T_{g2})}$$
(6.2.n+4)

$$P_{gn}(k) = \frac{R_n \cdot T_{gn} \cdot P_{gn}(k-1) + \Delta T \cdot (R_n \cdot P_{Rn} - \Delta f(k))}{R_n \cdot (\Delta T + T_{gn})}$$
(6.2.2n+2)

$$\min L_1 \le Y_1(k) \le \max L_1 \tag{6.2.2n+3}$$

 $\min L_2 \le Y_2(k) \le \max L_2 \tag{6.2.2n+4}$

$$\min L_n \le Y_n(k) \le \max L_n \tag{6.2.3n+2}$$

όπου

.....

R _i	: ο στατισμός της μονάδας i
T _{gi}	: η χρονική σταθερά του ρυθμιστή στροφών της μονάδας i
T _{ti}	: η χρονική σταθερά του στροβίλου της μονάδας i
P _{Ri}	το επιθυμητό σημείο λειτουργίας της μονάδας i
P _{mi}	: η παραγωγή της μονάδας i
P _{gi}	: η έξοδος του ρυθμιστή της μονάδας i
$\max L_i, \min L_i$: τιμές ρύθμισης των περιοριστών ισχύος των ρυθμιστών στροφών της μονάδας i



Σχήμα 6.2 Πλήρες δομικό διάγραμμα συστήματος με η μονάδες παραγωγής

Ο παραπάνω αλγόριθμος μπορεί να παρασταθεί γραφικά από το συνοπτικό διάγραμμα του σχήματος 6.3, όπου έξοδος είναι η χρονική μεταβολή της συχνότητας f(t) μετά από απώλεια παραγωγής και είσοδοι είναι το φορτίο P_L , οι τεχνικές παράμετροι του συστήματος (D, H, R_i , T_{gi} , T_{ti}) και οι λειτουργικοί παράμετροι (MinSRr, ISR, ISR, P_{Ri} , max L_i , min L_i).



Σχήμα 6.3 Συνοπτικό διάγραμμα αλγορίθμου

Δύο χαρακτηριστικές τιμές της απόκρισης συχνότητας f(t), οι οποίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και ως δείκτες ασφάλειας του συστήματος σε εξεταζόμενα σενάρια απώλειας παραγωγής, είναι η εναπομένουσα συχνότητα f_{residual} και η κατώτατη συχνότητα f_{under} κατά το μεταβατικό στάδιο απόκρισης συχνότητας. Η τιμή της f_{residual} είναι η τελική τιμή της συχνότητας μετά το μεταβατικό στάδιο και κατά συνέπεια, μπορεί να προσδιοριστεί ως f_{residual}=f(t=:). Επειδή το μεταβατικό στάδιο

διαρκεί σύντομο χρόνο, συνήθως ολιγότερο των 20s, η τιμή της $f_{residual}$ μπορεί να εκτιμηθεί με μεγάλη ακρίβεια θέτοντας t=20s.

Εάν m είναι ο αριθμός όλων των παραμέτρων εισόδου του σχήματος 6.3, η σχέση ανάμεσα στην fresidual ή την funder και οποιασδήποτε παράμετρο εισόδου x μπορεί να υπολογιστεί με τον ακόλουθο τρόπο. Μεταβάλλοντας την τιμή της παραμέτρου x κατά μικρά βήματα και διατηρώντας σταθερές τις υπόλοιπες m-1 παραμέτρους εισόδου, υπολογίζουμε κάθε φορά την τιμή της fresidual ή της funder χρησιμοποιώντας τον παραπάνω αλγόριθμο. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται μια οικογένεια από n καμπύλες $f_x(t)$ με μεταβλητή παράμετρο την x, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 6.4. Η κάθετος ΑΒ πάνω στον άξονα του χρόνου σε σημείο, όπου το μεταβατικό φαινόμενο έχει ολοκληρωθεί, τέμνει τις n καμπύλες f_x(t) σε αντίστοιχα σημεία και προσδιορίζει διατεταγμένα ζεύγη τιμών ($f_{residual,j}$, x_j), όπου j=1 to n. Τα ζεύγη αυτά τιμών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της καμπύλης fresidual=fresidual(x). Επομένως, σχέσεις $f_{residual} = f_{residual}(ISR)$ $\dot{\eta}$ $f_{residual} = f_{residual}(maxL_i)$ όπως μπορούν να προσδιοριστούν.



Σχήμα 6.4 Οικογένεια καμπυλών $f_x(t)$ με την x ως μεταβλητή παράμετρο

Επί πλέον, είναι ενδιαφέρον να υπολογιστούν σχέσεις της μορφής x=x(y), όπου x, y είναι δύο οποιεσδήποτε παράμετροι εισόδου με την προϋπόθεση ότι f_{residual} ή f_{under} διατηρούνται σταθερές. Η προηγούμενη καμπύλη f_{residual}=f_{residual}(x) υπολογίστηκε θεωρώντας ορισμένη τιμή της παραμέτρου y. Εάν η παραπάνω διαδικασία επαναληφθεί n φορές λαμβάνοντας διαφορετικές κάθε φορά τιμές της παραμέτρου y, μία νέα οικογένεια καμπυλών f_{residual,y}(x) είναι δυνατόν να προσδιοριστεί όπως φαίνεται στο σχήμα 6.5. Η ευθεία CD η οποία είναι παράλληλη προς τον άξονα των x και αρχίζει από δεδομένο σημείο του άξονα f_{residual}, τέμνει κάθε καμπύλη της οικογένειας καμπυλών f_{residual,y}(x) σε ένα σημείο και προσδιορίζει ένα διατεταγμένο ζεύγος τιμών (x_j, y_j), όπου j=1 to n. Το σύνολο των διατεταγμένων αυτών ζευγών παρέχει τα δεδομένα για την χάραξη της ζητούμενης καμπύλης x=x(y). Με την διαδικασία αυτή είναι δυνατόν να προσδιοριστούν σχέσεις, όπως για παράδειγμα ISR=ISR(P_L) η οποία απαντά στο ερώτημα : εάν η ζήτηση του φορτίου αυξηθεί κατά ορισμένο ποσό, ποια είναι η αναγκαία αύξηση της στρεφόμενης εφεδρείας ώστε να διατηρηθεί σταθερά η f_{residual} για ισόποση απώλεια παραγωγής.



 $\Sigma_{\chi \eta \mu \alpha}$ 6.5 Οικογένεια καμπυλών $f_{residual,v}(t)$ με την y ως μεταβλητή παράμετρο

6.4 Ανάλυση Τυπικού Συστήματος

 Ένταξη μονάδων και διακύμανση της στιγμιαίας στρεφόμενης εφεδρείας ISR σε μια τυπική ημέρα

Το αναλυτικό μοντέλο το οποίο περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο θα εφαρμοστεί στο τυπικό αυτόνομο σύστημα Κρήτης προκειμένου να διερευνηθεί ο ρόλος της στρεφόμενης εφεδρείας

Το διάγραμμα 6.6 παρουσιάζει την ημερήσια καμπύλη φορτίου μιας τυπικής ημέρας στο σύστημα Κρήτης. Στο ίδιο διάγραμμα απεικονίζονται η ένταξη και από-ένταξη των μονάδων παραγωγής με στόχο τη ικανοποίηση της ζήτησης φορτίου και την διατήρηση ελάχιστης στρεφόμενης εφεδρείας MinSRr ίσης με το 10% του φορτίου. Οι μονάδες U1 έως U9 λειτουργούν καθ όλη την διάρκεια του 24ώρου ενώ οι μονάδες U10 έως U15 εντάσσονται και από-εντάσσονται στο σύστημα σύμφωνα με την διακύμανση του φορτίου.



Σχήμα 6.6 Ημερήσια καμπύλη φορτίου και ένταξη μονάδων παραγωγής σε μια τυπική ημέρα στο σύστημα Κρήτης

Η συνεχής κόκκινη και η εστιγμένη μπλε γραμμή του σχήματος 6.7 απεικονίζουν την MinSRr και την ISR, κάθε χρονική στιγμή της τυπικής ημέρας. Η μέγιστη ISR είναι ίση με 39.6% της ζήτησης και παρουσιάζεται στις 2:00 την νύκτα ενώ η ελάχιστη απαιτούμενη MinSRr είναι διαρκώς ίση με το 10% του φορτίου. Η μέγιστη ISR σε απόλυτες τιμές (Absolute ISR ή AISR) είναι 62.1MW και παρουσιάζεται στις 12:00 το μεσημέρι, αντιστοιχεί δε στο 26.6% της ζήτησης. Η μέση ISR σε απόλυτες τιμές είναι 34.75MW ενώ η μέση τιμή της MinSRr, επίσης σε απόλυτες τιμές, είναι 18.86MW. Επομένως, προκειμένου να επιτευχθεί η ελάχιστη στρεφόμενη εφεδρεία απαιτείται, κατά μέσο όρο, η διατήρηση διπλάσιας εφεδρείας. Αυτή η ανάγκη για διατήρηση ISR πολύ μεγαλύτερης από την ελάχιστη απαιτούμενη γίνεται περισσότερη έντονη στα μικρά απομονωμένα συστήματα με λίγες μονάδες παραγωγής και έχει ως αποτέλεσμα τα συστήματα αυτά να είναι πιο δαπανηρά κατά την λειτουργία τους.



Σχήμα 6.7 Ελάχιστη SR και ISR μιας τυπικής ημέρας στο σύστημα Κρήτης

 Απόκριση μονάδων και συχνότητας συναρτήσει των ορίων των περιοριστών ισχύος των ρυθμιστών στροφών

Στην ανάλυση που ακολουθεί, η εκμετάλλευση του συστήματος Κρήτης γίνεται με οικονομικά κριτήρια, γεγονός που σημαίνει ότι η ISR είναι συγκεντρωμένη σε λίγες μονάδες αιχμής, δηλαδή στις πιο δαπανηρές από τις λειτουργούσες μονάδες. Για ζήτηση φορτίου P_L ίση με 197MW, ελάχιστη στρεφόμενη εφεδρεία MinSRr ίση με το 10% της ζήτησης και με την προϋπόθεση διαθεσιμότητας όλων των μονάδων και ικανοποίησης των τεχνικών ελαχίστων του Πίνακα 3.7.1, η φόρτιση των μονάδων P(i) είναι η ακόλουθη:

P(1)=23.5 MW, P(2)=23.5 MW, P(3)=23.5 MW, P(4)=14.1 MW, P(5)=14.1 MW P(6)=5.9 MW, P(7)=11.5 MW, P(8)=11.5 MW, P(9)=11.5 MW, P(10)=11.5 MW, P(11)=28.4 MW, P(12)=6 MW, P(13)=12 MW

Στο σχήμα 6.8 παρουσιάζεται η απόκριση συχνότητας του συστήματος στο παραπάνω στιγμιότυπο λειτουργίας, για απώλεια παραγωγής 23.50MW. Η απόκριση υπολογίζεται τόσο με την απλοποιημένη μέθοδο της ισοδύναμης μονάδας (4.9 – 4.11) όσο και με το αναλυτικό μοντέλο που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η μπλε γραμμή αντιστοιχεί στο μοντέλο της ισοδύναμης μονάδας και η κόκκινη στο αναλυτικό μοντέλο. Η μέγιστη απόκλιση στα δύο μοντέλα εμφανίζεται στην ελάχιστη συχνότητα, στην οποία το αναλυτικό μοντέλο δίδει τιμή 49.38Hz έναντι 49.34Hz του απλοποιημένου. Η διαφορά αυτή αντιστοιχεί σε σχετικό σφάλμα 0.08% το οποίο είναι πράγματι αμελητέο. Η πολύ καλή προσέγγιση του απλοποιημένου μοντέλου επιτρέπει την χρησιμοποίησή του στην προσομοίωση του συστήματος κατά Monte-Carlo. Η χρησιμοποίηση του αναλυτικού μοντέλου στην προσομοίωση κατά Monte-Carlo για αριθμό ετών της τάξεως αρκετών χιλιάδων θα οδηγούσε σε απαγορευτικούς χρόνους τρεξίματος του προγράμματος στον υπολογιστή.



Σχήμα 6.8 Απόκριση συχνότητας με το αναλυτικό και το απλοποιημένο μοντέλο (ζήτηση φορτίου 197MW και απώλεια 23.5MW)

Στο σχήμα 6.9 παρουσιάζεται η αντίδραση της μονάδας U2, σε συμβάν απώλειας παραγωγής 23.50MW, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι περιοριστές ισχύος. Η

συνεχής γραμμή αντιστοιχεί στην έξοδο του ρυθμιστή Pg και η διακεκομμένη στην έξοδο του στροβίλου Pm. Στο σχήμα 6.10 εμφανίζεται η αντίδραση της ίδιας μονάδας αλλά με τον περιοριστή ισχύος του ρυθμιστή στροφών ρυθμισμένο στα 25MW.

Όταν δεν υπάρχει περιοριστής ισχύος η μονάδα αντιδρά ελεύθερα σύμφωνα με τις παραμέτρους του ρυθμιστή και η φόρτισή της φθάνει τα 25.6MW σε περίπου 2 δευτερόλεπτα, φόρτιση στην οποία θα σταθεροποιηθεί μετά το σύντομο μεταβατικό στάδιο. Εάν ο περιοριστής είναι ρυθμισμένος σε χαμηλότερο όριο τότε, η έξοδος της μονάδας θα περιοριστεί στο όριο αυτό, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 6.10. Πρέπει να αναφερθεί ότι, οι μονάδες παραγωγής, συνήθως, διαθέτουν περιοριστές ισχύος αλλά η ανάλυση χωρίς αυτούς είναι χρήσιμη για λόγους σύγκρισης αποτελεσμάτων.



Σχήμα 6.9 Απόκριση ρυθμιστή Pg και στροβίλου Pm μονάδας U2 σε απώλεια 23.5MW χωρίς περιοριστή ισχύος (ζήτηση φορτίου197MW)



Σχήμα 6.10 Απόκριση ρυθμιστή Pg και στροβίλου Pm μονάδας U2 σε απώλεια 23.5 MW με περιοριστή ισχύος 25 MW (ζήτηση φορτίου197 MW)

To σχήμα 6.11 παρουσιάζει την απόκριση συχνότητας του συστήματος στις ίδιες με προηγουμένως συνθήκες (P_L =197MW, MinSRr=10% του P_L , απώλεια παραγωγής 23.5MW), θεωρώντας ότι ο περιοριστής κάθε μονάδας i είναι ρυθμισμένος στο όριο max $L_i = (1 + z) \cdot P_{N,i}$, όπου z είναι παράμετρος ρύθμισης και $P_{N,i}$ η ονομαστική ικανότητα της μονάδας i. Για z=0 η ρύθμιση είναι στη ονομαστική ικανότητα της μονάδας, για z=2.5% η ρύθμιση είναι στο $1.025P_{N,i}$ ενώ η περίπτωση χωρίς περιοριστή υλοποιείται όταν το z γίνει άπειρο ή πρακτικά ένας πολύ μεγάλος αριθμός.

Το διάγραμμα του σχήματος 6.11 παρουσιάζει την απόκριση συχνότητας για επτά διαφορετικές τιμές της παραμέτρου z. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα αυτό, για t=20s η συχνότητα έχει ήδη σταθεροποιηθεί στη τελική της τιμή και κατά συνέπεια, fresidual=f(t=20). Η κάθετος AB η οποία τέμνει τον άξονα των χρόνων πλησίον της τιμής t=20s τέμνει, επίσης, τις επτά καμπύλες απόκρισης συχνότητας σε αντίστοιχα σημεία τα οποία προσδιορίζουν διατεταγμένα ζεύγη τιμών (fresidual,j, z_j), j=1 to 7. Τα ζεύγη αυτά τιμών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την χάραξη της καμπύλης fresidual=fresidual=fresidual(z), η οποία φαίνεται στο σχήμα 6.12. Η καμπύλη αυτή δείχνει την συνάρτηση μεταβολής της εναπομένουσας συχνότητας σε σχέση με τις τιμές ρύθμισης z των περιοριστών στις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας του συστήματος και για D=1.

Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, η συνάρτηση αυτή αποτελείται από δύο σχεδόν ευθύγραμμα τμήματα, παρουσιάζοντας ένα σημείο καμπής περί την τιμή z=10%. Το πρώτο ευθύγραμμο τμήμα EF εμφανίζει θετική κλίση $\Delta f_{residual}/\Delta z=0.036$ Hz. Αυτό σημαίνει ότι, εάν η ρύθμιση z των περιοριστών ισχύος αυξηθεί κατά 1%, τότε η εναπομένουσα συχνότητα αυξάνεται, επίσης, κατά 360 mHz. Άρα, στο τμήμα αυτό της καμπύλης, οι περιοριστές ισχύος επηρεάζουν σημαντικά την απόκριση συχνότητας. Όσο στενότερα είναι τα όρια της ρύθμισης z πάνω από την ονομαστική ισχύ των μονάδων τόσο μικρότερη είναι η ανάκαμψη της συχνότητας μετά την διαταραχή. Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.12, το δεύτερο ευθύγραμμο τμήμα FG της συνάρτησης f_{residual}=f_{residual}(z) είναι οριζόντιο ευθύγραμμο τμήμα, γεγονός που σημαίνει ότι, αν οι περιοριστές ισχύος έχουν τιμές ρύθμισης z>10% δεν έχουν καμία επίδραση στην εναπομένουσα συχνότητα και την ασφάλεια του συστήματος.



Σχήμα 6.11 Απόκριση συχνότητας σε απώλεια 23.5MW για διάφορες στάθμες περιοριστών ισχύος των μονάδων (ζήτηση φορτίου 197MW)



Τιμές ρύθμισης των περιοριστών z (%)

Σχήμα 6.12 Εναπομένουσα συχνότητα συναρτήσει των τιμών ρύθμισης των περιοριστών z για P_L=197MW, MinSRr=10% και D=1

Το σχήμα 6.13 παρουσιάζει οικογένεια τεσσάρων καμπυλών f_{residual}=f_{residual}(z) οι οποίες έχουν σχεδιαστεί με τον ίδιο τρόπο όπως και η καμπύλη του σχήματος 5.4.7 αλλά υποθέτοντας διάφορες τιμές του συντελεστή απόσβεσης D (0.8, 1, 1.5 or 2). Η γραμμή CD η οποία είναι παράλληλη προς τον οριζόντιο άξονα και τέμνει τον κατακόρυφο άξονα στο σημείο f_{residual} = 49.40 Hz, τέμνει επίσης τις τέσσερις καμπύλες σε αντίστοιχα σημεία. Τα σημεία αυτά προσδιορίζουν διατεταγμένα ζεύγη τιμών (D_j, z_j), όπου j=1 to 4 και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την χάραξη της συνάρτησης z=z(D). Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.14, η σχέση αυτή απεικονίζεται από μια ευθεία γραμμή με αρνητική κλίση $\Delta z/\Delta D$ =-1.83 puHz/puMW. Αυτό σημαίνει ότι, εάν ο συντελεστής D αυξηθεί κατά 0.1puMW/puHz, επειδή πιθανόν το

φορτίο έγινε περισσότερο επαγωγικό, η ρύθμιση των περιοριστών z πρέπει να αυξηθεί κατά 0.1*1.83%=0.183% έτσι ώστε να παραμείνει η εναπομένουσα συχνότητα ίση με 49.40 Hz. Εάν, όμως, η ρύθμιση z παραμείνει ίδια και η απόσβεση φορτίου D αυξηθεί, το αποτέλεσμα είναι υψηλότερες τιμές της εναπομένουσας συχνότητας, όπως φαίνεται από το σχήμα 6.13. Κατά συνέπεια, όταν το φορτίο γίνεται πιο επαγωγικό, όπως συμβαίνει το καλοκαίρι στα νησιά με την μαζική χρήση κλιματιστικών συσκευών, η ασφάλεια του συστήματος βελτιώνεται υπό τις ίδιες λοιπές συνθήκες λειτουργίας.



Τιμές ρύθμισης των περιοριστών z (%)

Σχήμα 6.13 Εναπομένουσα συχνότητα συναρτήσει των τιμών ρύθμισης των περιοριστών z και διάφορες τιμές του D (P_L=197MW, MinSRr=10%, απώλεια παραγωγής 23.5MW)



Σχήμα 6.14 Εναπομένουσα συχνότητα συναρτήσει του συντελεστή απόσβεσης φορτίου D (P_L=197MW, MinSRr=10%, απώλεια παραγωγής 23.5MW)

Απόκριση συχνότητας συναρτήσει της ελάχιστης και στιγμιαίας στρεφόμενης εφεδρείας

To diáypamma tou schmatog 6.15 deízvei th metabolh thg stipmaíag streødmenng eqedreíag ISR sunarthsei thg elácistig epitepidenng MinSRr yia ídia zhthsh PL=197MW kai óleg tig monádeg diahésimeg. Ta shmeía S1, S2, S3 tou diaypámmatog eínai shmeía sta opoía h ISR gínetai ísh me thn MinSRr kai katá sunépiden, h ISR moreí na authof i me thu MinSRr kai katá sunépiden, h ISR maraíthsh san authof i me thu authof i me thu disk that tou na authof i me thu disk singer and the singer size of the size of



Σχήμα 6.15 Στιγμιαία στρεφόμενη εφεδρεία ISR συναρτήσει της ελάχιστης απαιτούμενης (P_L=197MW και όλες οι μονάδες διαθέσιμες)

Το διάγραμμα 6.16 παρουσιάζει την απόκριση συχνότητας χωρίς τους περιοριστές ισχύος και λαμβάνοντας διάφορες τιμές της στρεφόμενης εφεδρείας ISR. Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι, όταν η ISR αυξάνεται από 7.9% του P_L σε 59.7% του P_L , η εναπομένουσα συχνότητα σε συμβάν απώλειας παραγωγής 23.5MW βελτιώνεται από 49.49Hz σε 49.71Hz, δηλαδή μόλις κατά 0.22Hz. Επομένως, στρεφόμενη εφεδρεία ISR μεγαλύτερη από 7.9% του P_L που σημαίνει την λειτουργία επί πλέον μονάδων (U13, U14, U15 κλπ) είναι άσκοπη στις υπόψη συνθήκες.



Σχήμα 6.16 Απόκριση συχνότητας σε απώλεια παραγωγής 23.5MW χωρίς τους περιοριστές (P_L=197MW και όλες οι μονάδες διαθέσιμες)

Το διάγραμμα 6.17 παρουσιάζει τα αποτελέσματα, εξετάζοντας τις ίδιες όπως και προηγουμένως περιπτώσεις με την διαφορά ότι οι περιοριστές ισχύος είναι ρυθμισμένοι σε z=7.5%. Εάν η ISR είναι 7.9% του P_L , η εναπομένουσα συχνότητα πέφτει στο 48.09Hz ενώ αντιθέτως, βελτιώνεται σημαντικά στα 49.55Hz όταν η ISR αυξάνεται στο επόμενο βήμα (εκκίνηση μονάδας U13). Περαιτέρω αύξηση της ISR από 29.5% του P_L σε 59.7% του P_L με εκκίνηση των μονάδων U14 και U15 έχει ως αποτέλεσμα οριακή αύξηση της f_{residual} κατά 0.15Hz και κατά συνέπεια, δεν είναι απαραίτητη. Λαμβάνοντας υπόψη τα διαγράμματα 6.15 και 6.17 είναι προφανές ότι, θέτοντας ως όριο ελάχιστης εφεδρείας MinSRr ίσο με 5% του P_L , η εναπομένουσα συχνότητα λαμβάνει εξαιρετικά χαμηλή τιμή (48.09Hz) και κατά συνέπεια, το όριο αυτό δεν είναι επαρκές. Απεναντίας, εάν το όριο της MinSRr ανέλθει στο 10% του P_L , η εναπομένουσα συχνότητα λαμβάνει τιμή αποδεκτή (49.49Hz) και κατά συνέπεια, το όριο αυτό εφεδρείας θεωρείται επαρκές.



Σχήμα 6.17 Απόκριση συχνότητας σε απώλεια παραγωγής 23.5MW με τους περιοριστές στο 7.5% (P_L=197MW και όλες οι μονάδες διαθέσιμες)

Oi káθετες γραμμές AB στα διαγράμματα 6.16 και 6.17 τέμνουν τις καμπύλες σε ορισμένα σημεία που δίδουν ζεύγη τιμών (ISR_j, $f_{residual,j}$) όπου j=1 έως 4. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 6.15, για ορισμένη ζήτηση φορτίου η ISR είναι μια μη συνεχής μεταβλητή η οποία λαμβάνει διακριτές τιμές που εξαρτώνται από το μέγεθος των επόμενων μονάδων που θα ενταχθούν στο σύστημα. Για P_L =197MW και όλες τις μονάδες διαθέσιμες η ISR λαμβάνει τις τιμές 7.9%*P_L, 29.2%*P_L, 39.4%*P_L, 52.6%*P_L. Κατά συνέπεια, μπορούν να σχεδιαστούν τα ιστογράμματα 6.18 και 6.19 τα οποία παρουσιάζουν την μεταβολή της εναπομένουσας συχνότητας σε συνάρτηση με τις τιμές της διακριτής μεταβλητής ISR.



Σχήμα 6.18 Μεταβολή της f_{residual} συναρτήσει της ISR σε απώλεια παραγωγής 23.5MW χωρίς τους περιοριστές (P_L=197MW και όλες οι μονάδες διαθέσιμες)



Σχήμα 6.19 Μεταβολή της $f_{residual}$ συναρτήσει της ISR σε απώλεια παραγωγής 23.5MW με τους περιοριστές στο 7.5% (P_L =197MW και όλες οι μονάδες διαθέσιμες)

Ο Πίνακας 6.1 παρουσιάζει την εναπομένουσα συχνότητα και την ανάληψη επί πλέον φορτίου κάθε μονάδας για διάφορες τιμές SR και περιοριστών z όταν η ζήτηση είναι 197MW και συμβεί απώλεια παραγωγής 23.5MW (trip μονάδας U3). Η απαίτηση για ελάχιστη SR ίση με 0% ή 5% της ζήτησης φορτίου οδηγεί και στις δυο περιπτώσεις σε λειτουργία των μονάδων U1 έως U12 και συνεπάγεται ISR ίση με 15.6MW ή 7.9% της ζήτησης.

Εάν οι περιοριστές ισχύος είναι ρυθμισμένοι στο 7.5% πάνω από την ονομαστική ικανότητα των μονάδων και συμβεί ξαφνική απώλεια της μονάδος U3 τότε, όλες οι υπόλοιπες μονάδες αναλάβουν ισχύ, ολιγότερη σε σχέση με εκείνη που θα αναλάμβαναν χωρίς τους περιοριστές. Για παράδειγμα η μονάδα U11 αναλαμβάνει 7.21MW χωρίς τους περιοριστές ενώ αναλαμβάνει 4.75MW με τους περιοριστές στο 7.5%. Οι μονάδες θα αναλάβουν τόσο επί πλέον φορτίο όσο τους επιτρέπει ο περιοριστής τους, δηλαδή 7.5% της ονομαστικής τους ικανότητας. Εξαίρεση αποτελεί η μονάδα U1, η οποία για στρεφόμενη εφεδρεία μεγαλύτερη του 10% οπότε η εναπομένουσα συχνότητα διατηρείται υψηλότερη των 49.55 Hz, η μονάδα αυτή δεν αναλαμβάνει 1.76 MW που της επιτρέπει ο περιοριστής ισχύος της αλλά ολιγότερο φορτίο. Αυτό οφείλεται στον υψηλό στατισμό της (22%) και κατά συνέπεια, στην εγγενή αναισθησία της.

Η συνολική επί πλέον φόρτιση των μονάδων λόγω της διαταραχής είναι 21.44MW χωρίς τους περιοριστές ισχύος και 15.64MW με τους περιοριστές στο 7.5 % για απώλεια παραγωγής 23.50MW. Η μεγαλύτερη απόκλιση ανάμεσα στην παραγωγή και την ζήτηση στην δεύτερη περίπτωση οδηγεί σε ισχυρότερη βύθιση της συχνότητας, δηλαδή σε 48.09Hz έναντι 49.49Hz χωρίς τους περιοριστές.

Στην συνέχεια στο κεφάλαιο αυτό, θα χρησιμοποιηθεί ο όρος κέρδος για να χαρακτηρίσει την αύξηση της συνολικής επί πλέον φόρτισης των μονάδων (λόγω διαταραγής) όταν η στρεφόμενη εφεδρεία αυξάνεται ενώ η ζήτηση και οι λοιπές συνθήκες λειτουργίας του συστήματος διατηρούνται σταθερές. Χωρίς τους περιοριστές, η επί πλέον φόρτιση των μονάδων από 21.44MW όταν η ISR είναι ίση με 7.9 % αυξάνεται σε 22.34MW όταν η ISR γίνει ίση με 59.70 % της ζήτησης. Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι χωρίς τους περιοριστές, μια σημαντική αύξηση της ISR από 7.9% σε 59.7% του PL συνεπάγεται ένα κέρδος μόλις 0.90MW. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.4.1, η αύξηση της ISR από 7.9% σε 59.7% του PL επιτυγγάνεται με την επί πλέον ένταξη στο σύστημα τριών μονάδων (U13, U14, U15). Οι νέες αυτές μονάδες που εντάσσονται στο σύστημα αναλαμβάνουν 10.19MW μετά την απώλεια της μονάδας U3, ισχύς πολύ μεγαλύτερη από την συνολικό κέρδος των 0.90MW που επιτυγγάνεται στην περίπτωση αυτή. Επομένως, η πολύ μεγαλύτερη ISR που μπορεί να διαθέτει το σύστημα δεν αξιοποιείται για περαιτέρω ανάκαμψη της συγνότητας. Το σύστημα αξιοποίησε σχεδόν την ίδια ποσότητα ISR, μόνο που στην δεύτερη περίπτωση αυτή προήλθε από τις νέες μονάδες που εντάχθηκαν στο σύστημα οι οποίες δεν ήταν φορτωμένες με αποτέλεσμα εκείνες που ήδη λειτουργούσαν στο ονομαστικό τους φορτίο να οδηγηθούν σε ελαφρά μόνο υπερφόρτωση.

Με τους περιοριστές z=7.5%, μετά την διαταραχή η συνολική επί πλέον φόρτιση των μονάδων από 15.64MW όταν η ISR είναι 7.9% αυξάνεται σε 22.32MW όταν η ISR γίνει 52.6%. Άρα, στην περίπτωση αυτή, το κέρδος είναι 6.68MW όταν η στρεφόμενη

εφεδρεία είναι υψηλή. Οι τρεις επί πλέον μονάδες (U13, U14, U15) οι οποίες τίθενται σε λειτουργία προκειμένου η ISR να είναι υψηλή, αναλαμβάνουν 10.27 MW ενώ το κέρδος είναι 6.68MW. Κατά συνέπεια, με τους περιοριστές στο 7.5% η διατήρηση υψηλότερης ISR οδηγεί στην αξιοποίηση ενός μεγαλύτερου μέρους της που συμβάλει στην καλύτερη ανάκαμψη της συχνότητας. Βέβαια, το κέρδος των 6.68MW, λόγω αξιοποίησης επί πλέον ISR, μπορεί να είναι υπολογίσιμο σε σχέση με το κέρδος των 0.90MW σε χαμηλή εφεδρεία, όμως είναι αμελητέο συγκρινόμενο με την συνολική διαθέσιμη ISR των 117.60MW.

Στη περίπτωση που η ISR είναι ίση με 7.9% της ζήτησης, οι μονάδες με την διαθέσιμη ISR είναι οι μονάδες U11 και U12, με 1.60MW και 14MW αντίστοιχα. Μετά την απώλεια παραγωγής 23.50MW, η μονάδα U11 αξιοποιεί ολόκληρη την διαθέσιμη ISR και επί πλέον, προχωρεί σε υπερφόρτιση. Αντιθέτως, η μονάδα U12 χρησιμοποιεί μόνο 1.37MW χωρίς τους περιοριστές και 2.97MW με τους περιοριστές από την συνολική της ISR που ανέρχεται στα 14MW. Επειδή η μονάδα U12 είναι η ατμομονάδα ενός συνδυασμένου κύκλου έχει εξαιρετικά μεγάλη τιμή στατισμού, ίση με 55%. Για τον λόγο αυτό είναι σχεδόν αναίσθητη στις διαταραχές του ισοζυγίου ισχύος. Αξίζει να σημειωθεί ότι, η συνολική ISR του συστήματος που αξιοποιήθηκε στην περίπτωση αυτή είναι 1.97MW χωρίς τους περιοριστές και 2.97MW με τους περιοριστές από την συνολική διαθέσιμη ISR που ανέρχεται στα 15.60MW. Η υπόλοιπη ισχύς έως 21.44MW (χωρίς περιοριστές) ή 15.64MW (με z=7.5%) που παρήχθη από τις μονάδες για την διάσωση του συστήματος προήλθε από την υπερφόρτιση των υπολοίπων μονάδων οι οποίες λειτουργούσαν ήδη στο ονομαστικό τους φορτίο.

Στην ακραία περίπτωση συνολικής ISR ίσης με 59.7% της ζήτησης, η εφεδρεία αυτή σε απόλυτες τιμές είναι ίση με 117.6MW και κατανέμεται στις μονάδες U11 έως U15. Πρέπει να σημειωθεί ότι, οι μονάδες U11, U13, U15 έχουν χαμηλούς στατισμούς (4% έως 6%), γεγονός που σημαίνει μονάδες ευαίσθητες στις διαταραχές συχνότητας. Από την συνολική ISR των 117.60MW που διαθέτει το σύστημα αξιοποιήθηκαν μόνο 14.45MW (χωρίς περιοριστές) και 14.64MW (με z=7.5%). Ακόμη και στην περίπτωση αυτή όπου υπάρχει υπερβολικά υψηλή ISR κατανεμημένη σε 5 μονάδες παραγωγής, σημαντική ισχύς για την υποστήριξη του συστήματος ίση με 7.85MW (χωρίς περιοριστές) και 7.68MW (με περιοριστές) προήλθε από τη υπερφόρτιση των υπολοίπων 9 μονάδων που λειτουργούσαν στο ονομαστικό τους φορτίο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, η επί πλέον φόρτιση των μονάδων μετά την διαταραχή και χωρίς περιοριστές, ικανοποιεί την σχέση του στατισμού 5.2.1. Για παράδειγμα, εάν η ISR είναι 7.9% του P_L , σύμφωνα με την εξίσωση 5.2.1 η μονάδα U11 θα αναλάβει επί πλέον φορτίο ΔP_{11} =42*(50-49.49)/50*0.06=7.20MW, όπως ακριβώς υπολογίζεται και από την μοντελοποίηση του συστήματος. Ασφαλώς, η σχέση αυτή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν επενεργούν οι περιοριστές ισχύος.

Στο σχήμα 6.20 παρουσιάζεται η μεταβολή της ISR για ζήτηση φορτίου 197MW σε συνάρτηση με τις ομάδες των μονάδων που διαθέτουν την στρεφόμενη εφεδρεία. Κάθε φορά που κάποια νέα μονάδα εντάσσεται στο σύστημα (U13, U14, U15), η συνολική ISR αυξάνεται βηματικά κατά την ισχύ της μονάδας αυτής. Είναι φυσικό ότι, σε απώλεια παραγωγής η νέα μονάδα που εντάχθηκε στο σύστημα θα αναλάβει και αυτή μέρος της ζήτησης σύμφωνα με την σχέση 6.1. Επομένως, το σφάλμα συχνότητας Δf θα είναι μικρότερο λόγω συμβολής της νέας μονάδας και οι υπόλοιπες μονάδες θα αναγκαστούν να αναλάβουν λιγότερο φορτίο σύμφωνα με την ίδια σχέση, γεγονός που οδηγεί και πάλι σε κάποια μικρή αύξηση του σφάλματος Δf. Τελικά, η συχνότητα θα σταθεροποιηθεί σε κάποιο επίπεδο, υψηλότερο από εκείνο που θα προέκυπτε χωρίς την ένταξη της τελευταίας μονάδας ακόμη και αν αυτή λειτουργεί στο ονομαστικό της φορτίο, δηλαδή χωρίς στρεφόμενη εφεδρεία.



Σχήμα 6.20 Μεταβολή της ISR συναρτήσει των ομάδων των μονάδων που διαθέτουν στρεφόμενη εφεδρεία για ζήτηση 197MW

Ελάχιστη SR MinSRr		··· <i>Ţ</i> · <i>Ţ</i>		09	%	<u></u>	13-	5%	/0			10	%			15	%	
Limiters (z)					NO	7.5%			NO	7.5%			NO	7.5%			NO	7.5%
Εναπομένουσα συχνότητα					49.49	48.09			49.49	48.09			49.61	49.55			49.61	49.55
Μονάδα	Ονομαστική ικανότητα (MW)	Τεχνικό ελάχιστο (MW)	Αρχική φόρτιση (MW)	ISR (MW)	Ανάλη πλέον α (Μ	ψη επι ρορτίου W)	Αρχική φόρτιση (MW)	ISR (MW)	Ανάλη πλέον α (Μ	ψη επι ρορτίου W)	Αρχική φόρτιση (MW)	ISR (MW)	Ανάλη πλέον α (Μ	ιψη επι ρορτίου W)	Αρχική φόρτιση (MW)	ISR (MW)	Ανάλη πλέον ((Μ	ιψη επι ρορτίου W)
U1	23.5	18.0	23.5	0.0	1.10	1.76	23.5	0.0	1.10	1.76	23.5	0.0	0.84	0.97	23.5	0.0	0.84	0.97
U2	23.5	18.0	23.5	0.0	2.69	1.76	23.5	0.0	2.69	1.76	23.5	0.0	2.06	1.76	23.5	0.0	2.06	1.76
U3	23.5	18.0	23.5	0.0	trip	trip	23.5	0.0	trip	trip	23.5	0.0	trip	trip	23.5	0.0	trip	trip
U4	14.1	8.0	14.1	0.0	1.61	1.06	14.1	0.0	1.61	1.06	14.1	0.0	1.24	1.06	14.1	0.0	1.24	1.06
U5	14.1	8.0	14.1	0.0	1.45	1.06	14.1	0.0	1.45	1.06	14.1	0.0	1.11	1.06	14.1	0.0	1.11	1.06
U6	5.9	4.0	5.9	0.0	0.76	0.44	5.9	0.0	0.76	0.44	5.9	0.0	0.58	0.44	5.9	0.0	0.58	0.44
U7	11.5	3.0	11.5	0.0	1.69	0.86	11.5	0.0	1.69	0.86	11.5	0.0	1.3	0.86	11.5	0.0	1.30	0.86
U8	11.5	3.0	11.5	0.0	1.18	0.86	11.5	0.0	1.18	0.86	11.5	0.0	0.91	0.86	11.5	0.0	0.91	0.86
U9	11.5	3.0	11.5	0.0	1.69	0.86	11.5	0.0	1.69	0.86	11.5	0.0	1.3	0.86	11.5	0.0	1.30	0.86
U10	11.5	3.0	11.5	0.0	1.69	0.86	11.5	0.0	1.69	0.86	11.5	0.0	1.3	0.86	11.5	0.0	1.30	0.86
U11	42.0	12.0	40.4	1.6	7.21	4.75	40.4	1.6	7.21	4.75	28.4	13.6	5.52	6.33	28.4	13.6	5.52	6.33
U12	20.0	6.0	6.0	14.0	0.37	1.37	6.0	14.0	0.37	1.37	6.0	14.0	0.29	0.33	6.0	14.0	0.29	0.33
U13	42.0	12.0									12.0	30.0	5.52	6.33	12.0	30.0	5.52	6.33
U14	20.0	6.0																
U15	40.0	3.0																
Αθροισμα			197.0	15.6 ή 7.9%	21.44	15.64	197.0	15.6 ή 7.9%	21.44	15.64	197.0	57.6 ή 29.2%	21.97	21.72	197.0	57.6 ή 29.2%	21.97	21.72

Πίνακας 6.1 Ανάληψη φορτίου μονάδων και εναπομένουσα συχνότητα σε απώλεια 23.50MW για διάφορα επίπεδα στρεφόμενης εφεδρείας με και χωρίς limiters

Ελάχιστη SR MinSRr				25	%			30	%			35	%			40	%	
Limiters (z)					NO	7.5%			NO	7.5%			NO	7.5%			NO	7.5%
Εναπομέ νουσα συχνότητα					49.61	49.55			49.61	49.56			49.61	49.56			49.71	49.70
Μονάδα	Ονομαστική ικανότητα (MW)	Τεχνικό ελάχιστο (MW)	Αρχική φόρτιση (MW)	ISR (MW)	Ανάλη πλέον α (Μ	ιψη επι φορτίου [W)	Αρχική φόρτιση (MW)	ISR (MW)	Ανάλη πλέον α (Μ	ιψη επι ρορτίου W)	Αρχική φόρτιση (MW)	ISR (MW)	Ανάλη πλέον α (Μ	ιψη επι φορτίου [W)	Αρχική φόρτιση (MW)	ISR (MW)	Ανάλη πλέον φ (Μ	ιψη επι ρορτίου W)
U1	23.5	18.0	23.5	0.0	0.84	0.97	23.5	0.0	0.83	0.95	23.5	0.0	0.83	0.9	23.5	0.0	0.62	0.63
U2	23.5	18.0	23.5	0.0	2.06	1.76	23.5	0.0	2.03	1.76	23.5	0.0	2.03	1.8	23.5	0.0	1.53	1.55
U3	23.5	18.0	23.5	0.0	trip	trip	23.5	0.0	trip	trip	23.5	0.0	trip	trip	23.5	0.0	trip	trip
U4	14.1	8.0	14.1	0.0	1.24	1.06	14.1	0.0	1.22	1.06	14.1	0.0	1.22	1.1	14.1	0.0	0.92	0.93
U5	14.1	8.0	14.1	0.0	1.11	1.06	14.1	0.0	1.10	1.06	14.1	0.0	1.10	1.1	14.1	0.0	0.82	0.84
U6	5.9	4.0	5.9	0.0	0.58	0.44	5.9	0.0	0.57	0.44	5.9	0.0	0.57	0.4	5.9	0.0	0.43	0.44
U7	11.5	3.0	11.5	0.0	1.30	0.86	11.5	0.0	1.28	0.86	11.5	0.0	1.28	0.9	11.5	0.0	0.96	0.86
U8	11.5	3.0	11.5	0.0	0.91	0.86	11.5	0.0	0.90	0.86	11.5	0.0	0.90	0.9	11.5	0.0	0.67	0.68
U9	11.5	3.0	11.5	0.0	1.30	0.86	11.5	0.0	1.28	0.86	11.5	0.0	1.28	0.9	11.5	0.0	0.96	0.86
U10	11.5	3.0	11.5	0.0	1.30	0.86	11.5	0.0	1.28	0.86	11.5	0.0	1.28	0.9	11.5	0.0	0.96	0.86
U11	42.0	12.0	28.4	13.6	5.52	6.33	22.4	19.6	5.45	6.2	22.4	19.6	5.45	6.2	19.4	22.6	4.10	4.15
U12	20.0	6.0	6.0	14.0	0.29	0.33	6.0	14.0	0.28	0.32	6.0	14.0	0.28	0.3	6.0	14.0	0.21	0.22
U13	42.0	12.0	12.0	30.0	5.52	6.33	12.0	30.0	5.45	6.2	12.0	30.0	5.45	6.2	12.0	30.0	4.10	4.15
U14	20.0	6.0					6.0	14.0	0.28	0.32	6.0	14.0	0.28	0.3	6.0	14.0	0.21	0.22
U15	40.0	3.0													3.0	37.0	5.85	5.9
Αθροισμα			197.0	57.6 ή 29.2%	21.97	21.72	197.0	77.6 ή 39.4%	21.95	21.75	197.0	77.6 ή 39.4%	21.95	21.75	197.0	117.6 59.7%	22.34	22.32

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η αύξηση της στρεφόμενης εφεδρείας συστήματος με ν μονάδες σε λειτουργία επιτυγχάνεται μέσω της ένταξης κάποιας νέας μονάδας παραγωγής. Μετά την ένταξη της μονάδας, η στρεφόμενη εφεδρεία του συστήματος αυξάνεται κατά την ικανότητα της μονάδας αυτής και μια νέα οικονομική κατανομή φορτίου προκύπτει με ανακατανομή της στρεφόμενης εφεδρείας στις λειτουργούσες μονάδες. Επομένως, σε γεγονός απώλειας παραγωγής οι μονάδες που θα αναλάβουν την διάσωση του συστήματος αυξάνονται πλέον από ν σε ν+1. Άρα, η αύξηση της στρεφόμενης εφεδρείας έχει δύο συνιστώσες που συνδράμουν αμφότερες στην ασφάλεια του συστήματος:

- Προσθήκη επί πλέον μονάδας στις ήδη λειτουργούσες με δεδομένη ζήτηση φορτίου που σημαίνει ότι και η νέα μονάδα θα αναλάβει μέρος του φορτίου μέσω της πρωτεύουσας ρύθμισής της μετά από απώλεια παραγωγής. Εάν το πλήθος των μονάδων σε λειτουργία ν είναι μικρός αριθμός, ο παράγων αυτός είναι σημαντικός ενώ γίνεται μικρότερης σημασίας καθώς αυξάνεται η τιμή του ν (μεγάλα συστήματα).
- Εξασφάλιση περισσότερης συνολικής στρεφόμενης εφεδρείας αθροιστικά σε όλες τις μονάδες του συστήματος, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί ώστε να καλύψει την δεδομένη απώλεια παραγωγής.

Προκειμένου να διερευνηθεί ο δεύτερος παράγοντας, ο οποίος δεν εξαρτάται από το πλήθος ν των μονάδων σε λειτουργία και άρα, από το μέγεθος του συστήματος, εξετάζονται τα παρακάτω υποθετικά σενάρια κατά τα οποία απομονώνεται η συμβολή του πρώτου παράγοντα.

- Σενάριο 1. Στο Πίνακα 6.2 παρουσιάζεται το σενάριο ζήτησης φορτίου P_L =197MW, ελάχιστης στρεφόμενης εφεδρείας MinSR=10% του P_L και τους περιοριστές z = 7.5%, οπότε η εναπομένουσα συχνότητα διαμορφώνεται στα 49.55Hz μετά από απώλεια 23.50MW. Η ζήτηση των 197MW ισούται με το άθροισμα των αρχικών φορτίσεων των μονάδων. Η συνολική ονομαστική ικανότητα των μονάδων ισούται με 254.60MW κατά συνέπεια, η στιγμιαία στρεφόμενη εφεδρεία ISR είναι 254.60MW 197MW = 57.60MW δηλαδή 29.2% της ζήτησης, ενώ η ελάχιστη απαίτηση σε SR είναι 10%. Η σημαντική αυτή απόκλιση ανάμεσα στην απαιτούμενη ελάχιστη εφεδρεία και στην πραγματική στιγμιαία ISR οφείλεται στο γεγονός ότι η τελευταία μονάδα U13 που εντάχθηκε στο σύστημα είναι αρκετά μεγάλη (42 MW). Εάν αφαιρούνταν από το σύστημα τότε, η συνολική ικανότητα των μονάδων θα μειωνόταν στα 212.60MW και επομένως, η ISR θα περιοριζόταν στα 15.60MW (7.9%*P_L)
- Σενάριο 2. Εάν υποθέσουμε ότι οι μονάδες U12 και U13 ήταν μικρότερης ονομαστικής ικανότητας, δηλαδή 8MW και 26MW αντίστοιχα, άλλα με ίδια τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά τους τότε, η στιγμιαία στρεφόμενη εφεδρεία ISR θα περιοριζόταν στα 29.60MW από τα 57.60MW, δηλαδή στο 15% της ζήτησης. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.2, η εναπομένουσα συχνότητα θα διαμορφωνόταν στα 49.60Hz δηλαδή, μόλις 0.09Hz χαμηλότερη σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή της στο σενάριο 1, όπου κρατείται σχεδόν διπλάσια στρεφόμενη εφεδρεία ISR (29.2% έναντι 15%).

Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι, στο σενάριο 1 από τη συνολική στρεφόμενη εφεδρεία των 57.60MW δεν αξιοποιήθηκαν 44.60MW αλλά μόνο 13MW και στο σενάριο 2

αξιοποιήθηκαν 12.40MW. Επομένως, και στις δύο περιπτώσεις για απώλεια παραγωγής 23.50MW, το σύστημα παρουσιάζει δυνατότητα να αξιοποιήσει ορισμένη ποσότητα στρεφόμενης εφεδρείας (12MW - 13MW), οσοδήποτε υψηλή και αν είναι η διαθέσιμη ISR.

	Στρεφα	όμενη εφ	οεδρεία Ι	Σενάριο 1 SR=29.2%	xP _L και Ι	limiters z	z=7.5%	Στρεφ	όμενη ε	φεδρεία	Σενάριο 2 ISR=15%>	! «Ρ _L και li	miters z	=7.5%
Εναπομέ νουσα συχνότητα				49.55 Hz							49.46 Hz			
Μονάδα	Ονομ/κή Ικανότητα (MW)	Αρχική φόρτιση (MW)	Στρ/νη εφεδρεία ISR (MW)	Ανάληψη επι πλέον φορτίου (MW)	Τελική φόρτιση (MW)	Αναξιο- ποίητη ISR (MW)	Αξιιο- ποιηθείσα ISR (MW)	Ονομ/κή Ικανότητα (MW)	Αρχική φόρτιση (MW)	Στρ/νη εφεδρεία ISR (MW)	Ανάληψη επι πλέον φορτίου (MW)	Τελική φόρτιση (MW)	Αναξιο- ποίητη ISR (MW)	Αξιιο- ποιηθείσα ISR (MW)
U1	23.5	23.5	0	0.97	24.47			23.5	23.5	0	1.2	24.67		
U2	23.5	23.5	0	1.76	25.26			23.5	23.5	0	1.8	25.26		
U3	23.5	23.5	0					23.5	23.5	0				
U4	14.1	14.1	0	1.06	15.16			14.1	14.1	0	1.1	15.16		
U5	14.1	14.1	0	1.06	15.16			14.1	14.1	0	1.1	15.16		
U6	5.9	5.9	0	0.44	6.34			5.9	5.9	0	0.4	6.34		
U7	11.5	11.5	0	0.86	12.36			11.5	11.5	0	0.9	12.36		
U8	11.5	11.5	0	0.86	12.36			11.5	11.5	0	0.9	12.36		
U9	11.5	11.5	0	0.86	12.36			11.5	11.5	0	0.9	12.36		
U10	11.5	11.5	0	0.86	12.36			11.5	11.5	0	0.9	12.36		
U11	42.0	28.4	13.6	6.33	34.73	7.27	6.33	42.0	28.4	13.6	7.7	36.06	5.9	7.66
U12	20.0	6.0	14	0.33	6.33	13.67	0.33	8.0	6.0	2	0.2	6.18	1.8	0.18
U13	42.0	12.0	30	6.3	18.33	23.67	6.33	26.0	12.0	14	4.6	16.56	9.4	4.56
Αθροισμα	254.6	197.0	57.6 ή 29.2%	21.7	195.2	44.6	13.0	226.6	197.0	29.6 ή 15%	21.3	194.8	17.2	12.4

Πίνακας 6.2 Εξέταση δύο σεναρίων διαφορετικής στρεφόμενης εφεδρείας αλλά με τον ίδιο αριθμό μονάδων σε λειτουργία

 Συμπεράσματα για τον ρόλο της στρεφόμενης εφεδρείας των μονάδων αιχμής κατά τα πρώτο κρίσιμα δευτερόλεπτα

Από την προηγούμενη ανάλυση μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η διαθέσιμη ISR η οποία είναι συγκεντρωμένη στις μονάδες αιχμής αξιοποιείται μόνο εν μέρει κατά τα πρώτα κρίσιμα δευτερόλεπτα μετά από απώλεια κάποιας μονάδας παραγωγής.
- Ο μηχανισμός που είναι εν ενεργεία κατά τα πρώτα κρίσιμα δευτερόλεπτα είναι η πρωτεύουσα ρύθμιση όλων των μονάδων που βρίσκονται σε λειτουργία. Ο μηχανισμός αυτός περιγράφεται αναλυτικά από τις εξισώσεις 5.3.1 - 5.3.2n+2, και δεν εξαρτάται από την διαθέσιμη στρεφόμενη εφεδρεία ISR.
- Η ύπαρξη περισσότερης ISR συνεπάγεται ότι επί πλέον μονάδα έχει συγχρονιστεί στο σύστημα, η οποία επίσης συνεισφέρει στην αποκατάσταση

της συχνότητας μέσω της πρωτεύουσας ρύθμισης της μονάδας αυτής. Η απαίτηση για μεγαλύτερη ελάχιστη στρεφόμενη εφεδρεία οδηγεί συχνά στην ένταξη και άλλων μονάδων οι οποίες συμβάλλουν επίσης στην αποκατάσταση της συχνότητας.

- Το πλεονέκτημα μιας μονάδας που διαθέτει αρκετή ISR σε αντιδιαστολή με κάποια άλλη που λειτουργεί στο ονομαστικό της φορτίο είναι ότι η πρώτη έχει μικρό ή καθόλου περιορισμό λόγω των ανισοτήτων 5.3.2n+3 5.3.3n+2. Όταν μια μονάδα λειτουργεί κάτω από το ονομαστικό φορτίο, το περιθώριο ανάληψης φορτίου μέχρι το άνω όριο που επιβάλει ο περιοριστής είναι μεγαλύτερο. Η επενέργεια των περιοριστών ισχύος εμποδίζει τις μονάδες που λειτουργούν στο ονομαστικό τους φορτίο να αναλάβουν επί πλέον φορτίο σύμφωνα με τον στατισμό τους. Απεναντίας, οι μονάδες που διαθέτουν αρκετή στρεφόμενη εφεδρεία είναι ελεύθερες να αναλάβουν φορτίο σύμφωνα με τον στατισμό τους σε γεγονότα βύθισης της συχνότητας.
- Οσο μικρότερο είναι το περιθώριο των περιοριστών πάνω από την ονομαστική ικανότητα των μονάδων, τόσο πιο χρήσιμη γίνεται η ISR καθώς αξιοποιείται μεγαλύτερο ποσοστό της λόγω επικράτησης χαμηλότερης συχνότητας στο σύστημα.
- Σε ένα σύστημα, σημαντικό μέρος της ισχύος που αναλαμβάνει να αναπληρώσει απώλεια παραγωγής προέρχεται από όλες τις μονάδες που λειτουργούν ακόμη και από εκείνες που λειτουργούν στο ονομαστικό τους φορτίου και όχι μόνο από αυτές που διαθέτουν ISR. Η εναπομένουσα συχνότητα μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση είναι η συνισταμένη προσπάθεια όλων των μονάδων που βρίσκονται σε λειτουργία.

6.5 Κατανομή Στρεφόμενης Εφεδρείας ISR στις Μονάδες

Στη συνέχεια εξετάζεται η συμπεριφορά του συστήματος όταν η στρεφόμενη εφεδρεία δεν είναι συγκεντρωμένη σε μια ή δύο μονάδες αιχμής αλλά κατανεμημένη σε περισσότερες ή σε όλες τις μονάδες του συστήματος. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 4, το είδος αυτό της στρεφόμενης εφεδρείας ονομάζεται **ρυθμιστική** εφεδρεία. Για την διερεύνηση του ρόλου της ρυθμιστικής εφεδρείας εξετάζονται και συγκρίνονται τα ακόλουθα σενάρια:

Σενάριο Α. Το σενάριο αυτό αφορά στα ακόλουθα δεδομένα: ζήτηση φορτίου P_L=197MW, ελάχιστη απαίτηση στρεφόμενης εφεδρείας MinSRr=5%*P_L, περιοριστές ισχύος των μονάδων z=7.5% και απώλεια παραγωγής 23.50MW (trip μονάδας U3). Στο Πίνακα 6.3 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα, όπου φαίνεται ότι, η ISR είναι 15.60MW, δηλαδή 7.9% της ζήτησης. Όπως φαίνεται στον Πίνακα αυτό, η στρεφόμενη εφεδρεία βρίσκεται συγκεντρωμένη κυρίως στην πιο αντιοικονομική από τις λειτουργούσες μονάδες, την μονάδα U12, η οποία διαθέτει εφεδρεία 14MW και δευτερευόντως στη U11, η οποία διαθέτει 1.60MW. Η εναπομένουσα συχνότητα μετά την διαταραχή διαμορφώνεται στα 48.09Hz.

Σενάριο Β. Το σενάριο αυτό είναι όμοιο με το προηγούμενο με την διαφορά ότι η στρεφόμενη εφεδρεία ISR (15.60MW) δεν είναι συγκεντρωμένη σε δύο μόνο μονάδες αλλά κατανέμεται σε όλες τις μονάδες του συστήματος. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.3 η κατανομή γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε οι μονάδες με την μεγαλύτερη ονομαστική ικανότητα και τον μικρότερο στατισμό να διαθέτουν υψηλότερη εφεδρεία. Η εναπομένουσα συχνότητα μετά την διαταραχή είναι 49.49Hz, δηλαδή 1.40Hz υψηλότερη σε σχέση με την αντίστοιχη του σεναρίου Α.

Επομένως, για ισόποση στρεφόμενη εφεδρεία και όλες τις άλλες παραμέτρους του συστήματος ίδιες, η κατανομή της στρεφόμενης εφεδρείας σε όλες τις μονάδες είχε ως αποτέλεσμα η εναπομένουσα συχνότητα να ισορροπήσει στα 49.49Hz, επίπεδο που δεν κρίνεται επισφαλές για το σύστημα. Απεναντίας, στο σενάριο της συγκεντρωμένης εφεδρείας, το σύστημα μετά την διαταραχή εισέρχεται σε πολύ επικίνδυνη κατάσταση δεδομένου ότι η εναπομένουσα συχνότητα υποχωρεί στα 48.09Hz.

Αξίζει να τονιστεί ότι, στο σενάριο Β η στρεφόμενη εφεδρεία ISR αξιοποιείται σχεδόν εξ ολοκλήρου σε αντίθεση με το σενάριο Α, όπου 12.60MW στρεφόμενης εφεδρείας (80% της διαθέσιμης ISR) παραμένουν αναξιοποιήτα. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.3, στο σενάριο Β η στρεφόμενη εφεδρεία αξιοποιήθηκε κατά την φάση της πρωτεύουσας ρύθμισης από όλες τις μονάδες οι οποίες συνεισέφεραν στην ασφάλεια του συστήματος. Απεναντίας, στο σενάριο Α η συγκεντρωμένη στρεφόμενη εφεδρεία δεν μπόρεσε να αξιοποιηθεί από την μονάδα U12 που κυρίως την διέθετε, λαμβανομένου υπόψη ότι εφεδρεία 12.60MW έμεινε αναξιοποίητη από την συνολική εφεδρεία των 15.60MW.

Στη συνέχεια αναλύονται και συγκρίνονται δύο επιπλέον σενάρια, τα Γ και Δ :

- Σενάριο Γ. Η ζήτηση φορτίου είναι 220MW και οι περιοριστές είναι στο 7.5%. Η ελάχιστη στρεφόμενη εφεδρεία είναι 10%, γεγονός που συνεπάγεται ISR ίση με 34.60MW ή 15.7% της ζήτησης. Η εφεδρεία αυτή κατανέμεται στις μονάδες U13 (30MW) και U11 (4.60MW). Στον Πίνακα 6.4 παρουσιάζεται η φόρτιση των μονάδων με βάση την οικονομική λειτουργία και τα τεχνικά τους ελάχιστα. Η διαταραχή του ισοζυγίου ισχύος προέρχεται από την απώλεια της μονάδας U11, η οποία λειτουργούσε στο ονομαστικό της φορτίο, δηλαδή στα 42MW. Η εναπομένουσα συχνότητα μετά την διαταραχή διαμορφώνεται στα 48.39Hz.
- Σενάριο Δ. Η ζήτηση φορτίου και οι περιοριστές είναι όπως στο σενάριο Γ.
 Όμως, η εφεδρεία ISR (34.60MW) κατανέμεται σε όλες τις μονάδες του συστήματος. Η εναπομένουσα συχνότητα μετά την απώλεια των 42MW διαμορφώνεται στα 49.18Hz, συχνότητα υψηλότερη κατά 0.79Hz σε σχέση με την εναπομένουσα συχνότητα στο σενάριο Γ.

Όπως φαίνεται στο Πίνακα 6.4, η στρεφόμενη εφεδρεία αξιοποιείται σχεδόν εξ ολοκλήρου στο σενάριο Δ σε αντίθεση με το σενάριο Γ. Πράγματι, στο σενάριο Γ η μη χρησιμοποιηθείσα στρεφόμενη εφεδρεία ανέρχεται στα 10.96MW (31.6% της διαθέσιμης ISR). Απεναντίας, στο σενάριο Δ η αντίστοιχη τιμή είναι μόνο 2.12MW (6% της διαθέσιμης ISR). Το συμπέρασμα είναι ότι, η διασπορά της στρεφόμενης εφεδρείας σε πολλές μονάδες επιτυγχάνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά στην ανάκαμψη της συχνότητας. Η συγκεντρωμένη στρεφόμενη εφεδρεία που δεν μπορεί να αξιοποιηθεί από την πρωτεύουσα ρύθμιση δεν παίζει σημαντικό ρόλο στην ασφάλεια του συστήματος. Όμως, η εφεδρεία αυτή παίζει ουσιώδη ρόλο στην αξιοπιστία και στην ποιότητα της ηλεκτρικής ισχύος δεδομένου ότι συμβάλει στη μείωση του χρόνου διακοπών των πελατών μετά την πιθανή λειτουργία των Η/Ν υποσυχνότητας, προσφέροντας την δυνατότητα για άμεση αποκατάσταση των διακοπών αυτών.

Επί πλέον, εάν συγκριθούν τα ζεύγη των σεναρίων (A-B) και (Γ-Δ) παρατηρούμε ότι, το κέρδος συχνότητας είναι πολύ μεγαλύτερο στην πρώτη περίπτωση (1.40Hz έναντι 0.79Hz). Η διαθέσιμη ISR στο πρώτο ζεύγος είναι σχεδόν η μισή σε σχέση με το δεύτερο ζεύγος (7.9% έναντι 15.7%). Κατά συνέπεια, η κατανομή της στρεφόμενης εφεδρείας ISR γίνεται πιο αποτελεσματική όταν η διαθέσιμη ISR είναι περιορισμένη.

	Σενάρια		Συ (ζι	γκεντρ ISR ήτηση	οωμένη στ 7.9% κα 197 MW,	Α τρεφόμε ι limiters απώλεια	νη εφεδ s 7.5% α 23.5 Ν	όρεία MW)	Κα (ζŕ	ατανεμ ISR ητηση	ημένη στ . 7.9% κα 197 MW,	B ρεφόμεν ι limiters απώλεια	νη εφεδ s 7.5% α 23.5 Ν	ρεία MW)
Εναπομε	ένουσα συγ	ζνότητα			48.0)9 Hz					49.4	49 Hz		
Μονάδα	Ονομ/κη ικανότητα (MW)	Οριο Limiter (MW)	Αρχική φόρτιση (MW)	ISR (MW)	Ανάληψη επι πλέον φορτίου (MW)	Τελική φόρτιση (MW)	Αναξιο- ποίητη ISR	Αξιο- ποιηθείσα ISR (MW)	Αρχική φόρτιση (MW)	ISR (MW)	Ανάληψη επι πλέον φορτίου (MW)	Τελική φόρτιση (MW)	Αναξιο- ποίητη ISR	Αξιο- ποιηθείσα ISR (MW)
U1	23.5	25.3	23.5	0.0	1.76	25.3			22.5	1.0	1.10	23.6		1.00
U2	23.5	25.3	23.5	0.0	1.76	25.3			22.0	1.5	2.70	24.7		1.50
U3	23.5	25.3	23.5	0.0	trip	trip			23.5	0.0	trip	trip		0.00
U4	14.1	15.2	14.1	0.0	1.06	15.2			13.6	0.5	1.56	15.2		0.50
U5	14.1	15.2	14.1	0.0	1.06	15.2			13.6	0.5	1.46	15.1		0.50
U6	5.9	6.3	5.9	0.0	0.44	6.3			5.4	0.5	0.76	6.2		0.50
U7	11.5	12.4	11.5	0.0	0.86	12.4			10.0	1.5	1.70	11.7		1.50
U8	11.5	12.4	11.5	0.0	0.86	12.4			10.4	1.1	1.19	11.6		1.10
U9	11.5	12.4	11.5	0.0	0.86	12.4			10.0	1.5	1.70	11.7		1.50
U10	11.5	12.4	11.5	0.0	0.86	12.4			10.0	1.5	1.70	11.7		1.50
U11	42.0	45.2	40.4	1.6	4.75	45.2		1.60	37.0	5.0	7.23	44.2		5.00
U12	20.0	21.5	6.0	14.0	1.37	7.4	12.63	1.37	19.0	1.0	0.38	19.4	0.62	0.38
Αθροι σ μα	212.6	228.5	197.0	15.6 ή 7.9%	15.64	189.1	12.63	2.97	197.0	15.6 ή 7.9%	21.48	195.0	0.62	14.98

Πίνακας 6.3 Ανάλυση σεναρίων Α συγκεντρωμένης και Β κατανεμημένης (ρυθμιστικής) στρεφόμενης εφεδρείας

	Σενάρια		Συ (ζ	γκεντρ ISR ζήτηση	ωμένη σ1 29.2% κα 200 MW	Γ τρεφόμε α limiter ΄, απώλε	νη εφεδ s 7.5% ια 42 Μ	δρεία IW)	Ke (<u>ت</u>	ατανεμ ISR ζήτηση	ημένη στ 29.2% κα 200 MW	Δ ρεφόμεν α limiter ΄, απώλε	νη εφεδ 7.5% 1α 42 Ν	ρεία ΙW)
Εναπομέ	ένουσα συγ	α συχνότητα 48.39 Hz									49.18 Hz			
Μονάδα	Ονομ/κη ικανότητα (MW)	Οριο Limiter (MW)	Αρχική φόρτιση (MW)	ISR (MW)	Ανάληψη επι πλέον φορτίου (MW)	Τελική φόρτιση (MW)	Αναξιο- ποίητη ISR	Αξιο- ποιηθείσα ISR (MW)	Αρχική φόρτιση (MW)	ISR (MW)	Ανάληψη επι πλέον φορτίου (MW)	Τελική φόρτιση (MW)	Αναξιο- ποίητη ISR	Αξιο- ποιηθείσα ISR (MW)
U1	23.5	25.3	23.5	0	1.76	25.3			21	2.5	1.76	22.8	0.74	1.76
U2	23.5	25.3	23.5	0	1.76	25.3			19.5	4	4.29	23.8		4.00
U3	23.5	25.3	23.5	0	1.76	25.3			19.5	4	4.29	23.8		4.00
U4	14.1	15.2	14.1	0	1.06	15.2			11.6	2.5	2.58	14.2		2.50
U5	14.1	15.2	14.1	0	1.06	15.2			11.6	2.5	2.32	13.9	0.18	2.32
U6	5.9	6.3	5.9	0	0.44	6.3			4.5	1.4	1.21	5.7	0.19	1.21
U7	11.5	12.4	11.5	0	0.86	12.4			9.5	2	2.70	12.2		2.00
U8	11.5	12.4	11.5	0	0.86	12.4			9.5	2	1.89	11.4	0.11	1.89
U9	11.5	12.4	11.5	0	0.86	12.4			9.5	2	2.70	12.2		2.00
U10	11.5	12.4	11.5	0	0.86	12.4			9.5	2	2.70	12.2		2.00
U11	42	45.2	42	0	trip	trip			42	0	trip	trip		0.00
U12	20	21.5	15.4	4.6	1.17	16.6	3.43	1.17	18.5	1.5	0.60	19.1	0.9	0.60
U13	42	45.2	12	30	22.47	34.5	7.53	22.47	33.8	8.2	11.35	45.2		8.20
Αθροισμα	254.6	273.7	220.0	34.6 ή 15.7%	34.92	212.9	10.96	23.64	220.0	34.6 ή 15.7%	38.39	216.4	2.12	32.48

Πίνακας 6.4 Ανάλυση σεναρίων Γ συγκεντρωμένης και Δ κατανεμημένης (ρυθμιστικής) στρεφόμενης εφεδρείας

6.6 Κόστος Ρυθμιστικής Εφεδρείας

Στο σημείο αυτό είναι χρήσιμο να διερευνηθεί η οικονομική διάσταση της ρυθμιστικής εφεδρείας, δηλαδή πόσο αυξάνεται το κόστος λειτουργίας από την κατανομή της στρεφόμενης εφεδρείας σε όλες ή στις περισσότερες μονάδες του συστήματος [38]. Προς τον σκοπό αυτό εξετάζονται τα προαναφερθέντα σενάρια A, B, Γ, Δ από την οικονομική τους πλευρά. Ο Πίνακας 6.5 παρουσιάζει την ειδική κατανάλωση και το κόστος λειτουργίας των μονάδων του τυπικού συστήματος.

Μονάδα	Ειδική κατανάλωση		Κόστος καυσίμου		Ειδικό κόστος
	Mazut (Kg/kWh)	Diesel (lt/kWh)	Μαζουτ (€/kg)	Diesel (€/lt)	λειτουργίας (€/kWh)
No1	0.304		0.295		0.0897
No2	0.305		0.295		0.0900
No3	0.306		0.295		0.0903
No4	0.325		0.295		0.0959
No5	0.326		0.295		0.0962
No6	0.378		0.295		0.1115
No7	0.198		0.295		0.0584
No8	0.199		0.295		0.0587
No9	0.200		0.295		0.0590
No10	0.201		0.295		0.0593
No11		0.286		0.593	0.1696
No12		0.286		0.593	0.1696
No13		0.286		0.593	0.1696

Πίνακας 6.5 Ειδική κατανάλωση και ειδικό κόστος λειτουργίας μονάδων

Όπως φαίνεται στο Πίνακα 6.6, το ωριαίο κόστος λειτουργίας του σεναρίου Α είναι 20 285.54 ευρώ έναντι 21 207.63 ευρώ του σεναρίου Β. Επομένως, ανά ώρα λειτουργίας, η κατανομή ίσης SR σε όλες τις μονάδες (ρυθμιστική εφεδρεία) επιβαρύνει το κόστος κατά 922.09 ευρώ, δηλαδή ποσοστό αύξησης 4.5% περίπου. Η αύξηση αυτή αναγόμενη σε ετήσια βάση αντιστοιχεί σε 8 077 508 ευρώ.

Αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο Πίνακα 6.7, το ωριαίο κόστος λειτουργίας του σεναρίου Γ είναι 24 186.30 ευρώ έναντι 26 357.06 ευρώ του σεναρίου Δ. Άρα, η αύξηση του κόστους λειτουργίας λόγω της κατανομής της εφεδρείας ανέρχεται σε 2 170.76 ευρώ, δηλαδή σε 9 % περίπου. Η αύξηση αυτή αναγόμενη σε ετήσια βάση αντιστοιχεί σε 19 015 857 ευρώ.

Παρατηρούμε ότι στο ζεύγος σεναρίων Γ-Δ, όπου η στρεφόμενη εφεδρεία ISR είναι περίπου διπλάσια των σεναρίων Α-Β, η κατανομή της ISR σε όλες τις μονάδες επιφέρει υπερδιπλασιασμό της οικονομικής επιβάρυνσης, παρά το γεγονός ότι το κέρδος βελτίωσης της συχνότητας είναι το μισό σε σχέση με το ζεύγος σεναρίων Α-Β.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί η ιδιαιτερότητα του εξεταζόμενου συστήματος (Κρήτης), όπου οι μονάδες αιχμής παρουσιάζουν κόστος λειτουργίας διπλάσιο εκείνου των μονάδων βάσεως. Το γεγονός αυτό αυξάνει ακόμη περισσότερο το κόστος κατανομής της ISR σε σύγκριση με κάποιο άλλο σύστημα όπου οι διαφορές κόστους λειτουργίας μεταξύ των μονάδων δεν είναι τόσο σημαντικές.

Επομένως, η κατανομή της στρεφόμενης εφεδρείας ISR, η οποία συνεπάγεται ότι οικονομικές μονάδες βάσεως λειτουργούν κάτω από το ονομαστικό τους φορτίο με αποτέλεσμα, μονάδες αιχμής με μεγαλύτερο λειτουργικό κόστος να λειτουργούν σε υψηλότερες φορτίσεις, έχει ως αποτέλεσμα αυξημένο κόστος λειτουργίας του συστήματος. Κατά συνέπεια, το όφελος της καλύτερης ανάκαμψης της συχνότητας και της αυξημένης ασφάλειας από την κατανομή της ISR πληρώνεται με υψηλότερο λειτουργικό κόστος. Επίσης, η κατανομή της ISR σε όλες τις μονάδες είναι πιο αποτελεσματική όταν η διαθέσιμη ISR είναι χαμηλή.

Μια συμβιβαστική λύση στο πρόβλημα κόστους – ασφάλειας, είναι η κατανομή της στρεφόμενης εφεδρείας όχι σε όλες αλλά σε αρκετές μονάδες του συστήματος και κατά προτίμηση σε εκείνες που διαθέτουν χαμηλό στατισμό, οι οποίες θα την αξιοποιήσουν καλύτερα σε γεγονότα βύθισης συχνότητας. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ικανοποιητική ασφάλεια χωρίς να αυξάνεται υπερβολικά το κόστος λειτουργίας.

Μονάδα	Ειδικό κόστος λειτουργίας (€/kWh)	Σενάριο Α		Σενάριο Β	
		Φόρτιση Μονάδων (MW)	Ωριαίο κόστος λειτουργίας (€/h)	Φόρτιση Μονάδων (MW)	Ωριαίο κόστος λειτουργίας (€/h)
No1	0.0897	23.5	2107.48	22.5	2017.80
No2	0.0900	23.5	2114.41	22.0	1979.45
No3	0.0903	23.5	2121.35	23.5	2121.35
No4	0.0959	14.1	1351.84	13.6	1303.90
No5	0.0962	14.1	1356.00	13.6	1307.91
No6	0.1115	5.9	657.91	5.4	602.15
No7	0.0584	11.5	671.72	10.0	584.10
No8	0.0587	11.5	675.11	10.4	610.53
No9	0.0590	11.5	678.50	10.0	590.00
No10	0.0593	11.5	681.89	10.0	592.95
No11	0.1696	40.4	6851.76	37.0	6275.13
No12	0.1696	6.0	1017.59	19.0	3222.36
Αθροισμα	0.1696	197.0	20285.54	197.0	21207.63

Πίνακας 6.6 Οικονομική σύγκριση σεναρίων Α και Β

Μονάδα	Ειδικό κόστος λειτουργίας (€/kWh)	Σενα	άριο Γ	Σενάριο Δ	
		Φόρτιση Μονάδων (MW)	Ωριαίο κόστος λειτουργίας (€/h)	Φόρτιση Μονάδων (MW)	Ωριαίο κόστος λειτουργίας (€/h)
No1	0.0897	23.5	2107.48	21.0	1883.28
No2	0.0900	23.5	2114.41	19.5	1754.51
No3	0.0903	23.5	2121.35	19.5	1760.27
No4	0.0959	14.1	1351.84	11.6	1112.15
No5	0.0962	14.1	1356.00	11.6	1115.57
No6	0.1115	5.9	657.91	4.5	501.80
No7	0.0584	11.5	671.72	9.5	554.90
No8	0.0587	11.5	675.11	9.5	557.70
No9	0.0590	11.5	678.50	9.5	560.50
No10	0.0593	11.5	681.89	9.5	563.30
No11	0.1696	42.0	7123.12	42.0	7123.12
No12	0.1696	15.4	2611.81	18.5	3137.56
No13	0.1696	12.0	2035.18	33.8	5732.41
Αθροισμα	1.3177	220.0	24186.30	220.0	26357.06

Πίνακας 6.7 Οικονομική σύγκριση σεναρίων Γ και Δ

6.7 Κύριοι Μηχανισμοί που Επηρεάζουν την Ασφάλεια του Συστήματος σε Ευρύτερο Χρονικό Ορίζοντα

Το πρόβλημα της ασφάλειας του συστήματος εξετάστηκε μέχρι στιγμής κατά την διάρκεια των πρώτων δευτερολέπτων μετά την διαταραχή, τα οποία βεβαίως είναι τα πιο κρίσιμα. Κριτήριο ασφάλειας κατά τις διαταραχές του ισοζυγίου ισχύος είναι, ασφαλώς, η τιμή της συχνότητας. Όσο περισσότερο αυτή αποκλίνει σε σχέση με την ονομαστική της τιμή τόσο περισσότερο το σύστημα εισέρχεται σε περιπέτειες.

Όμως, είναι πιθανόν το σύστημα να επιβιώσει κατά το αρχικό στάδιο αλλά να καταρρεύσει λίγο αργότερα. Κατά συνέπεια, το ζήτημα της ασφάλειας δεν εξαντλείται στα πρώτα κρίσιμα δευτερόλεπτα. Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.21, ο χρόνος ο οποίος ακολουθεί ένα συμβάν απώλειας παραγωγής, μπορεί να διαιρεθεί σε δύο περιόδους, όπου επενεργούν διαφορετικοί μηχανισμοί. Η πρώτη περίοδος διαρκεί 10-20s μετά την διαταραχή και μπορεί να χαρακτηριστεί ως βραχυπρόθεσμη ασφάλεια ενώ η δεύτερη περίοδος η οποία έπεται, διαρκεί 5-10 λεπτά περίπου και μπορεί να ονομαστεί μακροπρόθεσμη ασφάλεια.
Βραχυπρόθεσμη ασφάλεια

Η δυναμική απόκριση της συχνότητας και επομένως, η ασφάλεια του συστήματος κατά την περίοδο αυτή καθορίζεται από τις παραμέτρους του μοντέλου που περιγράφεται από τις εξισώσεις 6.2.1 – 6.2.3n+2 και αφορούν στην πρωτεύουσα ρύθμιση των μονάδων παραγωγής. Ένας άλλος μηχανισμός ο οποίος είναι καθοριστικός για την ασφάλεια του συστήματος κατά την περίοδο αυτή είναι η προστασία αποκοπής φορτίου. Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 4.4, η προστασία αυτή έχει δύο τρόπους λειτουργίας: τον ρυθμό μεταβολής της συχνότητας (df/dt) και το επίπεδο υποσυχνότητας. Όταν ενεργοποιείται ο ρυθμός μεταβολής, τότε η προστασία λειτουργεί σε ελάχιστο χρόνο, ολίγων ms, μετά την διαταραχή. Όταν ένεργοποιείται το επίπεδο υποσυχνότητας, τότε η προστασία λειτουργεί συνήθως ένα έως δύο δευτερόλεπτα μετά την διαταραχή.

Οι παραπάνω δύο μηχανισμοί μαζί με την συνεισφορά του φορτίου λόγω της απόσβεσης D (κεφάλαιο 3.6) μπορούν να στηρίξουν και να σώσουν το σύστημα κατά το κρίσιμο αυτό διάστημα. Ο σκοπός είναι να σταθεροποιηθεί η συχνότητα σε κάποια ασφαλή επίπεδα ώστε να μην ενεργοποιηθεί η προστασία υποσυχνότητας των μονάδων παραγωγής.

Όπως αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, η συγκεντρωμένη στρεφόμενη εφεδρεία δεν μπορεί πάντοτε να αξιοποιηθεί καθ ολοκληρία κατά την περίοδο αυτή. Εάν είναι κατανεμημένη σε πολλές μονάδες ο ρόλος της αποδεικνύεται περισσότερο αποτελεσματικός. Η πιο σημαντική παράμετρος κατά την περίοδο αυτή είναι ο στατισμός των μονάδων και ιδιαίτερα οι χαμηλές τιμές στατισμού που εξασφαλίζουν μονάδες ευαίσθητες στις διαταραχές.

Μακροπρόθεσμη ασφάλεια

Εάν το σύστημα επιβιώσει κατά την πρώτη περίοδο με την βοήθεια των παραπάνω μηχανισμών, η συχνότητα σταθεροποιείται σε κάποιο επίπεδο χαμηλότερο από το ονομαστικό αλλά εξακολουθεί να βρίσκεται σε κίνδυνο. Η πλειοψηφία των μονάδων είναι ήδη υπερφορτισμένες ως αποτέλεσμα της πρωτεύουσας ρύθμισης ενώ η ψύξη εξ αιτίας της χαμηλής συχνότητας είναι μειωμένη. Οι χαμηλές τάσεις που είναι πιθανόν να επικράτησαν στο σύστημα έχουν οδηγήσει σε υπερδιέγερση τις μονάδες. Οι συνθήκες αυτές μπορεί να προξενήσουν υπερθέρμανση του στάτη ή του ρότορα και κατά συνέπεια να οδηγήσουν σε απώλεια (trip) μονάδας από ενεργοποίηση κάποιας προστασίας της. Επί πλέον, η απώλεια κάποιων βοηθητικών κινητήρων είναι πιθανό να οδηγήσει, επίσης, σε απώλεια μονάδας. Εάν αυτό συμβεί, η κατάσταση θα χειροτερεύσει και υπάρχει κίνδυνος για διαδοχική απώλεια μονάδων παραγωγής έως την τελική, γενική διακοπή του συστήματος.

Επομένως, είναι ανάγκη να επανέλθει η συχνότητα στα ονομαστικά επίπεδα, το συντομότερο δυνατόν. Προς τον σκοπό αυτό υπάρχουν κάποιοι μηχανισμοί κατά την διάρκεια της δεύτερης περιόδου, οι οποίοι παρουσιάζονται στο σχήμα 6.21. Οι περισσότεροι από τους μηχανισμούς αυτούς είναι χειροκίνητοι και η επιτυχία τους εξαρτάται από την ετοιμότητα και την σωστή αντίδραση του ανθρώπινου παράγοντα. Στην προσπάθεια αυτή συμμετέχει το προσωπικό του ΚΕΕ, οι Χειριστές των

μονάδων παραγωγής και οι Χειριστές-Επιτηρητές των Υποσταθμών. Οι υπόψη μηχανισμοί είναι:

- Το ΚΕΕ μπορεί να προχωρήσει σε χειροκίνητη αποκοπή φορτίου είτε μέσω τηλεχειρισμών είτε δίδοντας εντολές στους Χειριστές-Επιτηρητές των Υποσταθμών.
- Οι Χειριστές των μονάδων βλέποντας την συχνότητα να είναι σε χαμηλά επίπεδα μπορούν να αντιδράσουν αναλαμβάνοντας τον έλεγχο των μονάδων και φορτώνοντας τις με στόχο την ανάκαμψη της συχνότητας. Η δράση αυτή αφορά περισσότερο στις μονάδες με διαθέσιμη στρεφόμενη εφεδρεία ISR και επομένως, η ISR είναι χρήσιμη κατά στάδιο αυτό.
- Οι μονάδες οι οποίες έχουν οδηγηθεί σε υπερφόρτιση στα πλαίσια της πρωτεύουσας ρύθμισης μπορούν να διατηρήσουν το φορτίο πάνω από το ονομαστικό για περιορισμένο χρόνο και στην συνέχεια προχωρούν αυτόματα σε απόρριψη μέρους του φορτίου. Η δράση αυτή λειτουργεί ενάντια στην προσπάθεια για ανάκαμψη της συχνότητας και πρέπει να αντισταθμισθεί από τους υπόλοιπους μηχανισμούς.
- Η δευτερεύουσα ρύθμιση η οποία αφορά σε κάποια ή κάποιες μονάδες με διαθέσιμη ISR δεν είναι αποφασιστικός μηχανισμός, πρώτον διότι είναι ένας αργός μηχανισμός και δεύτερον επειδή ο έλεγχος των μονάδων έχει περάσει, ήδη, τοπικά στους Χειριστές.
- Η εκκίνηση κάποιας νέας γρήγορης αεριοστροβιλικής μονάδας θα προσφέρει την απαραίτητη παραγωγή για την αποκατάσταση των διακοπών πελατών που έχουν λάβει χώρα.

Η διαθέσιμη ISR μπορεί να βοηθήσει το σύστημα, εάν η εφεδρεία αυτή αξιοποιηθεί από την ταχεία αντίδραση των Χειριστών των μονάδων αλλά και την ικανότητα των ίδιων των μονάδων να αναλάβουν γρήγορα φορτίο. Όμως είναι πιθανόν, το KEE να αντιδράσει γρηγορότερα και να προχωρήσει σε αποκοπή φορτίου επαναφέροντας την συχνότητα σε κάποια ασφαλή επίπεδα. Η ύπαρξη ISR στο σύστημα θα δώσει την δυνατότητα στους υπεύθυνους του KEE να αποκαταστήσουν γρήγορα το φορτίο που έχει, ήδη, αποκοπεί. Διαφορετικά, οι διακοπές των πελατών θα διαρκέσουν περισσότερο χρόνο μέχρι να τεθεί σε λειτουργία κάποια νέα μονάδα παραγωγής. Επομένως, είναι φανερό ότι, κατά την χρονική περίοδο αυτή, η στρεφόμενη εφεδρεία βοηθά, εν μέρει, στην ασφάλεια του συστήματος αλλά συνεισφέρει περισσότερο στην μείωση του χρόνου διακοπών, συμβάλλοντας στην αύξηση της αξιοπιστίας του συστήματος.

Πέραν των παραπάνω, υπάρχει μια άλλη πλευρά του θέματος η οποία πρέπει να εξεταστεί. Εάν οι προηγούμενοι μηχανισμοί αποτύχουν να δώσουν το επιθυμητό αποτέλεσμα κατά την χρονική περίοδο αυτή και κάποια επί πλέον μονάδα οδηγηθεί σε trip, τότε, η κατάσταση γίνεται πλέον κρίσιμη. Οι περισσότερες μονάδες βρίσκονται ήδη στα όρια φόρτισής τους, εξ αιτίας της αρχικής απώλειας παραγωγής και δεν έχουν περιθώρια για ανάληψη επί πλέον φορτίου. Οι μόνες μονάδες που έχουν περιθώρια είναι εκείνες που διαθέτουν στρεφόμενη εφεδρεία. Φυσικά, μια καλά σχεδιασμένη προστασία αποκοπής φορτίου, η οποία είναι πολύ γρήγορη είναι ο μηχανισμός που και στην περίπτωση αυτή θα προσφέρει σανίδα σωτηρίας στο σύστημα.

Στα μεγάλα ηλεκτρικά συστήματα η απώλεια μιας μόνο μονάδας παραγωγής αντιπροσωπεύει, συνήθως, μικρό ποσοστό της συνολικής παραγωγής και κατά συνέπεια, προκαλεί μικρές βυθίσεις συχνότητας που δεν θέτουν σε κίνδυνο το σύστημα. Στην περίπτωση αυτή οι μονάδες με διαθέσιμη στρεφόμενη εφεδρεία ISR θα αναλάβουν φορτίο από τις υπόλοιπες μονάδες βάσης οι οποίες υπερφορτώθηκαν προσωρινά αμέσως μετά την διαταραχή εξ αιτίας της πρωτογενούς τους ρύθμισης. Επομένως, η παρουσία στρεφόμενης εφεδρείας απομακρύνει το ενδεχόμενο διακοπών πελατών οι οποίες διαφορετικά θα ήταν αναπόφευκτες. Το αποτέλεσμα είναι και πάλι αύξηση της αξιοπιστίας του συστήματος.

Το σχήμα 6.21 παρουσιάζει εποπτικά τους βασικούς μηχανισμούς τόσο κατά την πρώτη όσο και κατά την δεύτερη περίοδο. Η συμβολή των διαφόρων μηχανισμών στην ασφάλεια του συστήματος εξαρτάται από την ικανότητά τους να κινητοποιηθούν εγκαίρως και την αποτελεσματικότητα τους.



Σχήμα 6.21 Βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη ασφάλεια

Πραγματικό γεγονός απώλειας μακροπρόθεσμης ασφάλειας

Στο σχήμα 6.22 παρουσιάζεται ένα πραγματικό γεγονός απώλειας της μακροπρόθεσμης ασφάλειας του συστήματος Κρήτης. Το γεγονός αυτό συνέβη στις 25 Οκτωβρίου 2001 όταν το σύστημα οδηγήθηκε σε γενική διακοπή.

Στις 8:07:45 της ημέρας αυτής συνέβη απώλεια της αεριοστροβιλικής μονάδας του συνδυασμένου κύκλου του ΑΗΣ Χανίων προκαλώντας βύθιση της συχνότητας. Ο ρυθμός df/dt της προστασίας αποκοπής φορτίου ενεργοποιήθηκε και μικρό ποσοστό του φορτίου αποκόπηκε αμέσως. Το αποτέλεσμα ήταν η συχνότητα να πέσει αρχικά στα 49Hz και γρήγορα να επανέλθει στο επίπεδο των 49.20Hz παρουσιάζοντας μια μικρή αυξητική τάση.

Στις 8:08:14, δηλαδή 29 δευτερόλεπτα αργότερα, η ατμομονάδα του συνδυασμένου κύκλου έσβησε και η συχνότητα έπεσε πάλι στα 48.47Hz ενεργοποιώντας όλες τις βαθμίδες της προστασίας αποκοπής φορτίου. Η αποκοπή σημαντικού ποσοστού του φορτίου είχε ως αποτέλεσμα η συχνότητα να ανακάμψει ξανά και να ανέλθει στα 49.44Hz. Αν και η συχνότητα δεν ήταν πλέον τόσο χαμηλή ώστε να προμηνύει σοβαρό κίνδυνο, οι τάσεις που επεκράτησαν στο σύστημα Μεταφοράς ήταν εξαιρετικά υψηλές, προκαλώντας απώλεια όλων των Αιολικών Πάρκων.

Μεγάλο μέρος της άεργου ισχύος στο σύστημα Κρήτης προέρχεται από τις εγκάρσιες συστοιχίες πυκνωτών οι οποίες είναι εγκατεστημένες στους ζυγούς μέσης τάσης των Υποσταθμών. Η λειτουργία της προστασίας αποκοπής φορτίου που οδήγησε σε αποκοπή μεγάλου μέρους του φορτίου, χωρίς την παράλληλη απομόνωση των εγκάρσιων πυκνωτών, είχε ως αποτέλεσμα την περίσσεια αέργου ισχύος και την επικράτηση εξαιρετικά υψηλών τάσεων στο σύστημα Μεταφοράς. Οι ανεμογεννήτριες είναι μονάδες με περιορισμένη αντοχή στις διακυμάνσεις τάσεως (θετικές ή αρνητικές) και κάτω από τις συνθήκες αυτές τέθηκαν αυτόματα εκτός λειτουργίας.

Μετά τη νέα απώλεια της αιολικής παραγωγής, η συχνότητα έπεσε ξανά στα 48Hz με αποτέλεσμα και άλλη μονάδα παραγωγής να οδηγηθεί σε trip από λειτουργία της προστασία υποσυχνότητας της μονάδας, οδηγώντας το σύστημα στο τελικό black out.

Η διαθέσιμη ISR πριν από την αρχική διαταραχή ήταν 26MW, δηλαδή 11.2% της ζήτησης, η οποία την στιγμή εκείνη ανήρχετο σε 233MW. Η στρεφόμενη εφεδρεία αυτή ήταν συγκεντρωμένη σε μια αεριοστροβιλική μονάδα. Αξίζει να σημειωθεί ότι, μόνο 8MW, δηλαδή μόνο το 30.7% της διαθέσιμης ISR τελικά αξιοποιήθηκε, αν και υπήρχε αρκετός χρόνος 48s από την αρχική διαταραχή μέχρι το τελικό black out.

Το ποσό της στρεφόμενης εφεδρεία ISR που χρησιμοποιήθηκε ήταν ακριβώς όσο προσδιορίζεται από την πρωτεύουσα ρύθμιση και τον στατισμό της μονάδας που την διέθετε. Η ύπαρξη περισσότερης ISR δεν αξιοποιήθηκε και άρα, δεν φάνηκε χρήσιμη ώστε το σύστημα να αποφύγει την τελική γενική διακοπή.



Σχήμα 6.22 Γενική διακοπή συστήματος Κρήτης στις 25.10.2001

6.8 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται κατ' αρχάς διάκριση ανάμεσα στην ελάχιστη απαιτούμενη και στην στιγμιαία στρεφόμενη εφεδρεία. Παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή της στιγμιαίας στρεφόμενης εφεδρείας ενός συστήματος, όπου φαίνεται ότι αποτελεί πριονωτή συνάρτηση του χρόνου. Αποδεικνύεται ότι, ανάλογα με το μέγεθος των μονάδων παραγωγής, η στιγμιαία στρεφόμενη εφεδρεία μπορεί, κάποιες χρονικές περιόδους, να είναι πολλαπλάσια της ελάχιστης απαιτούμενης, χωρίς να υπάρχει δυνατότητα μείωσής της διότι τότε οδηγείται κάτω από τα ελάχιστα επιτρεπόμενα επίπεδα. Το πρόβλημα αυτό είναι έντονο στα μικρά απομονωμένα συστήματα και οδηγεί σε αντιοικονομική λειτουργία τους με επιλογή ομοειδών μονάδων χαμηλού κόστους λειτουργίας και σχετικά μικρού μεγέθους.

Σε αντιδιαστολή με το μοντέλο της ισοδύναμης μονάδας του συστήματος, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μοντέλο δυναμικής απόκρισης συχνότητας στο οποίο όλες οι μονάδες μετέχουν με το δικό τους χωριστό μοντέλο. Η αναλυτική αυτή προσομοίωση, πέραν από την μεγαλύτερη ακρίβεια, παρέχει την δυνατότητα υπολογισμού της απόκρισης κάθε μονάδας χωριστά και της συνεισφοράς της στην

διάρκεια μιας διαταραχής. Επί πλέον, δίδεται η δυνατότητα ρύθμισης των περιοριστών ισχύος σε διαφορετικά όρια για κάθε μονάδα κάτι που είναι, ασφαλώς, αδύνατο με το μοντέλο της ισοδύναμης μονάδας.

Αναπτύσσεται αλγόριθμος με βάση τον οποίο μπορούν να υπολογιστούν σχέσεις ανάμεσα σε οποιεσδήποτε δύο από τις πολυάριθμες τεχνικές παραμέτρους του συστήματος (στατισμοί, σταθερές αδράνειες, συντελεστής απόσβεσης φορτίου κλπ) καθώς και τις λειτουργικές παραμέτρους του (ελάχιστη στρεφόμενη εφεδρεία, όρια περιοριστών ισχύος κλπ). Τέλος, ο αλγόριθμος υπολογίζει σχέσεις όλων αυτών των παραμέτρων με ένα κριτήριο ασφάλειας το οποίο ορίζεται με βάση την ελάχιστη επιτρεπόμενη κατώτατη ή εναπομένουσα συχνότητα του συστήματος.

Με εφαρμογή του αλγόριθμου αυτού στο τυπικό σύστημα αποκαλύπτεται ότι, η ρύθμιση των περιοριστών ισχύος επηρεάζει σημαντικά τις δυνατότητες αντίδρασης των μονάδων σε βυθίσεις συχνότητας και έχει σοβαρές συνέπειες στην ασφάλεια του συστήματος, όπως αυτή περιγράφεται από το παραπάνω κριτήριο.

Αναφέρεται, συχνά, στην βιβλιογραφία ότι η πρόβλεψη για τήρηση ικανής στρεφόμενης εφεδρείας εγγυάται την ασφαλή λειτουργία του συστήματος, θεωρώντας ότι ολόκληρη η εφεδρεία θα αξιοποιηθεί σε γεγονότα απώλειας παραγωγής. Όπως, αποδεικνύεται από την πράξη και καταγράφηκε στο περιστατικό της 25^{ης} 10 2001 του συστήματος Κρήτης, τα πράγματα είναι λίγο διαφορετικά. Κατά το περιστατικό αυτό, υπήρχε στο σύστημα Κρήτης αρκετή στρεφόμενη εφεδρεία, ίση με το 11.2% της ζήτησης, η οποία όμως ήταν συγκεντρωμένη σε μια μόνο μονάδα παραγωγής την μονάδα αιχμής, όπως επέβαλε η οικονομική κατανομή φορτίου. Το αποτέλεσμα ήταν, μετά από διαδοχική απώλεια τριών μονάδων παραγωγής και όλων των αιολικών πάρκων, το σύστημα να οδηγηθεί τελικά σε γενική διακοπή. Όπως αποδείχθηκε, μόνο το 30% της υπάρχουσας στρεφόμενης εφεδρείας αξιοποιήθηκε, παρά την αρχική διαταραχή έως την τελική κατάρρευση.

Άρα, η ύπαρξη σημαντικής στρεφόμενης εφεδρείας δεν είναι από μόνη της ικανή να διασώσει το σύστημα εάν δεν είναι κατάλληλα κατανεμημένη στις μονάδες παραγωγής ώστε να είναι άμεσα απολήψιμη σε γεγονότα βύθισης συχνότητας. Η μορφή εκείνη της στρεφόμενης εφεδρείας η οποία συμβάλλει πιο αποτελεσματικά για την διάσωση του συστήματος είναι η εφεδρεία πρωτεύουσας ρύθμισης. Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται ορισμένα σενάρια από την εφαρμογή της μεθόδου στο τυπικό σύστημα και αποδεικνύεται ο σημαντικός ρόλος που παίζει η κατανεμημένη εφεδρεία. Βέβαια, το κόστος λειτουργίας αυξάνεται όταν η εφεδρεία κατανέμεται σε περισσότερες μονάδες αντί να είναι συγκεντρωμένη στην πιο αντιοικονομική από τις λειτουργούσες μονάδες.

Τέλος, γίνεται ταξινόμηση της ασφάλειας η οποία σχετίζεται με την ευστάθεια συχνότητας, σε βραχυπρόθεσμη ασφάλεια η οποία διαρκεί 10-20s και μακροπρόθεσμη η οποία ακολουθεί χρονικά και διαρκεί 5-10 min Είναι δυνατόν, ένα σύστημα να επιβιώσει κατά την πρώτη περίοδο, όμως τα γεγονότα που θα ακολουθήσουν να το οδηγήσουν σε κατάρρευση στην διάρκεια της δεύτερης περιόδου, όπως έγινε στο σύστημα Κρήτης, την 21^η 10 2001. Οι κύριοι μηχανισμοί που δρουν την πρώτη περίοδο είναι η πρωτογενής ρύθμιση των μονάδων, η προστασία αποκοπής φορτίου αλλά και η απόσβεση του φορτίου. Στην διάρκεια της

δεύτερης περιόδου, πλην του αυτόματου μηχανισμού της δευτερεύουσας ρύθμισης, παρεμβαίνει και ο ανθρώπινος παράγοντας από την σωστή και ταχεία αντίδραση του οποίου εξαρτώνται πολλά. Σημαντικό ρόλο στην φάση αυτή παίζουν η ορθή χειροκίνητη αποκοπή φορτίου, η άμεση αντίδραση των Χειριστών των μονάδων παραγωγής αλλά και η έγκαιρη εκκίνηση μιας γρήγορης μονάδας παραγωγής.



ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΗΣ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΗΣ ΕΦΕΔΡΕΙΑΣ ΤΩΝ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗΜΟΠΟΙΗΣΗ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΡΥΘΜΙΣΤΗ ΣΤΡΟΦΩΝ

Κριτήριον τον λόγον, τας τε αισθήσεις μη ακριβείς (Κριτήριο είναι η λογική ενώ οι αισθήσεις δεν είναι ακριβείς) Παρμενίδης

7.1 Εισαγωγή

Η ασφάλεια ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας προσδιορίζει την ικανότητά του να αντεπεξέρχεται στις διαταραχές χωρίς την ανάγκη διακοπής πελατών. Οι εν λόγω διαταραχές διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις διαταραχές ισχύος και τις διαταραχές τάσεως [68]. Οι διαταραχές ισχύος συμβαίνουν στο σύστημα μετά από ξαφνική απώλεια παραγωγής ή ζήτησης φορτίου. Οι διαταραχές τάσεως συμβαίνουν ως αποτέλεσμα των βραχυκυκλωμάτων που λαμβάνουν χώρα στο δίκτυο.

Παραδοσιακά, η ασφάλεια ενός ηλεκτρικού συστήματος [69-86] αναλύεται εξετάζοντας τις πλέον σοβαρές διαταραχές οι οποίες, όμως, δεν έχουν μηδαμινές πιθανότητες να συμβούν. Κάθε σύστημα έχει τις δικές του αδυναμίες και χαρακτηριστικά και κατά συνέπεια, διαφορετικές διαταραχές πρέπει να εξεταστούν και να αναλυθούν σε κάθε περίπτωση. Η ασφάλεια του συστήματος δεν είναι μόνο ζήτημα επάρκειας και εφεδρειών δεδομένου ότι πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η δυναμική απόκριση και η ικανότητα του συστήματος να διατηρεί την ευστάθειά του μετά από κάθε διαταραχή.

Ειδικά στα αυτόνομα συστήματα, η ασφάλεια γωνίας ρότορα και η ασφάλεια τάσεως, συνήθως, δεν αποτελούν πρόβλημα εξ αιτίας των μικρών ηλεκτρικών αποστάσεων οι οποίες υπάρχουν μεταξύ των μονάδων παραγωγής καθώς και μεταξύ των ζυγών φορτίου με τις μονάδες παραγωγής. Απεναντίας, η ασφάλεια συχνότητας αποτελεί τον μεγαλύτερο κίνδυνο για τα απομονωμένα και συνήθως, μικρά συστήματα λόγω του περιορισμένου αριθμού μονάδων παραγωγής και της έλλειψης στήριξης από γειτονικά συστήματα [5]. Η διαταραχή η οποία, συνήθως, διερευνάται για την ασφάλεια των συστημάτων αυτών είναι η απώλεια της μονάδος παραγωγής με την μεγαλύτερη φόρτιση ULG (Largest Generation Output). Στις περιπτώσεις αυτές, η διατήρηση ορισμένου ποσού στρεφόμενης εφεδρείας είναι σημαντική για την ασφάλεια του συστήματος [62-66]. Επομένως, διατηρώντας ένα επίπεδο στρεφόμενης εφεδρείας, συνήθως θεωρείται αρκετό προκειμένου να κρατηθεί η συχνότητα μέσα σε ορισμένα όρια.

Το ζήτημα της ένταξης των μονάδων παραγωγής και κατά συνέπεια της τηρούμενης στρεφόμενης εφεδρείας και οι επιπτώσεις της επί της ασφάλειας του συστήματος έχει διερευνηθεί σε μεγάλο βαθμό και υπάρχουν αρκετές σχετικές δημοσιεύσεις. Όμως, στις εργασίες αυτές συνήθως δεν γίνεται διάκριση ανάμεσα στην στρεφόμενη εφεδρεία πρωτεύουσας ρύθμισης και εκείνη της δευτερεύουσας και τριτεύουσας ρύθμισης [87-88]. Άλλα άρθρα διερευνούν το πρόβλημα ανακατανομής της στρεφόμενης εφεδρείας με στόχο την αύξηση της ασφάλειας, όμως δεν λαμβάνεται υπόψη η ικανότητα των μονάδων παραγωγής και υπερφορτίζονται για περιορισμένο χρόνο μετά από απώλεια παραγωγής καθώς και τα ειδικά χαρακτηριστικά των σύγχρονων ρυθμιστών φορτίου-συχνότητας [89-91].

Στα άρθρα [92-93] αναφέρεται ότι μόνο το 40% της εφεδρείας πρωτεύουσας ρύθμισης η οποία υπολογίζεται με βάση τους στατισμούς των ρυθμιστών στροβίλων, στην πραγματικότητα υπάρχει, αν και αυτό προκύπτει από καταγραφές περιορισμένου αριθμού διαταραχών συγκεκριμένου συστήματος. Αυτή η διαφορά μεταξύ της υπολογιζόμενης και καταγραφόμενης εφεδρείας πρωτεύουσας ρύθμισης συμβαίνει επειδή ορισμένες μονάδες λειτουργούν με τους ρυθμιστές υπό σταθερό φορτίο ενώ άλλες περιορίζονται από τους περιοριστές ισχύος των ρυθμιστών τους.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ένα βελτιωμένο μοντέλο ρυθμιστή στροφών το οποίο αξιοποιεί την δυνατότητα υπερφόρτισης των γεννητριών για μικρό χρονικό διάστημα. Εισάγεται ένας νέος τύπος στρεφόμενης εφεδρείας η οποία ονομάζεται εφεδρεία υπερφόρτισης (overloading reserve). Επίσης, περιγράφεται ένα σύνθετο κριτήριο ασφάλειας, το οποίο περιλαμβάνει την ανώτατη (overshoot) την κατώτατη (undershoot) και την εναπομένουσα (residual) συχνότητα, μετά από κάθε διαταραχή. Χρησιμοποιείται το αναλυτικό μοντέλο απόκρισης του συστήματος (κεφάλαιο 5.3) το οποίο περιλαμβάνει όλες τις μονάδες παραγωγής λαμβάνοντας υπόψη το βελτιωμένο μοντέλο των περιοριστών ισχύος. Αναπτύσσεται μία νέα μέθοδος για τον προσδιορισμό της βέλτιστης κατανομής της στρεφόμενης εφεδρείας ούτως ώστε το σύνθετο κριτήριο ασφάλειας να ικανοποιείται κατά τον πλέον οικονομικό τρόπο. Επίσης, η μέθοδος προσδιορίζει την αναγκαία περικοπή φορτίου όταν η βέλτιστη κατανομή της στρεφόμενης εφεδρείας δεν μπορεί να εξασφαλίσει την ικανοποίηση του κριτηρίου ασφάλειας. Επί πλέον, παρουσιάζεται στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων η οποία αποκαλύπτει τον βαθμό συσγέτισης της στρεφόμενης εφεδρείας με την ασφάλεια του συστήματος. Τελικά, η μέθοδος εφαρμόζεται στο

αυτόνομο ηλεκτρικό σύστημα Κρήτης και τα εξαγόμενα αποτελέσματα παρουσιάζονται και σχολιάζονται.

7.2 Σύνθετο Κριτήριο Ασφάλειας Συστήματος

Η πρόνοια για διατήρηση στρεφόμενης εφεδρείας SR μεγαλύτερης ή ίσης από την παραγωγή της μονάδας με την μεγαλύτερη φόρτιση ULG δεν παρέχει καμία ένδειξη για το μέγεθος της βύθισης συχνότητας μετά από διαταραχή και τον κίνδυνο στον οποίο υπεισέρχεται το σύστημα. Το σχήμα 7.1 παρουσιάζει την μεταβατική απόκριση συχνότητας μετά από απώλεια της ULG ενός αυτόνομου συστήματος, όπου funder είναι η κατώτατη συχνότητα, f_{over} είναι η ανώτατη συχνότητα και $f_{residual}$ είναι η εναπομένουσα συχνότητα κατά το μεταβατικό φαινόμενο. Αν και η funder είναι η χαμηλότερη τιμή της συχνότητας, εν τούτοις, δεν είναι η πιο κρίσιμη δεδομένου ότι διαρκεί ελάγιστο χρόνο κατά τον οποίο δεν είναι πιθανόν να ενεργοποιηθούν οι (υπερθέρμανση στάτη, προστασίες των μονάδων υπερθέρμανση ρότορα, υποσυχνότητα μονάδας με χρονική καθυστέρηση κλπ). Όμως, η συχνότητα αυτή είναι σημαντική εφόσον η τιμή την οποία θα λάβει δεν πρέπει να ενεργοποιεί τους ηλεκτρονόμους αποκοπής φορτίου οι οποίοι, συχνά, έχουν ελάχιστη ή μηδενική χρονική καθυστέρηση. Η fresidual είναι η πλέον κρίσιμη συχνότητα δεδομένου ότι το σύστημα παραμένει στην συχνότητα αυτή για αρκετό χρονικό διάστημα έως ότου ενεργοποιηθούν η δευτερεύουσα και τριτεύουσα εφεδρεία. Εάν η προστασία αποκοπής φορτίου UfLSP ενεργοποιηθεί μετά από βύθιση της συχνότητας και σημαντικό ποσοστό του φορτίου αποκοπεί, είναι δυνατόν το σύστημα να οδηγηθεί σε υπερσυχνότητα fover. υψηλότερη από την ονομαστική, με πιθανότητα απώλειας και άλλων μονάδων παραγωγής.

Για τους παραπάνω λόγους προτείνεται το ακόλουθο σύνθετο κριτήριο για την ασφαλή λειτουργία του συστήματος σε γεγονότα απώλειας παραγωγής, όπου f_{limit1} , f_{limit2} , f_{limit3} είναι οι αντίστοιχες οριακές τιμές της συχνότητας.

$f_{residual} > f_{\lim it1}$	(7.1)

 $f_{under} > f_{\lim it 2} \tag{7.2}$

$$f_{over} < f_{\lim it3} \tag{7.3}$$



Σχήμα 7.1 Κατώτατη (funder), ανώτατη (fover) και εναπομένουσα (fresidual) συχνότητα κατά το μεταβατικό διάστημα μετά από διαταραχή

7.3 Ικανότητα Υπερφόρτισης Μικρής Διάρκειας των Μονάδων και Βελτιωμένο Μοντέλο Ρυθμιστή Στροφών

Όταν μια μονάδα λειτουργεί κοντά στην ονομαστική της ικανότητα, μια βύθιση συχνότητας μπορεί να προξενήσει προσωρινή υπερφόρτισή της. Αυτή η υπερφόρτιση προέρχεται από την δράση της πρωτεύουσας ρύθμισης, όμως, δεν μπορεί να υπερβεί ένα ανώτατο όριο που καθορίζεται από τον περιοριστή ισχύος του ρυθμιστή στροφών. Η αξιοποίηση της δυνατότητας υπερφόρτισης των μονάδων είναι πολύ σημαντική υπόθεση δεδομένου ότι μπορεί να στηρίξει την συχνότητα κατά την διάρκεια των πρώτων κρίσιμων δευτερολέπτων μετά την απώλεια παραγωγής. Η υπερφόρτιση αυτή μπορεί να διαρκέσει περιορισμένο χρόνο tover, όμως ικανό ώστε να δοθεί η δυνατότητα στην δευτερεύουσα ρύθμιση και στους χειριστές των μονάδων να διορθώσουν την συχνότητα, αυξάνοντας την παραγωγή των υπολοίπων μονάδων του συστήματος. Το άθροισμα της εφεδρείας πρωτεύουσας ρύθμισης PR (Primary Reserve) και της εφεδρείας μικρής διάρκειας που αντιστοιχεί στην υπερφόρτιση της μονάδας OR (Overloading Reserve) ονομάζεται ταχεία εφεδρεία ή εφεδρεία άμεσης απόκρισης ER (Emergency Reserve). Μετά παρέλευση χρόνου tover, η μονάδα πρέπει να απορρίψει το περίσσειο φορτίο της και να επανέλθει στα ονομαστικά της επίπεδα ακολουθώντας κατάλληλη κλίση σύμφωνα με τον ρυθμό απόρριψης φορτίου που δίδει ο κατασκευαστής.

Ο περιοριστής ισχύος του βελτιωμένου ρυθμιστή στροφών επιτρέπει τη ασφαλή υπερφόρτιση της μονάδας σύμφωνα με τα διεθνή Standards. Το σχήμα 7.2 παρουσιάζει σχηματικό διάγραμμα ενός διαφορικο - ολοκληρωτικού ρυθμιστή, όπου ο προτεινόμενος περιοριστής ισχύος απεικονίζεται στο πλαίσιο με την εστιγμένη γραμμή. Οι παρακάτω μεταβλητές χρησιμοποιούνται :

R	στατισμός μονάδας
Pr	ισχύς αναφοράς
T_{go}, T_t	χρονικές σταθερές του ρυθμιστή στροφών και του στροβίλου
P _{li}	είσοδος του περιοριστή
P_{go}, P_G	έξοδος του ρυθμιστή και έξοδος του στροβίλου
ΔF	απόκλιση συχνότητας από την ονομαστική της τιμή
K _I , K _D	διαφορικό και ολοκληρωτικό κέρδος

Το προτεινόμενο μοντέλο ρυθμιστή στροφών προσομοιώνει, επίσης, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των σύγχρονων ρυθμιστών, δηλαδή την δυνατότητά τους να λειτουργούν είτε με σταθερό φορτίο (load mode) είτε με βάση τον στατισμό τους (droop mode). Όταν η κατάσταση «load mode» έχει επιλεγεί, η μονάδα λειτουργεί σε σταθερό φορτίο και δεν αντιδρά στις αποκλίσεις της συχνότητας ενώ όταν η «droop mode» έχει επιλεγεί, η μονάδα αντιδρά σύμφωνα με τον στατισμό της. Ο ρυθμιστής στροφών μπορεί να μεταβεί αυτόματα από την κατάσταση «load mode» στην κατάσταση «droop mode» όταν η συχνότητα πέσει κάτω από ορισμένο επίπεδο το οποίο έχει προεπιλεγεί.

Το μοντέλο του περιοριστή ισχύος έχει ένα άνω όριο P^*_{over} το οποίο δε είναι σταθερό αλλά εξαρτάται από ορισμένες μεταβλητές. Οι μεταβλητές αυτές είναι ο χρόνος υπερφόρτισης της μονάδας t_{over}, το ρεύμα που η μονάδα λειτουργούσε πριν από την διαταραχή I_p και η θερμοκρασία θ του μέσου ψύξης.



Σχήμα 7.2 Σχηματικό διάγραμμα διαφορικο-ολοκληρωτικού ρυθμιστή στροφών με δύο τρόπους λειτουργίας και βελτιωμένο περιοριστή ισχύος

Τα standards IEEE C50.13-2005 και IEC 60034-3:1998 [10-11] παρέχουν τους βασικούς κανόνες σχετικά με την υπερφόρτιση μικρής διάρκειας των στροβιλογεννητριών σε ονομαστικές συνθήκες (φόρτισης, θερμοκρασίας κλπ) και χωρίς επιτάχυνση της γήρανσης. Όμως, ο αριθμός των υπερφορτίσεων αυτών πρέπει να είναι περιορισμένος για να μην υπάρξει μείωση του χρόνου ζωής. Το ρεύμα υπερφόρτισης Iover εκφράζεται από την εξ. 7.4 σε ανά μονάδα τιμές, όπου Κ είναι σταθερά ίση με 37.5 [10-12]. Η εξίσωση όμως αυτή, δεν λαμβάνει υπόψη της την θερμική κατάσταση της γεννήτριας πριν από την υπερφόρτιση. Σύμφωνα με το IEC 255-8:1990 ο χρόνος πτώσης t από θερμικό ηλεκτρονόμο συναρτήσει του ρεύματος υπερφόρτισης μιας μονάδας δίδεται από την εξίσωση 7.5 [13], όπου Ι είναι το ρεύμα υπερφόρτισης, I_P είναι το ρεύμα λειτουργίας πριν την υπερφόρτιση, I_N το ονομαστικό ρεύμα, τ είναι χρονική σταθερά που κυμαίνεται από 30s έως 3200s και k είναι σταθερά που κυμαίνεται από 1 έως 1.2. Η σταθερά k καθορίζει το ελάγιστο ρεύμα το οποίο ποτέ δεν ενεργοποιεί ο θερμικός ηλεκτρονόμος. Το διάγραμμα 7.3 παρουσιάζει την οικογένεια καμπυλών που προκύπτει θεωρώντας διάφορες τιμές του ρεύματος Ip μιας μονάδας με $\tau = 300$ s και k=1.1.

$$I_{over} = \sqrt{\frac{K}{t_{over}} + 1}$$

$$t = \tau \cdot \ln \frac{I^2 - I_p^2}{I^2 - (k \cdot I_N)^2}$$
(7.4)
(7.5)



Σχήμα 7.3 Χρόνοι πτώσης από θερμικό ηλεκτρονόμο συναρτήσει του ρεύματος υπερφόρτισης της μονάδας

Εάν το ρεύμα Ι στην εξίσωση 7.5 αντικατασταθεί με (I+k-1) η οικογένεια των καμπυλών του σχήματος 7.3 μετακινείται προς τα αριστερά κατά την ποσότητα k-1 αφήνοντας ένα περιθώριο ρεύματος ίσο με το k-1 πριν ο θερμικός ηλεκτρονόμος ενεργοποιηθεί. Οι νέες καμπύλες δίδονται πλέον από την εξ. 7.6 και είναι ασύμπτωτες στον κάθετο άξονα, επιτρέποντας άπειρο χρόνο στο ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας. Οι καμπύλες αυτές επιτρέπουν υπερφόρτιση της μονάδας με ρεύμα μικρότερο κατά k-1 του επιτρεπομένου από τον θερμικό ηλεκτρονόμο προστασίας της. Η εξίσωση 7.6

λαμβάνει υπόψη την θερμική κατάσταση της γεννήτριας και την χρονική σταθερά τ. Επομένως, η γεννήτρια μπορεί να υπερφορτιστεί με ασφάλεια για μικρό χρονικό διάστημα το οποίο προσδιορίζεται από την εξ. 7.4 ή εναλλακτικά από την 7.6 εάν η θερμική προϊστορία της μονάδας ληφθεί υπόψη. Η εξ. 7.6 μετασχηματίζεται στην εξ. 7.7 η οποία δίδει το επιτρεπόμενο ρεύμα υπερφόρτισης Iover ως συνάρτηση των Ip, k και του χρόνου υπερφόρτισης tover. Ας σημειωθεί ότι, η μεταβατική απόκριση συχνότητας διαρκεί, συνήθως, λιγότερο από 20s και πέραν τούτου ένας επιπρόσθετος χρόνος είναι απαραίτητος ώστε οι Χειριστές να αυξήσουν την παραγωγή των μονάδων που διαθέτουν στρεφόμενη εφεδρεία και να αποκαταστήσουν την συχνότητα. Αυτό σημαίνει ότι, ένας συνολικός χρόνος υπερφόρτισης των μονάδων tover της τάξης των 60s έως 120s μπορεί να επιλεγεί.

$$t = \tau \cdot \ln \frac{(I+k-1)^2 - I_p^2}{(I+k-1)^2 - (k \cdot I_N)^2}$$
(7.6)
$$I = \frac{1}{1 + \sqrt{k \cdot e^{tover/\tau} - I_p^2}}$$
(7.7)

$$I_{over} = 1 + \sqrt{\frac{\kappa \cdot e^{-1}}{e^{tover/\tau}}}$$

$$\tag{7.7}$$

Λαμβανομένου υπόψη ότι, ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης (AVR) μιας γεννήτριας είναι πολύ ταχύτερος από τον αντίστοιχο ρυθμιστή στροφών, η τάση εξόδου της μονάδας μπορεί να θεωρηθεί ότι αποκαθίσταται περίπου στην ονομαστική της τιμή ευθύς αμέσως μετά την διαταραχή απώλειας παραγωγής. Θεωρώντας ότι όλες οι ηλεκτρικές μεταβλητές εκφράζονται σε ανά μονάδα τιμές (pu), η φαινομένη ισχύς Sover κατά την διάρκεια υπερφόρτισης με ρεύμα Iover υπολογίζεται από την εξ. 7.8. Θεωρώντας ότι ο συντελεστής ισχύος της μονάδας παραμένει ίδιος πριν και μετά την υπερφόρτιση (σημεία S_N και S_{over} του σχήματος 7.4) ισχύει ότι $P_{over}/P_N=Q_{over}/Q_N=$ S_{over}/S_N το οποίο ισούται με $I_{over}/I_N=I_{over}$ δεδομένου ότι $S_{over}=I_{over}$ (εξ. 7.8) και $I_N=1$ μ [94]. Επομένως, με σταθερό συντελεστή ισχύος, αύξηση κατά ορισμένο ποσοστό του ρεύματος υπερφόρτισης συνεπάγεται ίδια ποσοστιαία αύξηση της ενεργού, αέργου και φαινομένης ισχύος της μονάδας. Αυτό σημαίνει ίση συμβολή σε ενεργό, άεργο και φαινομένη ισχύ, οι οποίες είναι σε έλλειψη αμέσως μετά την απώλεια παραγωγής, γεγονός που είναι επιθυμητό. Κατά συνέπεια, το επίπεδο ισχύος Pover το οποίο περιγράφεται από την εξ. 7.9 μπορεί να υιοθετηθεί για τον περιοριστή ισχύος της μονάδας ώστε να επιτρέπει την υπερφόρτιση μικρής διάρκειας, σύμφωνα με τα standards.



Σχήμα 7.4 Καμπύλες φόρτισης γεννήτριας

Εάν, επί πλέον, ληφθεί υπόψη η επίδραση της θερμοκρασίας θ του μέσου ψύξης επί της ισχύος εξόδου της μονάδας, τότε η εξ. 7.9 μετασχηματίζεται στην εξ. 7.10. Στην εξίσωση αυτή, P^{*}_{over} είναι πλέον το νέο όριο του περιοριστή ισχύος και a, b είναι συντελεστές που λαμβάνουν τις τιμές -6.67 και 1.27, εάν ληφθεί υπόψη η τυπική καμπύλη του standard IEEE C50.13-2005 η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 7.5 [10].

$$S_{over} = I_{over} , \quad if \quad V = 1pu \tag{7.8}$$

$$P_{over} = P_N \cdot I_{over} \tag{7.9}$$

$$P_{over}^* = P_{over} \cdot (a \cdot \theta + b) \tag{7.10}$$



Σχήμα 7.5 Τυπική καμπύλη ικανότητας γεννήτριας συναρτήσει της θερμοκρασίας του μέσου ψύζης

7.4 Προσομοίωση Δυναμικής Απόκρισης Συχνότητας

Το αναλυτικό μοντέλο δυναμικής απόκρισης συχνότητας ενός απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας απαρτιζόμενου από η μονάδες παραγωγής μπορεί να αναπτυχθεί λαμβάνοντας για κάθε μονάδα τον ρυθμιστή φορτίου-συχνότητας που αναπτύχθηκε παραπάνω. Το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπόψη του την δυνατότητα υπορφόρτισης των μονάδων και απεικονίζεται παραστατικά στο σχήμα 7.6 όπου P_L είναι η ζήτηση φορτίου, D είναι ο συντελεστής απόσβεσης, H είναι η αδράνεια του συστήματος ενώ $K_p = \frac{1}{D}$ και $T_p = \frac{2 \cdot H}{D}$. Πέραν τούτου, η λειτουργία των ηλεκτρονόμων υποσυχνότητας UfLSP (Under-frequency Load Shedding Protection) μπορεί να ενσωματωθεί στο μοντέλο. Αυτό γίνεται με κατάλληλη τροποποίηση της ζήτησης φορτίου P_L όταν η συχνότητας.



Σχήμα 7.6 Μοντέλο δυναμικής απόκρισης συχνότητας ενός απομονωμένου συστήματος με η μονάδες παραγωγής

Το μοντέλο του σχήματος 7.6 προσομοιώνει την δυναμική απόκριση συχνότητας μετά από απώλεια παραγωγής. Οι αντίστοιχες διαφορικές εξισώσεις επιλύονται χρησιμοποιώντας κατάλληλη αριθμητική μέθοδο και αναλύεται περίοδος χρόνου ίση με 120ms λαμβάνοντας ως βήμα χρόνου της αριθμητικής μεθόδου τα 0.1s. Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου που προσομοιώνει το βελτιωμένο μοντέλο ρυθμιστή στροφών παρουσιάζεται στο σχήμα 7.7. Οι μεταβλητές t1 και t2 που εμφανίζονται στον αλγόριθμο είναι μετρητές που μετρούν αντίστοιχα τον χρόνο υπερφόρτισης και τον χρόνο γραμμικής απόρριψης του περίσσιου φορτίου μέχρι το ονομαστικό ενώ η μεταβλητή "over" είναι δείκτης που υποδηλώνει ότι η μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση υπερφόρτισης.

Ας σημειωθεί ότι το μοντέλο δυναμικής απόκρισης συχνότητας που, συνήθως, χρησιμοποιείται στην βιβλιογραφία ομαδοποιεί τις ομοειδείς μονάδες σε μια ισοδύναμη της οποίας ο στατισμός R υπολογίζεται από την σχέση 7.11, όπου R_1 , R_2 ,..., R_n είναι οι κανονικοποιημένοι στατισμοί των μονάδων.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$
(7.11)

Εν τούτοις, δεν υπάρχει σχέση η οποία να υπολογίζει τις χρονικές σταθερές του ρυθμιστή στροφών $T_{\rm go}$ και του στροβίλου $T_{\rm t}$ της ισοδύναμης μονάδας και κατά συνέπεια, το μοντέλο αυτό δεν είναι ακριβές. Επί πλέον, όταν ορισμένες μονάδες λειτουργούν σε κατάσταση «load mode» και άλλες σε «droop mode» ή όταν οι περιοριστές ισχύος επενεργούν, η απόκριση του συστήματος γίνεται πολύ μικρότερη και επομένως, το μοντέλο της ισοδύναμης μονάδας δεν προσφέρει αξιόπιστα αποτελέσματα.



Σχήμα 7.7 Διάγραμμα ροής του αλγόριθμου που προσομοιώνει τον βελτιωμένο περιοριστή ισχύος του ρυθμιστή στροφών

7.5 Μέθοδος Βέλτιστης Κατανομής Φορτίου Λαμβάνοντας Υπόψη την Ικανότητα Υπερφόρτισης των Μονάδων

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται μέθοδος η οποία υπολογίζει την πλέον οικονομική κατανομή του φορτίου στις λειτουργούσες μονάδες με την προϋπόθεση ότι το κριτήριο ασφάλειας που αναπτύχθηκε προηγουμένως ικανοποιείται κάθε χρονική στιγμή. Η μέθοδος περιλαμβάνει διαδικασία βελτιστοποιήσεως η οποία λαμβάνει υπόψη τις εξισώσεις ροών φορτίου και τους περιορισμούς του συστήματος μεταφοράς [95-100]. Οι τάσεις ζυγών πρέπει να διατηρούνται εντός των επιτρεπομένων ορίων και τα ρεύματα όλων των κλάδων πρέπει να παραμένουν μικρότερα των επιτρεπομένων θερμικών ορίων. Το συνολικό κόστος της παραγωγής και της διατήρησης στρεφόμενης εφεδρείας είναι μια αντικειμενική συνάρτηση C_T η οποία πρέπει να ελαχιστοποιηθεί (7.12) [101-102].

min
$$C_T = \sum_{i=1}^{N} C_i (P_{G,i}, SR_i) = \sum_{i=1}^{N} C_{G,i} (P_{G,i}) + \sum_{i=1}^{N} C_{SR,i} (SR_i)$$
 (7.12)

όπου:

 C_i συνολικό κόστος παραγωγής και υπηρεσιών στρεφόμενης εφεδρείας $C_{G,i}, C_{SR,i}$ κόστος παραγωγής και υπηρεσιών στρεφόμενης εφεδρείας μονάδας i $P_{G,i}, SR_i$ παραγωγή ενεργού ισχύος και στρεφόμενη εφεδρεία μονάδας iNαριθμός μονάδων παραγωγής που συμμετέχουν στην αγορά ενέργειας

Οι αρχικές συνθήκες του αλγορίθμου προκύπτουν από αρχική ένταξη των μονάδων η οποία βασίζεται σε γνωστή λίστα προτεραιότητας. Αφού υπολογιστεί η οικονομικότερη λύση χωρίς τον περιορισμό του κριτηρίου ασφάλειας, ακολουθούνται τα επόμενα βήματα με σκοπό να υπολογιστεί η πλέον οικονομική λύση που ικανοποιεί και το κριτήριο ασφάλειας.

Εάν η παραγωγή της μονάδας i μεταβληθεί από $P_{G,i}$ σε $P_{G,i} + \Delta P_{G,i}$, η στρεφόμενη εφεδρεία της μεταβάλλεται αντίστοιχα από SR_i σε $SR_i - \Delta P_{G,i}$ [103, 104]. Επομένως, το συνολικό κόστος εκμετάλλευσης της i μονάδας C_i , μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση μιας μόνο μεταβλητής C_i ($P_{G,i}$). Ο λόγος $\Delta C_i / \Delta P_{G,i}$ κάθε μονάδας που μετέχει στην αγορά ενέργειας προσδιορίζει την σειρά οικονομικής προτεραιότητας της μονάδας με υψηλή τιμή του λόγου $\Delta C_i / \Delta P_{G,i}$ θα ονομάζεται εφεξής «αντιοικονομική μονάδα». Σύμφωνα με την οικονομική κατανομή του φορτίου, η στρεφόμενη εφεδρεία του συστήματος είναι κυρίως συγκεντρωμένη στις πλέον «αντιοικονομικές»

μονάδες. Αυτό είναι λογικό διότι μετα-κύλιση της εφεδρείας προς τις «οικονομικές» μονάδες θα είχε ως αποτέλεσμα την υψηλότερη φόρτιση των «αντιοικονομικών» μονάδων.

Η ικανοποίηση του κριτηρίου ασφάλειας συνεπάγεται ότι, η στρεφόμενη εφεδρεία πρέπει να ανακατανεμηθεί στις μονάδες έτσι ώστε οι πιθανές δικυμάνσεις της συχνότητας να διατηρούνται μέσα στα επιθυμητά όρια. Για τον λόγο αυτό η εφεδρεία πρωτεύουσας ρύθμισης PR, η εφεδρεία υπερφόρτισης OR και η μέγιστη τιμή της OR_{max} υπολογίζονται για κάθε μονάδα, υποθέτοντας απώλεια της μονάδας με την μεγαλύτερη φόρτιση ULG. Οι μονάδες που λειτουργούν χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στις «φορτωμένες» μονάδες και στις «μη φορτωμένες» μονάδες. Η πρώτη κατηγορία ορίζεται ως το σύνολο των μονάδων των οποίων η εφεδρεία υπερφόρτισης, σε γεγονός απώλειας της ULG, ισούται με την μέγιστη τιμή της.

Η απόκριση συχνότητας βελτιώνεται εάν η εφεδρεία ταχείας απόκρισης του συστήματος ER, δηλαδή το άθροισμα PR + OR, αυξηθεί. Κατά παρόμοιο τρόπο, μια «φορτωμένη» μονάδα i μπορεί να συνεισφέρει πιο αποτελεσματικά στην αποκατάσταση της συχνότητας εάν η εφεδρεία ταχείας απόκρισής της ER_i αυξηθεί. Αυτό επιτυγχάνεται εάν μέρος της παραγωγής της αναληφθεί από άλλη μονάδα η οποία είναι «μη φορτωμένη». Η πρώτη μονάδα ονομάζεται «δότης» και η δεύτερη μονάδα ονομάζεται «παραλήπτης». Κατά την διαδικασία αυτή πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε η εφεδρεία υπερφόρτισης του «παραλήπτη» να παραμείνει μικρότερη από την μέγιστη τιμή της OR_{max} ώστε να μη μειωθεί η διαθέσιμη ER του «παραλήπτη». Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

- Λαμβάνοντας υπόψη την διαθεσιμότητα των μονάδων, την ζήτηση φορτίου και την απαιτούμενη ελάχιστη στρεφόμενη εφεδρεία, καθόρισε την λειτουργική κατάσταση όλων των μονάδων (on ή off) σύμφωνα με δεδομένη λίστα προτεραιότητας.
- 2. Υπολόγισε την πλέον οικονομική κατανομή φορτίου σεβόμενη τους περιορισμούς του συστήματος μεταφοράς.
- 3. Υπολόγισε τους λόγους $\Delta C_i / \Delta P_{G,i}$ για κάθε λειτουργούσα μονάδα και ταξινόμησε τις μονάδες σύμφωνα με τους λόγους αυτούς, ξεκινώντας από την λιγότερο «αντιοικονομική μονάδα».
- 4. Προσδιόρισε την μονάδα με την μεγαλύτερη φόρτιση ULG και θεώρησε το γεγονός της ξαφνικής απώλειάς της.
- 5. Υπολόγισε τις συχνότητες f_{under}, f_{over} και f_{residual} χρησιμοποιώντας το μοντέλο δυναμικής απόκρισης συχνότητας που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 6.4.
- 6. Υπολόγισε τις τιμές των SR, PR, OR και OR_{max} για κάθε λειτουργούσα μονάδα και ταξινόμησε τις μονάδες σε «φορτωμένες» και «μη φορτωμένες».
- Εάν το κριτήριο ασφάλειας ικανοποιείται, ο αλγόριθμος τερματίζεται (βήμα17), διαφορετικά μια νέα κατανομή φορτίου πρέπει να υπολογιστεί ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα.
- 8. Υπολόγισε νέα κατανομή του φορτίου μεταφέροντας μικρό μέρος της παραγωγής (π.χ. 0.1 MW) από την πλέον «αντιοικονομική» «φορτωμένη» μονάδα του συστήματος στην λιγότερο «αντιοικονομική» «μη φορτωμένη»

μονάδα. Προϋπόθεση για την ανακατανομή αυτή είναι να μην καταστεί ο «παραλήπτης» μια «φορτωμένη μονάδα».

- 9. Υπολόγισε τις νέες ροές φορτίου και έλεγξε εάν η λύση αυτή είναι αποδεκτή με βάση τους περιορισμούς του συστήματος μεταφοράς. Εάν δεν είναι αποδεκτή, απέρριψε την νέα κατανομή φορτίου και επέστρεψε στο βήμα 8, λαμβάνοντας την επόμενη «αντιοικονομική» μονάδα.
- 10. Εάν μια νέα αποδεκτή κατανομή φορτίου προσδιορίστηκε, επέστρεψε στο βήμα 3. Όταν όλες οι «φορτωμένες μονάδες» έχουν ληφθεί υπόψη και επομένως η μέγιστη ER του συστήματος έχει επιτευχθεί, συνέχισε στο επόμενο βήμα.
- 11. Αποφάσισε ποιο από τα ακόλουθα δύο μέτρα πρέπει να χρησιμοποιηθεί: μια νέα μονάδα θα τεθεί σε λειτουργία ή μια κατάλληλη προστασία αποκοπής φορτίου με τις ελάχιστες δυνατές διακοπές πελατών θα εφαρμοστεί.
- 12. Εάν μια νέα μονάδα πρέπει να τεθεί σε λειτουργία, σύμφωνα με την λίστα προτεραιότητας και την διαθεσιμότητα των μονάδων, επέστρεψε στο βήμα 2.
- 13. Εάν υιοθετηθεί η επιλογή της αποκοπής φορτίου, ρύθμισε τους ηλεκτρονόμους υποσυχνότητας στο όριο f_{under} του κριτηρίου ασφάλειας.
- 14. Θεώρησε ότι, το ποσό της αποκοπής φορτίου αυξάνεται με κατάλληλα βήματα (π.χ. 2% της ζήτησης φορτίου) και ξεκίνησε από το πρώτο βήμα φορτίου, υπολογίζοντας την νέα ζήτηση [8, 105].
- 15. Θεωρώντας απώλεια της ULG, υπολόγισε τις χαρακτηριστικές συχνότητες f_{under}, f_{over} και f_{residual} χρησιμοποιώντας πάλι το μοντέλο δυναμικής απόκρισης συχνότητας που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 6.4.
- 16. Εάν το κριτήριο ασφάλειας δεν ικανοποιείται, επέστρεψε στο βήμα 14 και θεώρησε το νέο αυξημένο ποσό αποκοπής φορτίου έως ότου το κριτήριο ασφάλειας ικανοποιηθεί.
- 17. Υπολόγισε την τελική κατανομή των SR, PR και OR στις λειτουργούσες μονάδες του συστήματος καθώς και την κατάλληλη αποκοπή φορτίου, εφόσον η προστασία αυτή έχει εφαρμοστεί.

Κάνοντας χρήση της παραπάνω μεθόδου για σημαντικό αριθμό ωρών λειτουργίας του συστήματος, οι αντίστοιχες τιμές των f_{under}, f_{over} και f_{residual} υπολογίζονται, οι οποίες στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθούν για στατιστική ανάλυση. Ένας σημαντικός πιθανοτικός δείκτης I_F που αφορά στις τιμές αυτές είναι η πιθανότητα (επί τοις εκατό) ώστε οι τιμές των f_{under}, f_{over} και f_{residual} να βρίσκονται σε ορισμένα όρια συχνότητας. Η μεταβολή του δείκτη αυτού σε σχέση με τα όρια της συχνότητας παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για την μελέτη της προστασίας αποκοπής φορτίου UfLSP. Για παράδειγμα, είναι πιθανό, ο αριθμός των διακοπών πελατών να αυξάνεται σημαντικά όταν το επίπεδο υποσυχνότητας της προστασίας UfLSP αυξάνεται κατ ελάχιστα μόνο δέκατα του Hz.

Είναι προφανές ότι, η εναπομένουσα συχνότητα f_{residual} εξαρτάται από το μέγεθος της απώλειας παραγωγής, δηλαδή την ULG, καθώς επίσης και από την στρεφόμενη εφεδρεία του συστήματος SR και την εφεδρεία ταχείας απόκρισης ER. Επομένως, υπάρχει μια πολλαπλή συσχέτιση μεταξύ τεσσάρων μεταβλητών (f_{residual} ULG, SR και ER), οι οποίες ονομάζονται r_j (j=1 έως 4) αντίστοιχα. Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση των SR και ER στην εναπομένουσα συχνότητα μετά από διαταραχή και κατά συνέπεια, η επίδρασή τους στην ασφάλεια του συστήματος, είναι ανάγκη να γίνει κατάλληλη στατιστική επεξεργασία. Προς τον σκοπό αυτό, η μεγαλύτερη

φόρτιση των μονάδων παραγωγής ULG εκφράζεται ως ποσοστό της συνολικής παραγωγής και οι εφεδρείες SR και ER εκφράζονται ως ποσοστό της ζήτησης φορτίου. Εάν r_{12} , r_{13} , r_{14} , r_{23} , r_{24} , r_{34} είναι οι συντελεστές συσχέτισης μηδενικής τάξης των αντίστοιχων μεταβλητών τότε, μπορούν να υπολογιστούν οι συντελεστές μερικής συσχέτισης $r_{ij,k}$ (i, j, k=1 έως 4). Ο συντελεστής μερικής συσχέτισης $r_{13,2}$ εκφράζει την συσχέτιση της μεταβλητής r_1 με την μεταβλητή r_3 όταν η μεταβλητή r_2 διατηρείται σταθερή. Αυτό σημαίνει ότι, ο δείκτης $r_{13,2}$ εκφράζει την συσχέτιση της εναπομένουσας συχνότητας $f_{residual}$ με την στρεφόμενη εφεδρεία SR με την προϋπόθεση ότι έχουμε σταθερή απώλεια παραγωγής, δηλαδή η ULG διατηρείται σταθερή. Παρομοίως, ο δείκτης $r_{14,2}$ εκφράζει την συσχέτιση της εναπομένουσας συχνότητας $f_{residual}$ με την εφεδρεία ταχείας απόκρισης ER με την προϋπόθεση ότι έχουμε σταθερή απώλεια παραγωγής (ULG διατηρείται σταθερή). Οι συντελεστές μερικής συσχέτισης υπολογίζονται από τους συντελεστές συσχέτισης μηδενικής τάξης με βάση τις σχέσεις 7.13 – 7.14.

$$r_{13.2} = \frac{r_{13} - r_{12} \cdot r_{23}}{\sqrt{(1 - r_{12}^2) \cdot (1 - r_{23}^2)}}$$
(7.13)

$$r_{14,2} = \frac{r_{14} - r_{12} \cdot r_{24}}{\sqrt{(1 - r_{12}^2) \cdot (1 - r_{24}^2)}}$$
(7.14)

7.6 Ανάλυση Τυπικού Συστήματος

Το βελτιωμένο μοντέλο ρυθμιστή στροφών και η υπολογιστική μέθοδος που αναπτύχθηκαν παραπάνω αποσαφηνίζονται περαιτέρω με εφαρμογή στο τυπικό, απομονωμένο σύστημα Κρήτης, του οποίου τα δεδομένα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1 και όπου οι μονάδες αναγράφονται κατά σειρά οικονομικής προτεραιότητας. Ως θερμοκρασία του μέσου ψύξης των μονάδων λαμβάνεται η ονομαστική. Οι τιμές στατισμού όλων των μονάδων υπολογίστηκαν από τρεις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο σύστημα Κρήτης [108]. Στις δοκιμές αυτές έγινε σκόπιμη, αιφνίδια απώλεια ορισμένου ποσοστού παραγωγής (2.6%, 6.2% και 9% της συνολικής) και καταγράφηκαν οι αντίστοιχες βυθίσεις συχνότητας.

Κάνοντας χρήση του μοντέλου που απεικονίζεται στα σχήματα 7.2, 7.6 και 7.7 για 50 συνεχόμενες ώρες λειτουργίας του συστήματος, παρήχθησαν τα ακόλουθα δύο παραδείγματα. Στα αντίστοιχα διαγράμματα 7.8 και 7.9 απεικονίζονται οι τιμές συνολικού στατισμού του συστήματος (αντίστροφο της ρυθμίζουσας ενέργειας του συστήματος) οι οποίες υπολογίστηκαν τόσο με το μοντέλο της ισοδύναμης μονάδας όσο και με την προσομοίωση του συστήματος (Κεφάλαιο 7.4).

Στο διάγραμμα 7.8 θεωρείται ότι όλες οι μονάδες λειτουργούν σε «droop mode» και οι περιοριστές ισχύος είναι ρυθμισμένοι σε σταθερές τιμές P^*_{over} οι οποίες είναι ίσες είτε με 1pu είτε με 1.03pu. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα αυτό, ο συνολικός στατισμός του συστήματος, σύμφωνα με την προσομοίωση, είναι πολύ μεγαλύτερος από το υπολογιζόμενο με βάση το μοντέλο της ισοδύναμης μονάδας. Αυτό σημαίνει ότι, η εφεδρεία ταχείας απόκρισης είναι πολύ μικρότερη από την αναμενόμενη. Το διάγραμμα 7.9 δείχνει την πραγματική εφεδρείας ταχείας απόκρισης ως ποσοστό της υπολογιζόμενης με βάση την ισοδύναμη μονάδα. Το ποσοστό αυτό δεν είναι σταθερό (π.χ. 40 % όπως παρουσιάζεται στις εργασίες [101-102] αλλά εξαρτάται από την εκάστοτε σύνθεση των μονάδων παραγωγής. Επίσης, εάν οι μονάδες μπορούν να υπερφορτιστούν για μικρό χρονικό διάστημα, μόλις κατά 3%, ο συνολικός στατισμός του συστήματος μειώνεται και η εφεδρεία ταχείας απόκρισης αυξάνεται σημαντικά.

Στο διάγραμμα 7.10 θεωρείται ότι οι περιοριστές ισχύος είναι ρυθμισμένοι στο 1.05pu. Επίσης, οι μονάδες βάσεως (U1-U8) λειτουργούν σε κατάσταση «load mode» και μεταβαίνουν αυτόματα σε κατάσταση «droop mode» όταν η συχνότητα πέσει κάτω από ένα όριο F_{change} το οποίο έχει ληφθεί ίσο με 49.5Hz, 49Hz και 48.5Hz αντιστοίχως. Τέλος, οι μονάδες αιχμής λειτουργούν μόνιμα σε κατάσταση «droop mode». Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, ο συνολικός στατισμός του συστήματος αυξάνεται σημαντικά όταν το όριο F_{change} λαμβάνει χαμηλότερες τιμές.



Σχήμα 7.8 Συνολικός στατισμός συστήματος υποθέτοντας δύο διαφορετικά όρια των περιοριστών ισχύος και με τις μονάδες σε «drop mode»



Σχήμα 7.9 Πραγματική εφεδρεία ταχείας απόκρισης ως ποσοστό της υπολογιζόμενης με βάση το μοντέλο της ισοδύναμης μονάδας



Σχήμα 7.10 Συνολικός στατισμός συστήματος υποθέτοντας τρία διαφορετικά όρια συχνότητας F_{change} για μετάβαση από «load mode» σε «droop mode»

Η υπολογιστική μέθοδος που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 7.5 χρησιμοποιείται για την ανάλυση λειτουργίας του συστήματος για χρονική περίοδο 200 συνεχόμενων ωρών. Για κάθε ώρα λειτουργίας και θεωρώντας απώλεια της ULG, υπολογίζεται η βέλτιστη διασπορά της στρεφόμενης εφεδρείας καθώς και οι τιμές f_{under}, f_{over} και f_{residual}. Η απαίτηση σε ελάχιστη στρεφόμενη εφεδρεία λαμβάνεται ίση με την ULG. Οι μονάδες βάσεως U1 - U8 λειτουργούν σε «load mode» με αυτόματη μεταγωγή σε «droop mode» όταν η συχνότητα πέσει κάτω από το όριο F_{change} =49.5Hz. Οι μονάδες αιχμής

λειτουργούν μόνιμα σε «droop mode». Τέλος, ο επιτρεπόμενος χρόνος υπερφόρτισης όλων των μονάδων λαμβάνεται ίσος με 100s.

Τα σχήματα 7.11 και 7.12 παρουσιάζουν τις τιμές των f_{under} και f_{residual} οι οποίες προκύπτουν χωρίς την απαίτηση ικανοποίησης του κριτηρίου ασφάλειας. Η διασπορά της στρεφόμενης εφεδρείας έχει υπολογιστεί με βάση την οικονομική κατανομή του φορτίου. Οι ελάχιστες τιμές των f_{under} και f_{residual} είναι ίσες με 48.546Hz και 48.306Hz αντίστοιχα και λαμβάνουν χώρα κατά την 30^{η} ώρα της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου όταν η ζήτηση φορτίου είναι 126MW. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.1, οι εν λειτουργία μονάδες έχουν συνολική ονομαστική ικανότητα 150.60MW και κατά συνέπεια, η διαθέσιμη στρεφόμενη εφεδρεία είναι ίση με 24.73MW, η οποία είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη απαιτούμενη (ULG=23.50MW). Όπως είναι αναμενόμενο, η υπόψη στρεφόμενη εφεδρεία είναι διασπαρμένη στις πιο «αντιοικονομικές» μονάδες U8 – U10. Η εφεδρεία πρωτεύουσας ρύθμισης PR και η εφεδρεία υπερφόρτισης OR του συστήματος είναι ίσες με 12.89MW και 6.94MW αντίστοιχα.



Σχήμα 7.11 Εναπομένουσες συχνότητες χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το κριτήριο ασφάλειας



Σχήμα 7.12 Κατώτατες συχνότητες χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το κριτήριο ασφάλειας

χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το κριτήριο ασφάλειας									
Unit	Generation	Generation	Nominal	Max-	Technical	SR	PR	OR	ORmax
	before ULG	just after	capacity	limiter	minimum	(MW)	(MW)	(MW)	(MW)
	trip (MW)	ULG trip	(MW)	(MW)	limit (MW)				
		and primary							
		regulation							
		(MW)							
U1	23.50	0.00	23.50	25.26	18.00				
U2	23.50	25.26	23.50	25.26	18.00			1.76	1.76
U3	23.50	25.26	23.50	25.26	18.00			1.76	1.76
U4	14.10	15.16	14.10	15.16	8.00			1.06	1.06
U5	14.10	15.16	14.10	15.16	8.00			1.06	1.06
U6	5.90	6.34	5.90	6.34	4.00			0.44	0.44
U7	11.50	12.36	11.50	12.36	3.00			0.86	0.86
U8	3.90	7.24	11.50	12.36	3.00	7.60	3.34		0.86
U9	3.00	7.78	11.50	12.36	3.00	8.50	4.78		0.86
U10	3.00	7.78	11.50	12.36	3.00	8.50	4.78		0.86
Sum	126.00	123.50	150.60	161.90	86.00	24.73	12.89	6.94	9.53

Πίνακας 7.1 Κατανομή φορτίου κατά την 30^η ώρα της περιόδου γωρίς να λαμβάνεται υπόψη το κριτήριο ασφάλειας

Εάν το κριτήριο ασφάλειας f_{limit}=49Hz ληφθεί υπόψη τότε, όλες οι τιμές που λαμβάνει η f_{residual} παραμένουν υψηλότερες από 49Hz (σχήμα 7.13). Όπως φαίνεται στο σχήμα 7.13, η ελάχιστη τιμή της f_{residual} είναι 49.001Hz και λαμβάνει χώρα κατά την 30^η ώρα της περιόδου ενώ η ελάχιστη τιμή της f_{under} είναι 48.54Hz και λαμβάνει χώρα την 18^η ώρα της περιόδου (σχήμα 7.14). Ο Πίνακας 7.2 παρουσιάζει την κατανομή φορτίου κατά την 30^η ώρα της περιόδου. Η στρεφόμενη εφεδρεία του συστήματος παραμένει ίδια (24.73MW) ενώ η τιμή της PR αυξήθηκε από 12.89MW

σε 14.26MW αυξάνοντας παράλληλα την εφεδρεία ταχείας απόκρισης ΕΡ κατά 1.37MW. Επί πλέον, η PR βρίσκεται τώρα διασπαρμένη σε επτά μονάδες (U4-U10) αντί τριών μονάδων (U8-U10) που ήταν προηγουμένως.



Σχήμα 7.13 Εναπομένουσες συχνότητες όταν το κριτήριο ασφάλειας (f_{limit1} =49Hz) ληφθεί υπόψη



Σχήμα 7.14 Κατώτατες συχνότητες όταν το κριτήριο ασφάλειας (f_{limit1}=49Hz) ληφθεί υπόψη

Πίνακας 7.2 Κατανομή φορτίου κατά την 30^η ώρα της περιόδου όταν το κριτήριο ασφάλειας (f_{limit}=49Hz) ληφθεί υπόψη

	0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1								
Unit	Generation	Generation	Nominal	Max-	Technical	SR	PR	OR	ORmax
	before ULG	just after	capacity	limiter	minimum	(MW)	(MW)	(MW)	(MW)
	trip (MW)	ULG trip	(MW)	(MW)	limit (MW)				
		and primary							
		regulation							
		(MW)							
U1	23.50	0.00	23.50	25.26	18.00				
U2	23.50	25.26	23.50	25.26	18.00			1.76	1.76
U3	23.50	25.26	23.50	25.26	18.00			1.76	1.76
U4	13.82	15.16	14.10	15.16	8.00	0.28	0.28	1.06	1.06
U5	12.24	15.04	14.10	15.16	8.00	1.86	1.86	0.94	1.06
U6	4.90	6.34	5.90	6.34	4.00	1.00	1.00	0.44	0.44
U7	9.16	12.36	11.50	12.36	3.00	2.34	2.34	0.86	0.86
U8	9.26	11.54	11.50	12.36	3.00	2.24	2.24	0.04	0.86
U9	3.00	6.26	11.50	12.36	3.00	8.50	3.26		0.86
U10	3.00	6.26	11.50	12.36	3.00	8.50	3.26		0.86
Sum	126.00	123.50	150.60	161.90	86.00	24.73	14.26	6.94	9.53

Όπως φαίνεται στο σχήμα 7.14, η ελάχιστη τιμή των κατώτατων συχνοτήτων f_{under} είναι 48.542Hz, συχνότητα αρκετά χαμηλή, η οποία είναι πιθανόν να διεγείρει τους ηλεκτρονόμους αποκοπής φορτίου. Εάν ένα σύνθετο κριτήριο ασφάλειας επιλεγεί, το οποίο περιλαμβάνει τα όρια f_{limit1} =49Hz και f_{limit2} =48.70Hz, οι αντίστοιχες τιμές των κατώτατων συχνοτήτων f_{under} παρουσιάζονται στο σχήμα 7.15. Όπως είναι προφανές, το όριο f_{limit2} =48.70Hz το οποίο δεν ικανοποιούνταν στην περίπτωση του διαγράμματος 7.14, ικανοποιείται πλέον στο διάγραμμα 7.15 όπου βελτιωμένη διασπορά της στρεφόμενης εφεδρείας έχει επιτευχθεί.



Σχήμα 7.15 Κατώτατες συχνότητες όταν το κριτήριο ασφάλειας (f_{limit1} =49Hz και f_{limit2} =48.70Hz) ληφθεί υπόψη

Η απαίτηση για f_{under} >=48.70Hz μπορεί να επιτευχθεί, εναλλακτικά, με εφαρμογή μιας κατάλληλης προστασίας αποκοπής φορτίου UfLSP. Αυξάνοντας προοδευτικά τις παραμέτρους της UfLSP υπολογίζεται ότι, η κατάλληλη προστασία αποκοπής

φορτίου είναι εκείνη η οποία ορίζεται με ρύθμιση των ηλεκτρονόμων στα 48.80Hz και με φορτίο αποκοπής ίσο με 4.3% της ζήτησης. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της προστασίας αυτής σε περίπτωση απώλειας της ULG παρουσιάζονται στο σχήμα 7.16. Αξίζει να σημειωθεί ότι, εφαρμόζοντας την προστασία αυτή και θεωρώντας απώλεια της ULG, το αποτέλεσμα είναι διακοπές πελατών σε 39 από τις συνολικά 200 ώρες της εξεταζόμενης περιόδου (ποσοστό 19.5%).



Σχήμα 7.16. Κατώτατες συχνότητες όταν εφαρμοστεί η προστασία UfLSP (48.80Hz, 4.3% της ζήτησης)

Εάν υιοθετηθεί ένα πολύ αυστηρό κριτήριο (f_{under} >=49.60Hz) τότε, η αναγκαία προστασία αποκοπής φορτίου συνεπάγεται σημαντικές διακοπές πελατών (20% της ζήτησης όταν η συχνότητα πέσει στα 49.60Hz). Αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την εκδήλωση υψηλών συχνοτήτων f_{over} στο σύστημα, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.17. Στην περίπτωση αυτή, ίσως, είναι επιθυμητό να γίνει κάποιος συμβιβασμός ανάμεσα στις επιτρεπόμενες ανώτατες και κατώτατες συχνότητες.



Σχήμα 7.17 Ανώτατες συχνότητες όταν εφαρμοστεί η UfLSP (49.60Hz, 20% της ζήτησης)

Τα σχήματα 7.11 έως 7.16 παρουσιάζουν τις τιμές των f_{residual} και f_{under} σε μια περίοδο 200 ωρών, εξετάζοντας διαφορετικά κριτήρια. Το σχήμα 7.18 παρουσιάζει την μεταβολή του δείκτη I_F για τις τιμές των f_{residual} και f_{under} όταν δεν λαμβάνεται υπόψη το κριτήριο ασφάλειας. Όπως έχει αναφερθεί, ο δείκτης αυτός δίδει την πιθανότητα (%) οι τιμές των f_{residual} και f_{under} να κείνται σε δεδομένο εύρος συχνοτήτων γύρω από ορισμένη συχνότητα. Το εύρος συχνοτήτων το οποίο έχει επιλεγεί είναι ίσο με 0.05Hz. Αξίζει να σημειωθεί ότι, υπάρχουν συχνότητες οι οποίες παρουσιάζουν υψηλές τιμές του δείκτη I_F, δηλαδή έχουν μεγάλη πιθανότητα εμφάνισής τους ενώ άλλες έχουν σχεδόν αμελητέα. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι, η ULG λαμβάνει διακριτές και όχι συνεχείς τιμές των f_{residual} και f_{under}. Ο πιθανοτικός αυτός δείκτης λαμβάνει την υψηλότερη τιμή του (40%) γύρω από τις συχνότητες 49.40Hz και 49.05Hz για τις f_{residual} και f_{under} αντίστοιχα.

Το σχήμα 7.19 παρουσιάζει τις καμπύλες μεταβολής του πιθανοτικού δείκτη I_F για την f_{under} και λαμβάνοντας υπόψη όλα τα κριτήρια που παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Αξίζει να σημειωθεί ότι, όλες οι αντίστοιχες καμπύλες είναι ταυτόσημες για συχνότητες μεγαλύτερες των 48.90Hz ενώ είναι αρκετά διαφορετικές για τις χαμηλότερες συχνότητες.



Σχήμα 7.18 Πιθανότητα εμφάνισης Ι_F των f_{residual} και f_{under} χωρίς να ληφθεί υπόψη το κριτήριο ασφάλειας



Σχήμα 7.19 Πιθανότητα εμφάνισης I_F της f_{under} λαμβάνοντας υπόψη όλα τα εξετασθέντα κριτήρια ασφάλειας

Ο Πίνακας 7.3 παρουσιάζει κάποια στατιστικά στοιχεία των αριθμητικών τιμών που λαμβάνει η funder, λαμβάνοντας υπόψη διάφορα κριτήρια ασφάλειας. Όπως φαίνεται στον Πίνακα αυτόν, η ελάχιστη τιμή και η τυπική απόκλιση των τιμών της funder παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές για τα διάφορα κριτήρια ενώ απεναντίας, η μέγιστη και η μέση τιμή της είναι περίπου ίδιες. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι η διασπορά της στρεφόμενης εφεδρείας επηρεάζει κυρίως τις χαμηλότερες τιμές της f_{under} οι οποίες μπορεί να αυξήσουν το κίνδυνο ασφάλειας του συστήματος αλλά δεν επηρεάζει αισθητά τις υπόλοιπες τιμές που λαμβάνει η funder.

Στατιστικά στοιχεία τιμών της f _{under}								
funder	Χωρίς κριτήριο	Απλό κριτήριο f limit1=49Hz	Διπλό κριτήριο	UfLSP				
Ελάχιστη τιμή	48.31	48.54	48.69	48.70				
Μέγιστη τιμή	49.28	49.28	49.28	49.29				
Μέση τιμή	48.93	48.93	48.95	48.97				
Τυπική απόκλιση	0.21	0.19	0.16	0.18				

Πίνακας 7.3

Κάνοντας χρήση της μεθόδου που αναπτύχθηκε για 3000 συνεχόμενες ώρες ενός ημερολογιακού έτους και εφαρμόζοντας τις σχέσεις 6.5.2 και 6.5.3, υπολογίζεται οτι $r_{13,2}=0.67$ και $r_{14,2}=0.98$. Τα ίδια αριθμητικά αποτελέσματα με ακρίβεια δεύτερου δεκαδικού ψηφίου ευρέθησαν όταν εξετάστηκε το σύνολο των 8760 ωρών του ίδιου ημερολογιακού έτους, γεγονός που αποδεικνύει ότι έχει επιτευχθεί καλή σύγκλιση της αριθμητικής μεθόδου. Τα αποτελέσματα αυτά αποδεικνύουν ότι υπάρχει πολύ υψηλή συσχέτιση (98%) της εφεδρείας ταχείας απόκρισης ER με την εναπομένουσα συχνότητα fresidual και κατά συνέπεια, όταν η ER αυξάνεται, επιτυγχάνεται παράλληλα υψηλότερη τιμή της fresidual. Εν τούτοις, η στρεφόμενη εφεδρεία SR δεν παρουσιάζει αντίστοιχα υψηλή συσχέτιση με την $f_{residual}$ δεδομένου ότι το αντίστοιχο ποσοστό συσχέτισης είναι 67%. Αυτό σημαίνει ότι, μεγαλύτερες τιμές της στρεφόμενης εφεδρείας δεν οδηγούν οπωσδήποτε σε αύξηση της ασφάλειας του συστήματος. Το αποτέλεσμα αυτό συνάδει με την εμπειρία από την γενική διακοπή του συστήματος Κρήτης που έλαβε χώρα στις 25.10.2001, μετά την διαδοχική απώλεια όλων των μονάδων παραγωγής. Αν και υπήρχε αρκετή στρεφόμενη εφεδρεία σε ένα αεριοστρόβιλο ίση με το 12% του φορτίου του συστήματος, δεν αξιοποιήθηκε όλη ώστε να διασωθεί το σύστημα αλλά μόνο ένα ποσοστό της, ίσο με 30%, το οποίο αντιστοιχούσε ακριβώς στην εφεδρείας ταχείας απόκρισης. Κατά συνέπεια, η γενική πεποίθηση ότι, η ασφάλεια του συστήματος βελτιώνεται πάντοτε όταν αυξάνεται η στρεφόμενη εφεδρεία δεν ευσταθεί.

Εάν η εφεδρεία υπερφόρτισης OR δεν λαμβανόταν υπόψη, τότε η εφεδρεία ταχείας απόκρισης θα απαρτιζόταν μόνο από την εφεδρεία πρωτεύουσας ρύθμισης PR και ο συντελεστής $r_{14,2}$ θα υπολογιζόταν 88% αντί για 98%. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει την συνεισφορά της εφεδρείας υπερφόρτισης στην αποκατάσταση της συχνότητας και άρα, στην ασφάλεια του συστήματος και δικαιώνει την αξία που έχει η θεώρησή της.

7.7 Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις

Η ασφάλεια ενός συστήματος χαρακτηρίζει την ικανότητά του να ανταποκρίνεται στις διαταραχές και να επανέρχεται στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Οι διαταραχές χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις διαταραχές ισχύος που προέρχονται από ξαφνική απώλεια παραγωγής ή φορτίου και τις διαταραχές τάσεως που προκύπτουν ως συνέπεια των βραχυκυκλωμάτων. Στην παρούσα εργασία διερευνούνται οι διαταραχές ισχύος. Παραδοσιακά, η ασφάλεια εξετάζεται, αναλύοντας ορισμένες διαταραχές του συστήματος οι οποίες όμως, δεν έχουν αμελητέες πιθανότητες να συμβούν. Η διαταραχή ισχύος η οποία, συνήθως, εξετάζεται είναι η απώλεια της μονάδας με την μεγαλύτερη φόρτιση.

Συχνά στην βιβλιογραφία ερευνάται το ζήτημα της στρεφόμενης εφεδρείας, σε πολλές όμως δημοσιεύσεις δεν γίνεται διάκριση ανάμεσα στην εφεδρεία πρωτεύουσας, δευτερεύουσας και τριτεύουσας ρύθμισης. Σημαντικό ρόλο για την ασφάλεια του συστήματος παίζει ο χρονικός ορίζοντας μέσα στον οποίο η στρεφόμενη εφεδρεία μπορεί να αποδοθεί όταν το σύστημα παρουσιάζει έλλειψη παραγωγής. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται για πρώτη φορά εισαγωγή ενός νέου τύπου στρεφόμενης εφεδρείας, της εφεδρείας υπερφόρτισης των μονάδων παραγωγής.

Η υπερφόρτιση ενός στοιχείου των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αφορά στην δυνατότητά του να αναλάβει φορτίο πάνω από τα ονομαστικά επίπεδα για περιορισμένο χρονικό διάστημα, χωρίς όμως, να μειώνεται ο χρόνος ζωής του στοιχείου. Η γήρανση των διάφορων στοιχείων λόγω φορτίου προέρχεται, κυρίως, ως αποτέλεσμα της θερμικής καταπόνησης και γήρανσης των οργανικών υλικών των μονώσεων. Φόρτιση πάνω από την ονομαστική τιμή αυξάνει την θερμοκρασία τους με εκθετικό τρόπο και επιταχύνει την διαδικασία της γήρανσης. Αξίζει να σημειωθεί

ότι, στο πεδίο της υπερφόρτισης των μετασχηματιστών ισχύος έχει διεξαχθεί σημαντική έρευνα ενώ αντίστοιχη εργασία δεν έχει γίνει σε σχέση με τις μονάδες παραγωγής. Στους μετασχηματιστές υποβιβασμού που ακολουθούν ορισμένη καμπύλη φορτίου και κατά συνέπεια, η θερμοκρασία του θερμού σημείου (hot spot) μπορεί να βρίσκεται κάτω από τα επιτρεπόμενα όρια, είναι δυνατόν ανάλογα και με την θερμοκρασία περιβάλλοντος να αναλάβουν, για περιορισμένο χρόνο, φορτίο πάνω από το ονομαστικό τους χωρίς να παραβιάζονται τα επιτρεπόμενα θερμοκρασιακά όρια.

Οι διεθνείς κανονισμοί παρέχουν, επίσης, δυνατότητες υπερφόρτισης των γεννητριών των μονάδων παραγωγής, αν και τα περιθώρια στην περίπτωση αυτή είναι πιο περιορισμένα λόγω της συνήθους λειτουργίας των μονάδων κοντά στο ονομαστικό φορτίο. Η ανάγκη για πρόβλεψη στρεφόμενης εφεδρείας κατανεμημένη στις μονάδες παραγωγής καθώς και οι χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος που μπορεί να επικρατούν, αυξάνουν ασφαλώς τα παραπάνω περιθώρια. Η ιδέα που αναπτύσσεται στο κεφάλαιο αυτό είναι να αξιοποιηθεί η δυνατότητα υπερφόρτισης των γεννητριών κατά τρόπο επωφελή για την ασφάλεια του συστήματος. Αυτό επιτυγχάνεται με αξιοποίησή της τα πρώτα κρίσιμα δευτερόλεπτα που ακολουθούν κάποια απώλεια μονάδας παραγωγής οπότε λαμβάνει χώρα σοβαρή βύθιση της συχνότητας. Η δυνατότητα αυτή υπερφόρτισης παρέχει ένα νέο τύπο στρεφόμενης εφεδρεία μεφεδρεία υπερφόρτισης μαζί με την εφεδρεία πρωτεύουσας ρύθμισης συνιστούν την εφεδρεία ταχείας απόκρισης η οποία είναι ο κρίσιμος παράγοντας σε γεγονότα βύθισης συχνότητας.

Για την αξιοποίηση της εφεδρείας αυτής, είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί κατάλληλο μοντέλο ρυθμιστή στροφών το οποίο θα επιτρέπει την υπόψη υπερφόρτιση σύμφωνα με τα πρότυπα, με αυτόματη αναπροσαρμογή της θέσης των περιοριστών ισχύος. Οι περιοριστές ισχύος υπολογίζουν κάθε φορά το ύψος της επιτρεπόμενης υπερφόρτισης εξετάζοντας τις επικρατούσες συνθήκες, λαμβάνοντας δηλαδή υπόψη το φορτίο της γεννήτριας λίγο πριν από την υπερφόρτιση καθώς και την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το μοντέλο του βελτιωμένου τύπου ρυθμιστή στροφών και ο αντίστοιχος αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για να υλοποιήσει τις λειτουργίες του συμπεριελήφθησαν στο αναλυτικό μοντέλο απόκρισης συχνότητας απομονωμένου συστήματος.

Σε δύο δημοσιεύσεις στο ΙΕΕΕ παρουσιάζονται μετρήσεις από διαταραχές σε πραγματικό σύστημα όπου φαίνεται ότι η εφεδρεία πρωτεύουσας ρύθμισης είναι μόνο το 40% της υπολογιζόμενης με βάση τους στατισμούς των μονάδων. Αυτό συμβαίνει επειδή ορισμένες μονάδες λειτουργούν υπό σταθερό φορτίο ενώ άλλες οι οποίες λειτουργούν κοντά στο ονομαστικό τους περιορίζονται από τους περιοριστές ισχύος των ρυθμιστών τους. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περαιτέρω ανάλυση του θέματος, κάνοντας χρήση του αναλυτικού μοντέλου δυναμικής απόκρισης συχνότητας. Υπολογίζεται ότι, η πραγματική εφεδρεία ταχείας απόκρισης κυμαίνεται από 25% έως 55% της θεωρητικής (ισοδύναμης μονάδας) ανάλογα με την σύνθεση των μονάδων παραγωγής. Με αξιοποίηση της δυνατότητας υπερφόρτισης, η πραγματική εφεδρεία ταχείας απόκρισης ανέρχεται στο 65%.

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται ένα επί πλέον βήμα σε σχέση με το κριτήριο ασφάλειας και προτείνεται νέο σύνθετο κριτήριο, το οποίο απαρτίζεται από τρία όρια που

αφορούν στην κατώτατη συχνότητα, στην εναπομένουσα συχνότητα και στην ανώτατη συχνότητα κατά την διάρκεια μιας διαταραχής.

Αναπτύχθηκε μέθοδος για την βέλτιστη κατανομή της στρεφόμενης εφεδρείας με στόχο την ικανοποίηση του σύνθετου κριτηρίου ασφάλειας, κατά τον πλέον οικονομικό τρόπο. Η μέθοδος ξεκινά από την οικονομική κατανομή του φορτίου στις λειτουργούσες μονάδες με σεβασμό στους περιορισμούς του συστήματος μεταφοράς. Στην συνέχεια, προχωρεί βήμα προς βήμα σε ανακατανομή του φορτίου στις μονάδες, μεταφέροντας κάθε φορά μικρό ποσοστό της στρεφόμενης εφεδρείας από την πιο αντιοικονομική μονάδα - που διαθέτει σχεδόν ολόκληρη την εφεδρεία λόγω οικονομικής κατανομής - στην αμέσως επόμενη αντιοικονομική μονάδα. Ο στόγος είναι να αποκτήσει και η δεύτερη την μέγιστη εφεδρεία ταχείας απόκρισης. Αυτό σημαίνει ότι, στο πιο σοβαρό ενδεχόμενο απώλειας παραγωγής, η μονάδα θα αναλάβει αβίαστα ολόκληρο το επί πλέον φορτίο το οποίο δύναται να αναλάβει με βάση τον στατισμό της και δεν θα παρεμποδιστεί από τους περιοριστές ισχύος. Για τον λόγο αυτό, σε κάθε στοιχειώδη ανακατανομή φορτίου, εξετάζεται το ενδεχόμενο απώλειας της μονάδας με την μεγαλύτερη φόρτιση και διερευνάται εάν η μονάδα της οποίας η στρεφόμενη εφεδρεία μόλις αυξήθηκε, είναι ελεύθερη να λειτουργήσει χωρίς περιορισμό και άρα, διαθέτει την μέγιστη στρεφόμενη εφεδρεία άμεσης απόκρισης (πρωτεύουσα εφεδρεία + εφεδρεία υπερφόρτισης). Για την αξιοποίηση της δυνατότητας ασφαλούς υπερφόρτισης σύμφωνα με τα πρότυπα, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του βελτιωμένου ρυθμιστή που αναπτύχθηκε προηγουμένως.

Η διαδικασία προχωρεί σταδιακά μέχρις ότου επιτευχθεί η μέγιστη εφεδρεία ταχείας απόκρισης για την υπόψη μονάδα, οπότε ελέγχεται εάν ικανοποιείται το σύνθετο κριτήριο ασφάλειας. Σε αρνητική περίπτωση, η μέθοδος συνεχίζεται, θεωρώντας την αμέσως επόμενη αντιοικονομική μονάδα, αυξάνοντας την εφεδρεία ταχείας απόκρισης και της μονάδας αυτής. Εάν, ολοκληρώνοντας την διαδικασία, το κριτήριο ασφάλειας εξακολουθεί να μην ικανοποιείται, πράγμα που σημαίνει ότι η υπάρχουσα στρεφόμενη εφεδρεία δεν επαρκεί για τις απαιτήσεις της ασφάλειας λειτουργίας, υπάρχουν δύο δυνατότητες οι οποίες εξετάζονται από τη μέθοδο. Είτε ένταξη εφεδρεία είτε εφαρμογή κατάλληλης προστασίας αποκοπής φορτίου, η οποία επίσης υπολογίζεται βήμα προς βήμα ώστε να επιτευχθεί η ελάχιστη απαιτούμενη για την ικανοποίηση του κριτηρίου ασφάλειας.

Η μέθοδος εφαρμόζεται για κάθε ώρα λειτουργίας στο τυπικό σύστημα και παράγονται χρήσιμα διαγράμματα που αφορούν στις κατώτατες και εναπομένουσες συχνότητες σε ενδεχόμενα απώλειας της μεγαλύτερης μονάδας του συστήματος. Τα διαγράμματα αυτά υπολογίζονται για διάφορα κριτήρια ασφάλειας καθώς επίσης χωρίς κανένα κριτήριο και καταγράφεται η εικόνα της ασφάλειας του συστήματος όχι σε συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας του αλλά στην διάρκεια του χρόνου. Αποδεικνύεται η σημαντική βελτίωση της ασφάλειας του συστήματος που επιτυγχάνεται μέσω της βέλτιστης ανακατανομής της εφεδρείας και της αύξησης της εφεδρείας απόκρισης. Επίσης, εξετάζεται η ικανοποίηση δεδομένου κριτηρίου ασφάλειας όχι μέσω της βέλτιστης κατανομής της στρεφόμενης εφεδρείας αλλά εναλλακτικά μέσω της χρησιμοποίησης της προστασίας αποκοπής φορτίου και υπολογίζεται η σοβαρή επιβάρυνση σε διακοπές πελατών στην περίπτωση αυτή.

Η εφαρμογή της εν λόγω μεθόδου παρέχει χρήσιμα στοιχεία για στατιστική επεξεργασία και ανάλυση. Υπολογίζεται ένας χρήσιμος πιθανοτικός δείκτης που παρέχει την πιθανότητα ώστε οι τιμές των κατώτατων, ανώτατων και εναπομενουσών συχνοτήτων να βρίσκονται μέσα σε ορισμένα όρια συχνότητας. Ο δείκτης αυτός προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες για την μελέτη της προστασίας αποκοπής φορτίου καθώς δίδει την πιθανότητα εμφάνισης των διαφόρων υποσυχνοτήτων και υπερσυχνοτήτων σε γεγονότα διαταραχής ισχύος.

Τέλος, επιχειρείται διερεύνηση στο σημαντικό ερώτημα, κατά πόσο δηλαδή η στρεφόμενη εφεδρεία συμβάλλει στην ασφάλεια του συστήματος. Αυξάνοντας την στρεφόμενη, εφεδρεία αυξάνεται οπωσδήποτε και η ασφάλεια; Η προσέγγιση στο πρόβλημα αυτό γίνεται μέσα από στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων εφαρμογής της μεθόδου στο τυπικό σύστημα. Εφόσον η μέθοδος υπολογίζει ένα δείκτη ασφάλειας ο οποίος εκφράζεται από την κατώτατη συχνότητα σε γεγονότα απώλειας της μεγαλύτερης μονάδας, η εφαρμογή της μεθόδου για μέγα πλήθος ωρών λειτουργίας με διαφορετικά φορτία και σύνθεση μονάδων, προσφέρει τα απαραίτητα δεδομένα για στατιστική επεξεργασία. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζονται συντελεστές συσχέτισης της στρεφόμενης εφεδρείας με τον δείκτη ασφάλειας, γρησιμοποιώντας τους συντελεστές μερικής συσχέτισης και εφαρμόζοντας τους κατάλληλους τύπους από την στατιστική. Η εφαρμογή στο τυπικό σύστημα έδειξε ότι, ο συντελεστής συσχέτισης της στρεφόμενης εφεδρείας με την ασφάλεια είναι της τάξης του 70%. Επομένως, αύξηση της στρεφόμενης εφεδρείας δεν συνεπάγεται σε κάθε περίπτωση αύξηση της ασφάλειας λειτουργίας του συστήματος, όπως θεωρείται από την πλειοψηφία των μηχανικών. Απεναντίας, η συσχέτιση της εφεδρείας ταχείας απόκρισης με την ασφάλεια υπολογίζεται στο 98%, ποσοστό που σημαίνει απόλυτα μονότονη σγέση. Εάν παραληφθεί η εφεδρεία υπερφόρτισης, το ποσοστό αυτό μειώνεται στο 88%, γεγονός που αποκαλύπτει την χρησιμότητα και τον θετικό ρόλο της εφεδρείας υπερφόρτισης.



ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ουδέν χρήμα μάτην γίνεται, αλλά πάντα εκ λόγου τε και υπ' ανάγκης (Τίποτα δεν γίνεται τυχαία, αλλά όλα προέρχονται από λογική αιτία και αναγκαιότητα) Λεύκιππος

8.1 Ανακεφαλαίωση της Διατριβής

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελείται από οκτώ κεφάλαια και πραγματεύεται την πιθανοτική ανάλυση της αξιοπιστίας και ασφάλειας λειτουργίας των απομονωμένων συστημάτων ηλεκτρικής. Τα κύρια σημεία της ανά κεφάλαιο είναι τα ακόλουθα :

Στο Πρώτο Κεφάλαιο που αποτελεί την εισαγωγή της διατριβής αναφέρονται οι βασικές αρχές της αξιοπιστίας και ασφάλειας λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Γίνεται διάκριση ανάμεσα στη φάση του σχεδιασμού και στη φάση της εκμετάλλευσης όσον αφορά στη μελέτη και εξασφάλιση των απαραίτητων επιπέδων αξιοπιστίας και ασφάλειας λειτουργίας. Τα βασικά εργαλεία με τα οποία επιτυγχάνεται η αύξηση της ασφάλειας λειτουργίας των απομονωμένων συστημάτων είναι η αυτόματη αποκοπή φορτίου μέσω των ηλεκτρονόμων υποσυχνότητας και η τήρηση ικανής στρεφόμενης εφεδρείας με ταχεία απόκριση. Όμως, μέχρι σήμερα, δεν έχει αναπτυχθεί μια κοινή μέθοδος που να εφαρμόζεται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας όσον αφορά στη μελέτη της προστασίας αποκοπής φορτίου και στη στάθμη της τηρούμενης στρεφόμενης εφεδρείας. Υπάρχουν σημαντικά ερωτήματα, τα οποία δεν επιδέχονται εύκολη απάντηση. Για παράδειγμα, πόσο ποιο ασφαλές γίνεται το σύστημα όταν η προστασία αποκοπής φορτίου γίνεται πιο δραστική και οι διακοπές πελατών περισσότερες; Πως εκφράζεται ποσοτικά με κατάλληλους δείκτες αξιοπιστίας και ασφάλειας λειτουργίας η εφαρμογή μιας συγκεκριμένης στρατηγικής προστασίας αποκοπής φορτίου και η τήρηση ορισμένου ποσού στρεφόμενης εφεδρείας; Η παρούσα διδακτορική διατριβή μελετά τα σημαντικά αυτά θέματα και παρουσιάζει κατάλληλες μεθόδους που αποσκοπούν στην καλύτερη αντιμετώπιση.

Στο Δεύτερο Κεφάλαιο γίνεται σύντομη αναφορά στις αβεβαιότητες που υπάρχουν στην αντιμετώπιση των σημερινών προβλημάτων των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και στην αυξανόμενη αναγκαιότητα χρησιμοποίησης πιθανοτικών μεθόδων για την επίλυσή τους. Η προσέγγιση των πραγματικών καταστάσεων λειτουργίας με καθαρά αιτιοκρατικά κριτήρια οδηγεί αναγκαστικά σε απλουστεύσεις με κίνδυνο να δημιουργείται υποεκτίμηση των συνθηκών που τα συστήματα θα αντιμετωπίσουν κατά τη διάρκεια ζωής τους με συνέπεια την πλημμελή λειτουργία τους και υπερεκτίμηση των κινδύνων με συνέπεια το αυξημένο κόστος κατασκευής και λειτουργίας. Η ποσοτικοποίηση των αβεβαιοτήτων με την εφαρμογή πιθανοτικών μεθόδων οδηγεί σε ένα βέλτιστο σχεδιασμό και καλύτερη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι βασικές αρχές των στοχαστικών μεθόδων ανάλυσης της λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και ειδικότερα της αριθμητικής μεθόδου προσομοίωσης Monte - Carlo.

Στο Τρίτο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές αρχές των θεμάτων που αφορούν στην ευστάθεια με ταξινόμηση σε ευστάθεια γωνίας ρότορα, ευστάθεια τάσεως και ευστάθεια συχνότητας. Λόγω των μικρών ηλεκτρικών αποστάσεων μεταξύ των μονάδων παραγωγής και των μονάδων παραγωγής με τους ζυγούς φορτίου στα απομονωμένα ηλεκτρικά συστήματα, η ευστάθεια γωνίας και τάσεως, συνήθως, συνιστούν μικρότερους κινδύνους για την ασφάλεια λειτουργίας των συστημάτων σε σύγκριση με την ευστάθεια συχνότητας. Η τελευταία αποτελεί σοβαρή απειλή, ιδιαίτερα λόγω της έλλειψης υποστήριξης από γειτονικά συστήματα αλλά και του μικρού συνήθως αριθμού των μονάδων παραγωγής που ευρίσκονται σε κατάσταση λειτουργίας. Η απώλεια μιας μονάδας, συχνά προκαλεί απώλεια σημαντικού ποσοστού της συνολικής παραγωγής του απομονωμένου συστήματος. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το μοντέλο απόκρισης συχνότητας μιας μονάδας παραγωγής σε γεγονότα αιφνίδιας μεταβολής του φορτίου της, το οποίο αποτελεί το υπόβαθρο στο οποίο στηρίζεται η παρούσα διατριβή. Το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί με κάποια προσέγγιση για συστήματα με περισσότερες από μια ομοειδείς μονάδες παραγωγής, θεωρώντας την ισοδύναμη μονάδα του συστήματος.

Στο Τέταρτο Κεφάλαιο παρουσιάζεται μέθοδος για την αριθμητική επίλυση του μοντέλου απόκρισης συχνότητας της ισοδύναμης μονάδας ενός απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η μέθοδος επεκτείνεται προσομοιώνοντας τη λειτουργία των ηλεκτρονόμων υποσυχνότητας της προστασίας αποκοπής φορτίου. Με στόχο την ποσοτικοποίηση του επιπέδου ασφάλειας λειτουργίας του συστήματος, ορίζεται ένα πλήρες σύνολο πιθανοτικών δεικτών των βασικών μεγεθών απόκρισης συχνότητας, όπως είναι η αναμενόμενη κατώτατη συχνότητα μετά από απώλεια παραγωγής, ο αναμενόμενος κρίσιμος χρόνος για τους στροβίλους, κλπ. Επειδή η αύξηση του επιπέδου ασφάλειας λειτουργίας μέσω της αποκοπής φορτίου προκαλεί τη μείωση της ποιότητας και αξιοπιστίας τροφοδότησης των πελατών, ορίζονται πιθανοτικοί δείκτες αποκοπής φορτίου, όπως είναι η αναμενόμενη διάρκεια διακοπής καταναλωτών, η αναμενόμενη ετήσια μη διαθέσιμη ενέργεια λόγω λειτουργίας της προστασίας, κλπ. Παρουσιάζεται μια αριθμητική μέθοδος προσομοίωσης της λειτουργίας του συστήματος που αναπτύχθηκε με χρησιμοποίηση της ακολουθιακής μεθόδου Monte - Carlo. Με βάση την μέθοδο αυτή παράγονται τυχαίοι χρόνοι βλαβών και επισκευών των μονάδων παραγωγής και προσομοιώνεται η λειτουργία του συστήματος σε τρία επίπεδα που εξελίσσονται σε διαφορετικούς χρονικούς
ορίζοντες. Στο πρώτο επίπεδο γίνεται προσομοίωση της ωριαίας λειτουργίας του συστήματος, όπως αυτή πραγματοποιείται από το Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας. Η προσομοίωση αυτή περιλαμβάνει την ένταξη και από-ένταξη των διαθέσιμων μονάδων παραγωγής για την ικανοποίηση της ζήτησης φορτίου, την οικονομική κατανομή φορτίου ανάμεσα στις μονάδες, την ικανοποίηση των τεχνικών ορίων λειτουργίας τους και την τήρηση της απαιτούμενης στάθμης στρεφόμενης εφεδρείας. Στο δεύτερο επίπεδο παράγονται τυχαία γεγονότα βλαβών των μονάδων παραγωγής τα οποία ανταποκρίνονται σε δεδομένους ρυθμούς βλαβών. Σε κάθε γεγονός, υπολογίζεται η καμπύλη βύθισης συχνότητας του συστήματος μέχρι την ισορρόπησή της στην τελική (εναπομένουσα) τιμή λόγω λειτουργίας της πρωτεύουσας ρύθμισης των μονάδων. Παράλληλα, υπολογίζεται η αποκοπή φορτίου από την ενεργοποίηση των ηλεκτρονόμων υποσυχνότητας. Στο τρίτο επίπεδο προσομοιώνονται οι ενέργειες που αφορούν στην επαναφορά της συχνότητας στα ονομαστικά επίπεδα και στην αποκατάσταση των διακοπών πελατών που προκλήθηκαν από τη λειτουργία της προστασίας αποκοπής φορτίου μετά από κάθε γεγονός απώλειας παραγωγής. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της δευτερεύουσας ρύθμισης και, πιθανόν, της έναρξης μονάδων παραγωγής μικρού χρόνου εκκίνησης. Η προσομοίωση για μεγάλο αριθμό ετών λειτουργίας του συστήματος υπολογίζει τους σχετικούς πιθανοτικούς δείκτες οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων κάθε στρατηγικής αποκοπής φορτίου και την επιλογή εκείνης που εξασφαλίζει αποδεκτές τιμές των πιθανοτικών δεικτών. Επίσης, αποδεικνύεται ότι η χρησιμοποίηση του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας αντί της στιγμιαίας τιμής της συχνότητας, έχει καλύτερα αποτελέσματα στην εφαρμογή της προστασίας αποκοπής φορτίου.

Στο Πέμπτο Κεφάλαιο διατυπώνονται και αναλύονται δύο αντίστροφα προβλήματα τα οποία ευρίσκονται εγγύτερα στα πρακτικά θέματα της λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Με δεδομένους, επιθυμητούς δείκτες για την απόκριση συχνότητας (ασφάλειας) ή για την αποκοπή φορτίου (αξιοπιστία), ζητείται να προσδιοριστεί η κατάλληλη στρατηγική η οποία να ικανοποιεί τους δείκτες αυτούς. Η επίλυση των δύο αυτών προβλημάτων γίνεται με τη χρησιμοποίηση μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης. Για το σκοπό αυτό, αναπτύσσεται γεννήτρια προτύπων μέσω της οποίας δημιουργούνται διανύσματα τυχαίων στρατηγικών αποκοπής φορτίου για κάθε μια από τις οποίες εφαρμόζεται η αναπτυχθείσα μέθοδος Monte - Carlo και υπολογίζονται τα αντίστοιχα διανύσματα πιθανοτικών δεικτών. Κάθε μια στρατηγική μαζί με τα αντίστοιχα διανύσματα δεικτών συγκροτεί ένα πρότυπο. Τα πρότυπα αυτά χρησιμεύουν για την εκπαίδευση δύο πολυ-επίπεδων, τεχνητών νευρωνικών δικτύων με ψηφιακές εξόδους. Κάθε νευρωνικό δίκτυο έχει ως είσοδο τους δείκτες απόκρισης της συχνότητας ή τους δείκτες αποκοπής φορτίου και ως έξοδο ψηφιακές κλάσεις που αντιστοιχούν σε προκαθορισμένες, γνωστές στρατηγικές. Κατά την αξιοποίηση κάθε νευρωνικού δικτύου επιλέγεται ως είσοδος ένα σύνολο πιθανοτικών δεικτών οι οποίοι λαμβάνουν επιθυμητές τιμές και αποτελούν τα κριτήρια που πρέπει να ικανοποιεί η ζητούμενη στρατηγική. Λαμβανομένου υπόψη ότι, οι δείκτες απόκρισης συχνότητας και οι δείκτες αποκοπής φορτίου είναι σε κάποιο βαθμό αλληλο-συσχετιζόμενοι, οι επιλεγόμενοι δείκτες δεν μπορούν να λάβουν οποιεσδήποτε, αυθαίρετες τιμές. Για το λόγο αυτό, έγινε στατιστική επεξεργασία των προτύπων και προσδιορίσθηκαν οι αλληλο-συσχετίσεις των πιθανοτικών δεικτών. Με βάση την ανάλυση αυτή γίνεται έλεγχος κάθε νέου συνόλου κριτηρίων που απαρτίζεται από επιθυμητούς δείκτες απόκρισης συχνότητας ή αποκοπής φορτίου, έτσι ώστε το σύνολο αυτό των πιθανοτικών δεικτών να αποτελεί ένα αποδεκτό σύνολο κριτηρίων.

Στο Έκτο Κεφάλαιο γίνεται διάκριση ανάμεσα στην ελάχιστη απαιτούμενη στάθμη στρεφόμενης εφεδρείας και στη στιγμιαία τιμή της. Παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή της στιγμιαίας στρεφόμενης εφεδρείας ενός συστήματος, όπου φαίνεται ότι αποτελεί μια πριονωτή συνάρτηση του χρόνου. Αποδεικνύεται ότι, ανάλογα με το μέγεθος των μονάδων παραγωγής, η στιγμιαία στρεφόμενη εφεδρεία μπορεί, σε κάποιες χρονικές περιόδους, να είναι πολλαπλάσια της ελάχιστης απαιτούμενης χωρίς να υπάρχει δυνατότητα μείωσής της διότι τότε οδηγείται κάτω από τα ελάχιστα επιτρεπόμενα επίπεδα. Το πρόβλημα αυτό είναι έντονο στα μικρά απομονωμένα συστήματα και οδηγεί σε αντιοικονομική λειτουργία τους. Αναπτύσσεται το αναλυτικό μοντέλο απόκρισης συχνότητας και διερευνάται η επίδραση των διαφόρων τεχνικών παραμέτρων (αδράνεια μονάδων, στατισμοί, κλπ) ή λειτουργικών παραμέτρων (ελάχιστη στρεφόμενη εφεδρεία, ρύθμιση περιοριστών ισχύος κλπ) στην ασφάλεια λειτουργίας του συστήματος, όπως αυτή προσδιορίζεται από συγκεκριμένο κριτήριο συχνότητας. Εξετάζεται η δυνατότητα του συστήματος για αξιοποίηση της διαθέσιμης στρεφόμενης εφεδρείας σε βυθίσεις συχνότητας και οι επιπτώσεις της κατανομής της εφεδρείας σε περισσότερες από μια μονάδες παραγωγής. Τέλος, γίνεται διάκριση ανάμεσα στην βραχυπρόθεσμη και στη μακροπρόθεσμη ασφάλεια λειτουργίας όσον αφορά στα γεγονότα απώλειας παραγωγής και παρουσιάζονται οι κυριότεροι μηχανισμοί σε κάθε χρονικό στάδιο.

Στο Έβδομο Κεφάλαιο εξετάζονται και ερευνώνται η εφεδρεία ταχείας απόκρισης ενός απομονωμένου συστήματος και η συμβολή της υπερφόρτισης, βραχείας διάρκειας, των μονάδων στην ασφάλεια λειτουργίας του συστήματος. Σε δύο πρόσφατες δημοσιεύσεις στο IEEE Trans. on Power Systems, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα έρευνας, βάσει της οποίας η διαθέσιμη εφεδρεία, ταχείας απόκρισης που, στην πραγματικότητα, υφίσταται είναι μόνο το 40% εκείνης που υπολογίζεται με βάση των στατισμό των μονάδων. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από καταγραφές, στην διάρκεια διαταραγών ενός πραγματικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει για τους παρακάτω δύο λόγους. Πρώτον, οι σύγχρονοι ρυθμιστές στροφών έχουν δυνατότητα ρύθμισης είτε σε «load mode» είτε σε «frequency mode» με αποτέλεσμα όταν ορισμένες μονάδες βάσης λειτουργούν σε «load mode» να είναι αναίσθητες στις μεταβολές της συχνότητας. Δεύτερον, λόγω της ύπαρξης των περιοριστών ισχύος των ρυθμιστών στροφών, οι μονάδες που λειτουργούν κοντά στην ονομαστική τους φόρτισης δεν έχουν την δυνατότητα ανάληψης φορτίου πάνω από το όριο των περιοριστών, άσχετα αν αυτό προβλέπεται με βάση τον στατισμό τους. Σύμφωνα με το αναλυτικό μοντέλο απόκρισης συχνότητας, το οποίο λαμβάνει υπόψη του τα χαρακτηριστικά των σύγχρονων ρυθμιστών στροφών, όχι μόνο επιβεβαιώνονται τα συμπεράσματα των δημοσιεύσεων για δραστικό περιορισμό της εφεδρείας ταχείας απόκρισης, αλλά αποδεικνύεται επί πλέον ότι, αυτή δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από την σύνθεση των μονάδων και τα όρια ρύθμισης των περιοριστών ισχύος. Πέραν τούτου αναπτύσσεται ένα βελτιωμένο μοντέλο ρυθμιστή στροφών το οποίο επιτρέπει τη βραχύχρονη υπερφόρτιση των μονάδων, σύμφωνα με τους διεθνείς κανονισμούς. Εισάγεται ένα νέο σύνθετο κριτήριο ασφάλειας, το οποίο απαρτίζεται από τρία όρια που αφορούν στην κατώτατη συχνότητα, στην εναπομένουσα συχνότητα και στην ανώτατη συχνότητα κατά τη διάρκεια μιας διαταραχής. Αναπτύσσεται μια αριθμητική μέθοδος για την βέλτιστη κατανομή της στρεφόμενης εφεδρείας με στόχο την ικανοποίηση του σύνθετου κριτηρίου ασφάλειας κατά τον πλέον οικονομικό τρόπο. Αποδεικνύεται ότι μέρος μόνο της στρεφόμενης εφεδρείας, ταχείας απόκρισης, όπως αυτή υπολογίζεται από το μοντέλο της ισοδύναμης μονάδας, υφίσταται στην πραγματικότητα. Τέλος, η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων που ευρέθησαν από τη επαναληπτική εφαρμογή της αριθμητικής μεθόδου, αποδεικνύει ότι η συσχέτιση της στρεφόμενης εφεδρείας με τα κριτήρια ασφάλειας λειτουργίας είναι περίπου ίση με 70% που πρακτικά σημαίνει ότι η αύξηση της στρεφόμενης εφεδρείας δεν οδηγεί αναγκαστικά στην αύξηση της ασφάλειας λειτουργίας του συστήματος.

Στο **Όγδοο** Κεφάλαιο παρατίθενται τα γενικά συμπεράσματα της διδακτορικής διατριβής, η συμβολή της στην έρευνα και προτάσεις για την επέκτασή της.

8.2 Συμβολή της Διατριβής

Η ορθολογική εκμετάλλευση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σημαίνει τη συνεχή λειτουργία του με γνώμονα τη μείωση του λειτουργικού κόστους και τη διατήρηση ορισμένης στάθμης ασφάλειας. Τα κύρια προβλήματα που ζητούν απάντηση αφορούν στην επιλογή των κατάλληλων μονάδων παραγωγής προς ένταξη, στην οικονομική κατανομή του φορτίου στις μονάδες και στον καθορισμό της τηρούμενης στάθμης στρεφόμενης εφεδρείας. Η λειτουργία του συστήματος είναι μια συνεχής διαδικασία που σημαίνει ότι τα προβλήματα αυτά τίθενται συνεχώς με διαφορετικά δεδομένα και η επίλυσή τους πρέπει να είναι άμεση.

Η ανάλυση της συμπεριφοράς ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στη μη μόνιμη κατάσταση και ο βέλτιστος σχεδιασμός των προστασιών του, αποτελούν επίσης βασικό μέλημα της λειτουργίας. Μία ιδιαίτερη προστασία που παίζει πρωταρχικό ρόλο στην ασφάλεια και αξιοπιστία λειτουργίας καθώς και στην ποιότητα της παρεχομένης ισχύος, είναι η προστασία αποκοπής φορτίου, η οποία υλοποιείται με τη χρήση των ηλεκτρονόμων υποσυχνότητας. Η προστασία αυτή, σε αντίθεση με τις λοιπές προστασίες, αποτελεί προστασία ολοκλήρου του συστήματος και όχι κάποιου μεμονωμένου στοιχείου του.

Μετά από την αλματώδη εξέλιξη και καθιέρωση της ψηφιακής τεχνολογίας, οι παλαιοί ηλεκτρομηχανικοί ηλεκτρονόμοι των διατάξεων προστασίας παραχώρησαν την θέση τους στους σύγχρονους ψηφιακούς, οι οποίοι είναι πιο αξιόπιστοι, δεν χρειάζονται συντήρηση, έχουν περισσότερες δυνατότητες επεξεργασίας των δεδομένων, κρατούν αρχείο καταγραφών, στοιχίζουν φθηνότερα και απαιτούν πολύ μικρότερο χώρο εγκατάστασης. Όπως είναι φυσικό, ο εκσυγχρονισμός αυτός εφαρμόστηκε και στο πεδίο των ηλεκτρονόμων υποσυχνότητας με κύρια βελτίωση τη δυνατότητα καταμέτρησης όχι μόνο της στιγμιαίας τιμής της συχνότητας αλλά και αποτελεσματικότερη υλοποίηση της προστασίας αποκοπής φορτίου.

Όμως, το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας που αφορά στο πεδίο των ηλεκτρονόμων υποσυχνότητας, κατά τα τελευταία χρόνια, εστιάσθηκε κυρίως στη βελτίωση του υλικού. Στόχος είναι η επίτευξη ταχύτατης και ακριβούς ανίχνευσης των κρίσιμων

συνθηκών ώστε η ενεργοποίηση των ηλεκτρονόμων να πραγματοποιείται σε ελάχιστο χρόνο, ακόμη και σε επίπεδο ημιπεριόδου. Γίνεται προσπάθεια αντιμετώπισης των αρμονικών και υψίσυχνων μεταβατικών φαινομένων που ακολουθούν μια διαταραχή ώστε να αποκλείεται η πιθανότητα λάθους μέτρησης της συχνότητας, η οποία γίνεται με τον εντοπισμό των σημείων μηδενισμού της τάσης.

Απεναντίας, σε επίπεδο σχεδιασμού και ρυθμίσεων της προστασίας αυτής δεν υπάρχει αντίστοιχη πρόοδος. Δεν έχει αναπτυχθεί κοινή μέθοδος για τον καθορισμό των επιπέδων υποσυχνότητας που θα πραγματοποιείται η περικοπή φορτίου και του ύψους των αντίστοιχων διακοπών. Σε κάθε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ακολουθείται μία ιδιαίτερη στρατηγική, η οποία προσαρμόζεται και αναπροσαρμόζεται με εμπειρικό τρόπο στο ίδιο το σύστημα που συνεχώς μεταβάλλεται. Όμως, ποιες είναι οι επιπτώσεις από την εφαρμογή κάθε μιας στρατηγικής για την ασφάλεια και την αξιοπιστία λειτουργίας του συστήματος; Πόσο πιο ασφαλές γίνεται το σύστημα όταν οι ρυθμίσεις γίνονται πιο ευαίσθητες και οι διακοπές πελατών περισσότερες; Ποια είναι η βέλτιστη λύση; Τα ερωτήματα αυτά έχουν απαντηθεί μάλλον με εμπειρικό και απολογιστικό τρόπο.

Επίσης, στο ζήτημα της τηρούμενης στάθμης στρεφόμενης εφεδρείας, δεν υπάρχει μια κοινή πολιτική που να εφαρμόζεται σε όλα τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αρκετά από αυτά διατηρείται στάθμη εφεδρείας ίση με την παραγόμενη ισχύ της μονάδας με τη μεγαλύτερη φόρτιση, σε άλλα η στάθμη αυτή είναι ίση με το 10% της ζήτησης φορτίου ενώ σε πολλά συστήματα διατηρείται η ελάχιστη δυνατή στάθμη εφεδρείας για οικονομικούς λόγους. Όμως, τι σημαίνει ποσοτικά, εκπεφρασμένο με κατάλληλους πιθανοτικούς δείκτες αξιοπιστίας και ασφάλειας κάθε μία από τις εναλλακτικές πολιτικές;

Στα παραπάνω, εύλογα ερωτήματα που απασχολούν τους λειτουργούς των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, προσπαθεί να ανταποκριθεί η παρούσα διδακτορική διατριβή. Πιο συγκεκριμένα, η διατριβή πραγματεύεται το ζήτημα της ασφάλειας και αξιοπιστίας λειτουργίας των απομονωμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας όσον αφορά στα ενδεχόμενα απώλειας μονάδων παραγωγής τους. Για το σκοπό αυτό, εφαρμόζεται η πιθανοτική ανάλυση της λειτουργίας των ηλεκτρικών συστημάτων, τη πούται από την αξιοπιστία λειτουργίας των ηλεκτρικών συστημάτων, τη λειτουργία των Κέντρων Ελέγχου Ενέργειας, τον αυτόματο έλεγχο παραγωγής, την ποιότητα ηλεκτρικής ισχύος, και τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.

Τα κυριότερα, πρωτότυπα στοιχεία της διατριβής είναι τα ακόλουθα:

- Ορίζονται μερικά βασικά μεγέθη επί της καμπύλης απόκρισης συχνότητας σε γεγονότα απώλειας παραγωγής, όπως είναι η ανώτατη, η κατώτατη και η εναπομένουσα συχνότητα καθώς επίσης, οι κρίσιμοι χρόνοι για τη διάρκεια ζωής του στροβίλου και την ασφάλεια λειτουργίας του συστήματος. Τα αριθμητικά αυτά μεγέθη εμπεριέχουν τις βασικότερες πληροφορίες της καμπύλης απόκρισης και παρέχουν δυνατότητα επεξεργασίας, γεγονός που δεν είναι εφικτό στα πλαίσια της καμπύλης.
- Προτείνεται ένα πλήρες σύνολο πιθανοτικών δεικτών που αξιοποιούν τα παραπάνω μεγέθη και χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, στους δείκτες

αξιοπιστίας παραγωγής, στους δείκτες απόκρισης συχνότητας και στους δείκτες αποκοπής φορτίου. Οι τελευταίες δύο κατηγορίες δεικτών χαρακτηρίζουν αντίστοιχα την ασφάλεια λειτουργίας του συστήματος και την αξιοπιστία τροφοδότησης των πελατών.

- Επιλύεται με αριθμητική μέθοδο το μοντέλο απόκρισης συχνότητας απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σε γεγονότα απώλειας παραγωγής. Η μέθοδος επεκτείνεται ώστε να συμπεριλάβει και την λειτουργία των ηλεκτρονόμων υποσυχνότητας. Προσομοιώνονται όλες οι δυνατότητες των σύγχρονων ηλεκτρονόμων με τα διάφορα επίπεδα υποσυχνότητας, τους ρυθμούς μεταβολής της συχνότητας και τις επιθυμητές χρονικές καθυστερήσεις.
- Αποδεικνύεται ότι η λειτουργία των ηλεκτρονόμων με αξιοποίηση του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας, επιτυγχάνει πολύ καλύτερη συμπεριφορά και αντίδραση του συστήματος στις διαταραχές, αυξάνοντας τα επίπεδα ασφάλειας λειτουργίας.
- Αναπτύχθηκε μια νέα μέθοδος, που στηρίζεται στη ακολουθιακή μέθοδο προσομοίωσης Monte - Carlo, για τη μελέτη της προστασίας αποκοπής φορτίου η οποία, σε αντίθεση με την υπάρχουσα εμπειρική μέθοδο, βασίζεται στην προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος για μεγάλη χρονική περίοδο. Η μέθοδος παράγει τυχαίους χρόνους βλαβών και επισκευών των μονάδων παραγωγής και προσομοιώνει τη λειτουργία του συστήματος σε τρία επίπεδα. Τα επίπεδα αυτά αφορούν, στη λειτουργία του Κέντρου Ελέγχου Ενέργειας (ένταξη μονάδων παραγωγής - κατανομή φορτίου), στην πρωτεύουσα ρύθμιση των μονάδων παραγωγής και στη λειτουργία της προστασίας αποκοπής φορτίου μέσω των ηλεκτρονόμων υποσυχνότητας και τέλος, στη δευτερεύουσα ρύθμιση και αξιοποίηση της στρεφόμενης εφεδρείας. Η αναπτυγθείσα μέθοδος ενσωματώνει, ως διαδικασία, την προαναφερόμενη αριθμητική μέθοδο για τον υπολογισμό της απόκρισης συχνότητας. Παρέχει σημαντικές δυνατότητες για υπολογισμό πλήθους πιθανοτικών δεικτών και μεγεθών για τα γεγονότα που προκύπτουν κατά τη λειτουργία του συστήματος.
- Με την εφαρμογή της αναπτυχθείσας μεθόδου υπολογίζονται οι πιθανοτικοί δείκτες που ποσοτικοποιούν αφενός, το επίπεδο ασφάλειας όσον αφορά στα γεγονότα απώλειας παραγωγής και αφετέρου, τις επιπτώσεις σε αναγκαίες διακοπές πελατών προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή στάθμη ασφάλειας. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να επιλεχθεί ορισμένη στρατηγική αποκοπής φορτίου από ένα σύνολο εναλλακτικών λύσεων. Η μέθοδος λειτουργεί με τη διαδικασία δοκιμής και απόρριψης.
- Η μέθοδος παράγει, επίσης, χρήσιμα ιστογράμματα που ποσοτικοποιούν και απαντούν με πιθανοτικά μεγέθη σε πολύ σημαντικά ζητήματα. Προσδιορίζονται οι ώρες της ημέρας που οι κίνδυνοι ασφάλειας του συστήματος σε ενδεχόμενα απώλειας μονάδων παραγωγής, είναι αυξημένοι. Υπολογίζονται οι πιθανότητες εμφάνισης των διαφόρων τιμών του φορτίου αποκοπής από την λειτουργία της προστασίας υποσυχνότητας.

Προσδιορίζεται η πιο πιθανή στάθμη του φορτίου αποκοπής. Υπολογίζονται οι συχνότητες εμφάνισης των χρόνων διάρκειας των διακοπών πελατών.

- Διερευνάται η δυνατότητα και η ταχύτητα σύγκλισης της μεθόδου και υπολογίζονται τα σχετικά σφάλματα όλων των πιθανοτικών δεικτών σε σχέση με τα χρόνια προσομοίωσης. Η ταχύτητα σύγκλισης είναι διαφορετική για κάθε πιθανοτικό δείκτη και εξαρτάται από την συχνότητα εμφάνισης του γεγονότος το οποίο εξετάζεται. Επίσης, διαπιστώνονται ενδιαφέρουσες συντονισμένες ταλαντώσεις του μεγέθους σφαλμάτων των δεικτών στην πορεία σύγκλισης προς τις τελικές τους τιμές.
- Στη συνέχεια γίνεται διατύπωση του προβλήματος κατά αντίστροφο τρόπο ο οποίος είναι πιο πρόσφορος για τις ανάγκες της πράξης. Δηλαδή, με δεδομένες τιμές, των επιθυμητών δεικτών που αφορούν είτε στην ασφάλεια λειτουργίας (απόκριση συχνότητας) είτε στην ποιότητα ισχύος (διακοπές πελατών), ποια είναι η κατάλληλη στρατηγική αποκοπής φορτίου που ικανοποιεί τις τιμές των δεικτών αυτών; Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν δύο πολυεπίπεδα, τεχνητά νευρωνικά δίκτυα με ψηφιακές εξόδους τα οποία εκπαιδεύονται από ένα σύνολο προτύπων. Τα πρότυπα αυτά παράγονται από κατάλληλη γεννήτρια προτύπων η οποία δημιουργεί τυχαίες στρατηγικές, για κάθε μια από τις οποίες εφαρμόζεται η προηγούμενη μέθοδος Monte Carlo.
- Γίνεται κατάλληλη στατιστική επεξεργασία των προτύπων και αποκαλύπτονται οι συσχετίσεις των διαφόρων πιθανοτικών δεικτών. Αναπτύσσεται μέθοδος ελέγχου τυχόντος συνόλου επιθυμητών δεικτών έτσι ώστε να αποτελεί αποδεκτό και εφαρμόσιμο σύνολο, ούτως ώστε η τιμή που λαμβάνει ο ένας δείκτης να μην αποκλείει την τιμή κάποιου άλλου.
- Αναπτύχθηκε αναλυτικό μοντέλο προσομοίωσης της λειτουργίας του συστήματος το οποίο δεν βασίζεται στην ισοδύναμη μονάδα αλλά συμπεριλαμβάνει κάθε μονάδα με τα δικά της χαρακτηριστικά, με στόχο την διερεύνηση της μεταβολής των παραμέτρων του συστήματος. Με τον τρόπο αυτό, υπολογίζονται οι σχέσεις αλληλεξάρτησης των διαφόρων τεχνικών ή λειτουργικών παραμέτρων (αδράνεια μονάδων, στατισμοί, ελάχιστη στρεφόμενη εφεδρεία, ρύθμιση περιοριστών ισχύος κλπ) και υπολογίζεται η επίδρασή τους επί της ασφάλειας λειτουργίας. Μεταβάλλοντας, για παράδειγμα, τη ρύθμιση των περιοριστών ισχύος των ρυθμιστών στροφών, πόσο επηρεάζεται η ασφάλεια με βάση κάποιο κριτήριο συχνότητας; Επίσης, διερευνώνται οι επιπτώσεις στην ασφάλεια από την κατανομή της στρεφόμενης εφεδρείας σε περισσότερες της μιας μονάδες παραγωγής παραγωγής.
- Γίνεται διάκριση ανάμεσα στην ελάχιστη στάθμη στρεφόμενης εφεδρείας και στη στιγμιαία τιμή της. Διερευνάται ο τρόπος μεταβολής της στιγμιαίας εφεδρείας με δεδομένη την ελάχιστη στάθμη, όπου αποδεικνύεται ότι αποτελεί μια πριονωτή συνάρτηση ως προς τον χρόνο με ανελαστικές βηματικές μεταβολές. Το αποτέλεσμα είναι η στιγμιαία εφεδρεία, πολλές φορές, να είναι πολλαπλάσια της ελάχιστης επιτρεπόμενης και δεν υπάρχει δυνατότητα μείωσής της χωρίς να παραβιαστεί η ελάχιστη στάθμη. Το

γεγονός αυτό συμβάλει καθοριστικά στο αυξημένο κόστος λειτουργίας των μικρών απομονωμένων συστημάτων.

- Προσομοιώνονται τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των σύγχρονων ρυθμιστών στροφών (limiters, load-frequency mode operation, change-over) τα οποία ενσωματώνονται στο αναλυτικό μοντέλο απόκρισης συχνότητας. Η προσομοίωση αυτή, όχι μόνο επιβεβαιώνει τα συμπεράσματα έρευνας με μετρήσεις σε πραγματικό σύστημα, όπου αποδεικνύεται ο δραστικός περιορισμός, στη πράξη, της εφεδρείας ταχείας απόκρισης αλλά προχωρεί ένα βήμα περισσότερο. Υπολογίζονται οι μεταβολές της πραγματικής εφεδρείας ταχείας απόκρισης ανάλογα με την σύνθεση των μονάδων παραγωγής και τα όρια ρύθμισης των περιοριστών ισχύος.
- Η διατριβή εξετάζει, το ζήτημα υπερφόρτισης, μικρής διάρκειας, των γεννητριών σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα και εισάγει ένα νέο τύπο στρεφόμενης εφεδρείας που καλείται εφεδρεία υπερφόρτισης. Όπως αποδεικνύεται, η υπερφόρτιση αυτή, την κρίσιμη στιγμή βύθισης της συγνότητας, προσφέρει σημαντική βελτίωση στη συμπεριφορά και στην ασφάλεια λειτουργίας του συστήματος. Με τον τρόπο αυτό συσγετίζεται, για πρώτη φορά, η δυνατότητα υπερφόρτισης των γεννητριών με το επίπεδο ασφάλειας. Για την υλοποίηση της δυνατότητας αυτής, αναπτύσσεται ένας βελτιωμένος τύπος ουθμιστή στροφών uе περιοριστές ισγύος μεταβαλλόμενων ορίων που επιτρέπουν κατάλληλη υπερφόρτιση των μονάδων παραγωγής σε γεγονότα βύθισης συχνότητας.
- Προτείνεται νέο σύνθετο κριτήριο ασφάλειας αποτελούμενο από τρία όρια που αντιστοιχούν στην κατώτατη, στην ανώτατη και στην εναπομένουσα συχνότητα οι οποίες εμφανίζονται μετά από το μείζον γεγονός, δηλαδή την απώλεια της εκάστοτε μονάδας με την υψηλότερη φόρτιση.
- Επίσης, αναπτύχθηκε μια νέα αριθμητική μέθοδος για τη βέλτιστη κατανομή της στρεφόμενης εφεδρείας ανάμεσα στις μονάδες παραγωγής, με στόχο την ικανοποίηση δεδομένου κριτηρίου ασφάλειας κατά τον πλέον οικονομικό τρόπο. Η μέθοδος προχωρεί βήμα προς βήμα σε ανακατανομή της στρεφόμενης εφεδρείας έτσι ώστε να αυξάνεται σταδιακά η εφεδρεία ταχείας απόκρισης κάθε μονάδας και κατά συνέπεια, η συνολική ταχεία εφεδρεία η οποία θα προσφέρει στήριγμα στο σύστημα σε ενδεχόμενα απώλειας παραγωγής.
- Με επαναληπτική εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου σε διαδοχικές ώρες λειτουργίας του συστήματος, υπολογίζεται η ασφάλεια του συστήματος στην διάρκεια του χρόνου, όπως αυτή εκφράζεται από τα προκαθορισμένα κριτήρια. Η μέθοδος βέλτιστης κατανομής της στρεφόμενης εφεδρείας συνδυάζεται με εφαρμογή κατάλληλης προστασίας αποκοπής φορτίου ή με αύξηση της εφεδρείας, όποτε αυτό κρίνεται αναγκαίο.
- Η εφαρμογή της μεθόδου για μεγάλο αριθμό ωρών λειτουργίας, παράγει ικανό αριθμό αποτελεσμάτων τα οποία, μετά από κατάλληλη στατιστική επεξεργασία, προσφέρουν σημαντικές πληροφορίες. Υπολογίζεται πιθανοτικός δείκτης που προσδιορίζει την πιθανότητα εμφάνισης διαφόρων

τιμών υποσυχνοτήτων στο σύστημα σε ενδεχόμενα βύθισης συχνότητας. Ο δείκτης αυτός είναι εξαιρετικά χρήσιμος στη διερεύνηση, σε βάθος, της προστασίας αποκοπής φορτίου δεδομένου ότι μικρές μεταβολές των ορίων υποσυχνότας των ηλεκτρονόμων, μπορεί να έχουν ως συνέπεια σημαντικές αλλαγές στις διακοπές πελατών εάν οι μεταβολές αυτές συμπίπτουν γύρω από υποσυχνότητες με μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης.

Τέλος από την στατιστική ανάλυση υπολογίζεται ο βαθμός συσχέτισης της στρεφόμενης εφεδρείας και της εφεδρείας ταχείας απόκρισης με τα κριτήρια ασφάλειας. Ευρίσκεται ότι η συσχέτιση της στρεφόμενης εφεδρείας με τα κριτήρια ασφάλειας δεν είναι ισχυρή (της τάξης του 70%) και κατά συνέπεια, κάθε αύξηση της στρεφόμενης εφεδρείας δεν συνεπάγεται, οπωσδήποτε, αύξηση της ασφάλειας λειτουργίας του συστήματος, όπως συνήθως θεωρείται.

Η συμβολή των νέων μεθοδολογιών που αναπτύχθηκαν είναι πρωτότυπη δεδομένου ότι λαμβάνεται υπόψη η στοχαστική φύση της διαθεσιμότητας των μονάδων παραγωγής των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και η ρεαλιστική και αποδοτική προσομοίωση των χαρακτηριστικών λειτουργίας τους, που έχουν άμεσες επιπτώσεις στην ασφάλεια και αξιοπιστία λειτουργίας τους.

8.3 Επέκταση της Διατριβής

Οι δυνατότητες που υπάρχουν και οι δρόμοι που ανοίγονται για συνέχιση της έρευνας πάνω στο αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι κατά την γνώμη μου αρκετοί. Στην συνέχεια αναφέρονται κάποιες μόνο σκέψεις σχετικά με τις δυνατότητες αυτές.

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένας δυναμικός οργανισμός που αλλάζει συνεχώς μορφή. Η διαρκής μεταβολή της ζήτησης φορτίου, οι αναπόφευκτες βλάβες και η διαθεσιμότητα των μονάδων παραγωγής έχουν ως αποτέλεσμα διαφορετική σύνθεση των μονάδων οι οποίες καλούνται ανά πάσα στιγμή να εξυπηρετήσουν το φορτίο. Όμως και το σύστημα μεταφοράς μεταβάλλεται λόγω των αναγκαίων συντηρήσεων αλλά και των βλαβών που θέτουν αναγκαστικά εκτός λειτουργίας ορισμένα από τα στοιχεία του. Τέλος, το φορτίο αλλάζει όχι μόνο ως προς το μέγεθος αλλά και ως προς τα χαρακτηριστικά του, με κύρια διάκριση μεταξύ θέρους και χειμώνα όπου κλιματιστικά φορτία και φορτία θέρμανσης κυριαρχούν αντίστοιχα. Είναι, επομένως, χρήσιμο να σχεδιαστεί μια προστασία αποκοπής φορτίου η οποία θα είναι συνεχώς προσαρμοζόμενη στις εκάστοτε ανάγκες του συστήματος. Η ιδέα αυτή γίνεται ελκυστικότερη μετά τη καθιέρωση των νέων ψηφιακών ηλεκτρονόμων και των δυνατοτήτων που προσφέρονται για τηλε-έλεγχο και

αναθεώρηση των ρυθμίσεών τους εκ του μακρόθεν, δηλαδή από το Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας.

- Η προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος με χρήση της αριθμητικής μεθόδου Monte-Carlo προσέφερε τους απαραίτητους πιθανοτικούς δείκτες ασφάλειας και αξιοπιστίας για την υιοθέτηση της κατάλληλης προστασίας αποκοπής φορτίου και της αναγκαίας στάθμης στρεφόμενης εφεδρείας. Η μέθοδος αυτή αξιοποιείται για την λειτουργία του συστήματος είτε σε μεσοπρόθεσμη βάση όσον αφορά στην επιλογή της προστασίας αποκοπής φορτίου είτε σε βραχυπρόθεσμη βάση όσον αφορά στην επιλογή της στρεφόμενης εφεδρείας. Όμως, οι δυνατότητες επιλογής της στρεφόμενης εφεδρείας δεν είναι μια συνεχής συνάρτηση αλλά για δεδομένο φορτίο η μεταβολή της είναι μια βηματική συνάρτηση που εξαρτάται από το μέγεθος των διαθέσιμων μονάδων παραγωγής. Επομένως, οι περιορισμοί στις αποφάσεις επιβάλλονται από τα δεδομένα που δημιουργούνται στην φάση σχεδιασμού και ανάπτυξης του συστήματος. Θα μπορούσε, κατά συνέπεια, η παραπάνω μέθοδος η οποία παρέχει χρήσιμους δείκτες αξιοπιστίας και ασφάλειας να επεκταθεί και γρησιμοποιηθεί και στην φάση σγεδιασμού του συστήματος ώστε να βοηθήσει μέσω των αντίστοιχων πιθανοτικών δεικτών, στην επιλογή του κατάλληλου μεγέθους των νέων μονάδων κατά την ανάπτυξη του συστήματος.
- Μια άλλη επέκταση της εργασίας θα ήταν η προσομοίωση των ٠ βραχυκυκλωμάτων επί των στοιχείων του συστήματος μεταφοράς μαζί με την λειτουργία των αντίστοιχων προστασιών. Η απώλεια μετασχηματιστών υποβιβασμού που τροφοδοτούν ζυγούς φορτίου έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση υπερσυγνότητας στο σύστημα η οποία είτε, θα αντισταθμιστεί από την λειτουργία της πρωτεύουσας ρύθμισης είτε θα οδηγήσει σε απώλεια μονάδων παραγωγής. Η απώλεια γραμμών μεταφοράς έχει ως αποτέλεσμα την ανακατανομή των ροών φορτίου και την πιθανότητα να προκύψουν και άλλες απώλειες γραμμών λόγω υπερφόρτισής τους στις νέες συνθήκες. Τέλος, μπορεί να εξεταστεί η πιθανότητα μη ορθής λειτουργίας της προστασίας, δηλαδή η αδυναμία λειτουργίας της κύριας προστασίας με συνέπεια την εκκαθάριση του σφάλματος από την εφεδρική (back up) προστασία. Τα ενδεχόμενα αυτά μπορούν, επίσης, να μελετηθούν μέσα από πιθανοτική ανάλυση της λειτουργίας τους και να εξαγθούν οι αντίστοιγοι πιθανοτικοί δείκτες. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να ποσοτικοποιηθούν οι κίνδυνοι που διατρέχει το σύστημα από την μη ορθή λειτουργία της προστασίας του συστήματος μεταφοράς και να προταθούν βελτιωμένα σχήματα προστασιών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ε. Ν. Διαλυνάς, "Ανάλυση Αζιοπιστίας Τεχνολογικών Συστημάτων", Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1998.
- [2] Ε. Ν. Διαλυνάς, "Αξιοπιστία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας", Αθήνα, 1996.
- [3] R. Billinton, R. N. Allan, "*Reliability Evaluation of Power Systems*", Plenum Press, New York and London, 1996.
- [4] D. Prasetijo, W. R. Lachs, D. Sutanto "A New Load Shedding Scheme for Limiting Underfrequency" Trans. on Power Systems, vol. 9, no. 3, pp. 1371-1377, 1994.
- [5] C. Concordia, L. H. Fink, G. Poulikas, "Load Shedding on an Isolated System", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 10, no. 3, pp. 1467-1472, 1995.
- [6] P. V. Subramanian, M. Viswanathan, V. T. Kairamkonda "Frequency Trend and Discrete Underfrequency Relaying Practices in India for Utility and Captive Power Applications", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 7, no. 4, pp. 1878-1884, 1992.
- [7] P. M. Anderson, M. Mirheydar, "An Adaptive Method for Setting Underfrequency Load Shedding Relays", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 7, no. 2, pp. 647-653, 1992.
- [8] J. Jung, C. C. Liu, S. L. Tanimoto, V. Vittal "Adaptation in Load Shedding Under Vulnerable Operating Conditions", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 17, pp. 1199-1205, Nov. 2002.
- [9] J. D. McCalley, W. Fu, "Reliability of Special Protection Systems", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 14, no. 4, pp 1440-1406, Nov. 1999.
- [10] IEEE Standard, "Cylindrical Rotor 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators Rated 10 MVA and Above", IEEE C50.13-2005.
- [11] IEC Standard, "Rotating Electrical Machines Part 3 Specific Requirements for Turbine Type Synchronous Machines", IEC 60034-3:1998.
- [12] ISO Standard, "Gas turbines Part 2 Standard Reference Conditions and Ratings", ISO 3977-2:1997.
- [13] IEC Standard, "Thermal Electrical Relays Part 8", IEC 255-8:1990.
- [14] G. J. Anders, "Probability Concepts in Power Systems", John Wiley & Sons, U.S.A., 1990.
- [15] M. Modarres, M. Kaminski, V. Krivtsov, "*Reliability Engineering and Risk Analysis*", Marcer Dekker, Inc. New York, 1999.
- [16] A. Villemeur, "Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment, Volume 1, Methods and Techniques", John Wiley & Sons, England, 1992.
- [17] A. Villemeur, "*Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment, Volume 2, Assessment, hardware, Software and Human Factors*", John Wiley & Sons, England, 1992.
- [18] J. Knezevic, "*Reliability Maintainability and Supportability*", Mc-Graw Hill, London, 1993.

- [19] D. Kececioglu, "Maintainability, Availability & Operational Readiness Engineering", Prentice-Hall, New Jersey, 1995.
- [20] J. S. Oakland, R. F. Followell, "Statistical Process Control", Billing & Sons, Oxford, 1986.
- [21] W. Mendenhall, T. Sincich, "*Statistics for Engineering and Sciences*", Prentice-Hall, New Jersey, 1995.
- [22] W. Hauschild, W. Mosch, "Statistical Techniques for High Voltage Engineering", IEE Power Series, U.K., 1992.
- [23] M. R. Spiegel, L. J. Stephens, "Στατιστική", Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2000.
- [24] Γ. ΓΡ. Ρουσσά, "Θεωρία Πιθανοτήτων", Εκδόσεις Ζήση, Πάτρα, 1992.
- [25] Φ. Κολυβά Μαχαίρα, Ε. Μπόρα Σέντα, "Στατιστική, Θεωρία και Εφαρμογές", Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 1999.
- [26] Σ. Καλπαζίδου, "Στοιχεία Θεωρίας Στοχαστικών Ανελίζεων", Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 1999.
- [27] Δ. Χ. Βουκάλης, "Ανάλυση Στοχαστικών Σημάτων", Εκδόσεις Ίων, Αθήνα, 1993.
- [28] R. E. Barlow, F. Proschan, "Mathematical Theory of Reliability", SIAM, Philadelphia, 1996.
- [29] I. M. Sobol, "*The Monte-Carlo Method*", University of Chicago Press, Chicago, 1974.
- [30] S. M. Ross, "A Course in Simulation", Macmillan Publishing Company, New York, 1991.
- [31] Β. Κ. Παπαδιάς, "Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τόμος ΙΙ, Ασύμμετρες και Μεταβατικές Καταστάσεις", Αθήνα, 1993.
- [32] T. Van Cutsem, C. Vournas, "Voltage Stability of Electric Power Systems", Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998.
- [33] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, USA, 1994.
- [34] P. M. Anderson, A. A. Fouad, "*Power System Control and Stability*", IEEE Press, New York, 1993.
- [35] C. W. Taylor, "Power Voltage Stability", *Electric Power Engineering Institute*, McGraw-Hill Inc., New York, 1994.
- [36] Β. Κ. Παπαδιάς, "Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τόμος Ι, Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας", Αθήνα, 1985.
- [37] Β. Κ. Παπαδιάς, Κ. Βουρνάς, "Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας και Έλεγχος Συχνότητας και Τάσεως", Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1991.
- [38] Α. Μπακιρτζής, "Οικονομική Λειτουργία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας", Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 1998.
- [39] IEEE Generating Plant Abnormal Frequency Working Group, "Summary of the Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 3, no. 1, pp. 153-157, 1998.
- [40] P. M. Anderson, "Power System Protection", IEEE Press, New York, 1999.
- [41] O. I. Elgerd, "*Electric Energy Systems Theory*", McGraw-Hill, New York, 1998.
- [42] W. Fu, S. Sanyi, J. D. McCalley, V. Vittal, N. Abi-Samra, "Risk assessment for Special Protection Systems", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 17, no. 1, pp. 63-72, 2002.
- [43] J. W. Sullivan, M. J. O'Malley, "A New Methodology for the Provision of Reserve in an Isolated Power System", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 14, no. 2, pp 519-524, May 1999.

- [44] S. Chapra, R. Canale, "Numerical Methods for Engineers", McGraw-Hill, Singapore, 1998.
- [45] F. Sceid, "*Numerical Analysis*", McGraw-Hill, New York, 1968.
- [46] Ε. Brierley, A. Prince, D. Rinaldi, "Η Βίβλος της Visual Basic 6", Εκδόσεις Γκιούρδας, Αθήνα, 2000.
- [47] G. Perry, "Εγχειρίδιο της Visual Basic 6", Εκδόσεις Γκιούρδας, Αθήνα, 1999.
- [48] "Microsoft Visual Basic 6.0 Programmer's Guide", Microsoft Press, 1998.
- [49] S. Haykin, "*Neural Networks, A Comprehensive Foundation*", Prentice Hall International, Inc., New Jersey, 1999.
- [50] L. Tsoukalas, R. Uhrig, "Fussy and Neural Approaches in Engineering", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997.
- [51] R. Callan, "The Essence of Neural Networks", Prentice Hall Europe, Bristol, 1999.
- [52] C. Harris, C. Moore, m. Brown, "Intelligent Control, Aspects of Fuzzy logic and Neural Nets", World Scientific, Singapore, 1994.
- [53] M. Friedman, a. Kandel, "Introduction to Pattern Recognition, Statistical, Structural, Neural and Fussy Logic Approaches", World Scientific, Singapore, 1999.
- [54] D. Kottick, "Neural-Networks for Predicting the Operation of an Underfrequency Load Shedding System", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 10, pp. 1350-1370, Aug. 1996.
- [55] M. Austin, D. Chancogne, "*Engineering Programming C, Matlab, Java*", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997.
- [56] E. P. Enander, A. Sjoberg, "*The Matlab 5 Handbook*", Prentice Hall International, London, 1999.
- [57] T. Inoue, H. Taniguchi, Y. Ikeguchi, K. Yoshida, "Estimation of Power System Inertia Constant and Capacity of Spinning-reserve Support Generators Using Measured Frequency Transients", Tans. On Power Systems, vol. 12, no. 1, pp 136-143, Feb. 1997.
- [58] C. Chowdhury, "Energy Methods of Spinning Reserve Assessment in Interconnected Generation Systems", Tans. On Power Systems, vol. 8, no. 3, pp 865-872, Aug. 1993.
- [59] N. Chowdhury, R. Billinton, "Assessment of Spinning Reserve in Interconnected Generation Systems with Export/Import Constraints", Tans. On Power Systems, vol. 4, no. 3, pp 1102-1109, Aug. 1989.
- [60] N. Chowdhury, R. Billinton, "A Reliability Test System for Educational Purposes-Spinning Reserve Studies in Isolated and Interconnected Systems", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 6, no. 4, pp 1578-1583, Nov. 1991.
- [61] F. Bouffard, F. D. Galiana, "An Electricity Market with a Probabilistic Spinning Reserve Criterion", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 19, pp 300-307, Feb. 2004.
- [62] E.S. Karapidakis, N.D. Hatziargyriou, "Online Preventive Dynamic Security of Isolated Power Systems Using Decision Trees", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 17, no. 2, pp 297-304, May 2002.
- [63] O. Nilsson, L. Soder, D. Sjelvgren, 'Integer Modeling of Spinning Reserve Requirements in Short Term Scheduling" IEEE Tans. On Power Systems, vol. 13, no. 3, pp 959-964, Aug. 1998.
- [64] H. B. Gooi, D. P. Mendes, K. R. W. Bell, D. S. Kirshen, "Optimal Scheduling of Spinning Reserve", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 14, no. 4, pp 1485-1492, Nov. 1999.

- [65] U. A. Ozturk, M. Mazumdar, B.A. Norman, "A Solution to the Stochastic Unit Commitment Problem Using Chance Constrained Programming", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 19, no. 3, pp 1589-1598, Aug. 2004.
- [66] M. Grubb, "The Inclusion of Dynamic Factors in Statistical Power System Cost Models –Part II: Part Loading and Reverse Cost", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 4, no. 2, pp 524-529, May 1989.
- [67] R. Billinton, N. A. Chowdhury, "Operating Reserve Assessment in Interconnected Generating Systems" IEEE Tans. On Power Systems, vol. 4, pp 1479-1487, Nov. 1988.
- [68] M. H. J. Bollen, "Understanding Power Quality Problems", IEEE Press, New York, 2000.
- [69] X. Guan, S. Guo, Q. Zhai, "The Conditions for Obtaining Feasible Solutions to Security-Constrained Unit Commitment Problems", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 20, no. 4, pp 1746-1756, Nov. 2005.
- [70] C. Jensen, M. A. El-Sharkawi, R. j. Marks, "Power System Security Assessment using Neural Networks: Feature Selection Using Fisher Discrimination", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 16, no. 4, pp 757-763, Nov. 2001.
- [71] W. Li, A. Bose, "A Coherency Based Rescheduling Method for Dynamic Security", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 13, no. 3, pp 810-815, Aug. 1998.
- [72] E. Vaahedi, Y. Mansour, E. K. Tse, "A General Purpose Method for On-line Dynamic Security Assessment", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 13, no. 1, pp 243-249, Feb. 1998.
- [73] Y. Fu, M. Shahidehpour, Z. Li, "Security-Constrained Unit Commitment with AC Constraints", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 20, no. 3, pp 1538-1550, Aug. 2005.
- [74] J. Momoh, J. Zhu, G. Boswell, S. Hoffman, "Power System Security Enhancement by OPF with Phase Shifter", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 16, no. 2, pp 287-293, May 2001.
- [75] D. Sobajic, Y. Pao, "Artificial Neural-Net based Dynamic Security Assessment for Electric Power Systems", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 4, no. 1, pp 220-227, Feb. 1989.
- [76] F. Bouffard, F. D. Galiana, A. Conejo, "Market-Clearing with Stochastic Security - Part I : Formulation", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 20, no. 4, pp 1818-1826, Nov. 2005.
- [77] F. Bouffard, F. D. Galiana, A. Conejo, "Market-Clearing with Stochastic Security - Part II : Case Studies", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 20, no. 4, pp 1827-1835, Nov. 2005.
- [78] F. Wu, Yu-Kun Tsai, Yi-Xin Yu, "Probabilistic Steady-State and Dynamic Security Assessment", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 3, no. 1, pp 1-9, Feb. 1988.
- [79] H. Harsan, P. Pruvot, H. Hadjsaid, "An Efficient Method for Assessing Security on a Daily Basis" IEEE Tans. On Power Systems, vol. 12, no. 4, pp 1542-1548, Nov. 1997.
- [80] A. Saric, A. Stankovic, "Model Uncertainty in Security Assessment of Power Systems", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 20, no. 3, pp 1398-1407, Aug. 2005.
- [81] R. Kaye, P. F. Wu, P. Varaiya, "Pricing for System Security", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 10, no. 2, pp 575-583, May 1995.
- [82] Y. Chen, A. Bose, "Security Analysis for Voltage Problems Using a Reduced Model", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 5, no. 3, pp 933-940, Aug. 1990.

- [83] D. Reichelt, H. Glavitsch, "Features of a Hybrid Expert System for Security Enhancement", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 7, no. 2, pp 907-913, May 1992.
- [84] D. Niebur, A. Germond, "Power System Static Security Assessment Using the Kohonen Neural Network Classifier", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 7, no. 2, pp 865-872, May 1992.
- [85] R. Wang, R. Lasseter, "Re-Dispatching Generation to Increase Power System Security Margin and Support Low Voltage Bus", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 15, no. 2, pp 220-227, May 2000.
- [86] M. Bolton Zammit, D. J. Hill, R. J. Kaye, "Designing Ancillary Services Markets for Power System Security", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 15, no. 2, pp 675-680, May 2000.
- [87] H. Singh, A. Papalexopoulos, "Competitive Procurement of Ancillary Services by an Independent System Operator", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 14, no. 2, pp. 498-504, May 1999.
- [88] R. Baldick, "The Generalized Unit Commitment Problem", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 10, no. 1, pp. 465-473, Feb. 1995.
- [89] J. Restrepo, F. Galiana, "Unit Commitment with Primary Frequency Regulation Constraints", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 20, no. 4, pp 1836-1842, Nov. 2005.
- [90] K. Papadogiannis, N. Hatziargyriou, "Optimal Allocation of Primary Reserve Services in Energy Markets", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 19, no. 1, pp 652-659, Feb. 2004.
- [91] D. R. Bobo, B. M. Mauzy "Economic Generation Dispatch with Responsive Spinning Reserve Constrains", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 9, no. 1, pp 555-559, Feb. 1994.
- [92] L. Pereira, J. Undrill, D. Kosterev, D. Davies, S. Patterson, "A New Thermal Governor Modeling Approach in the WEEC", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 18, no 2, pp. 819-829, May 2003.
- [93] L. Pereira, D. Kosterev, D. Davies, S. Patterson, "New Thermal Governor Model Selection in the WEEC", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 19, no 1, pp. 517-523, Feb. 2004.
- [94] Β. Μ. Weedy, "Μεταφορά και Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας", Εκδόσεις Γκιούρδας, Αθήνα, 1980.
- [95] F. J. Heredia, N. Nabona, "Optimum Short-Term Hydrothermal Scheduling with Spinning Reserve through Networks Flows", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 10, no. 3, pp 1642-1651, Aug. 1995.
- [96] H. Yamin, "Spinning Reserve Uncertainty in Day-Ahead Competitive Electric Markets for GENCOs", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 20, no. 1, pp 521-522, Feb. 2005.
- [97] O. E. Moya, "A Spinning Reserve, Load Shedding and Economic Dispatch Solution by Bender's Decomposition", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 20, no. 1, pp 384-388, Feb. 2005.
- [98] C. Somuah, N. Khunaizi, "Application of Linear Programming Dispatch Technique to Dynamic Generation Allocation" IEEE Tans. On Power Systems, vol. 5, no. 1, pp 20-26, Feb. 1990.
- [99] A. Motto, F. Galiana, A. Conejo, J. Arroyo, "Network-Constrained Multiperiod Auction for a Pool-based Electricity Market", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 17, no. 3, pp 646-653, Aug. 2002.

- [100] M. Shahidehpour, H. Yamin, Z. Y. Li, Market Operations in Electric Power Systems. New York: Wiley, 2002.
- [101] Β. Κ. Παπαδιάς, Γ. Κονταξής, "Ηλεκτρική Οικονομία", Αθήνα, 1996.
- [102] W. D. Stevenson, "Elements of Power System Analysis, McGraw-Hill", New York, 1975.
- [103] S. Siddiqi, M. Baughman, "Reliability Differentiated Pricing of Spinning Reserve", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 10, no. 3, pp 1211-1218, Aug. 1995.
- [104] M. Bolton Zammit, D. J. Hill, R. J. Kaye, "Designing Ancillary Services Markets for Power System Security", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 15, no. 2, pp 675-680, May 2000.
- [105] V. Chuvychin, N. Gurov, S. Venkata, R. Brown, "An Adaptive Approach to Load Shedding and Spinning Reserve Control During Underfrequency Conditions", IEEE Tans. On Power Systems, vol. 11, no. 4, pp 1805-1810, Nov. 1996.
- [106] G. S. Stavrakakis, N. D. Hatziargyriou, J. A. Pecas Lopes et al, "Dissemination of the Advanced Control Technologies and SCADA Systems for the Isolated Power Networks With Increased Use of Renewable Energies", Book of Proceedings, Ajaccio – Corsica, March 2000 (Produced by Center for Renewable Energy Sources – CRES, www.cres.gr).
- [107] G. S. Stavrakakis, E. Dialynas, "Efficient Computer-based Scheme for Improving the Reliability Performance of Power Substations", Int. J. of Syst. Science, Vol. 22, No 9, pp. 1527-1539, 1991.
- [108] K.C. Kalaitzakis, G. S. Stavrakakis, "A Simulation Model for the Reliable Integration of a 4.5 MW Wind Farm Into the Power Grid of the Crete island", International Journal of Solar Energy, vol. 9, pp. 137-146, 1990.
- [109] P.V. Malatestas, M. P. Papadopoulos, G. S. Stavrakakis, "Modeling and Identification of Diesel - Wind Turbines Systems for Wind Penetration Assessment", IEEE trans. on Power Systems, Vol. 8, No. 3, pp. 1091-1098, August 1993.
- [110] G. S. Stavrakakis, G. N. Kariniotakis, "A General Simulation Algorithm for the Accurate Assessment of Isolated Diesel-Wind Turbines Systems Interaction - Part I: A General Multimachine Power System Model", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 10, No. 3, pp. 577-583, Sept. 1995.
- [111] G. N. Kariniotakis, G. S. Stavrakakis, "A General Simulation Algorithm for the Accurate Assessment of Isolated Diesel-Wind Turbines Systems Interaction - Part II: Implementation of the Algorithm and Case-Studies with Induction Generators". IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 10, No. 3, pp. 584-590, Sept. 1995.
- [112] G. N. Kariniotakis, G. S. Stavrakakis, E. F. Nogaret, "Wind Power Forecasting Using Advanced Neural Networks Models" IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, No. 4, Dec. 1996.
- [113] E. F. Nogaret, G. S. Stavrakakis, G. N. Kariniotakis, "An Advanced Control System for the Optimal Operation and Management of Medium Size Power Systems with a Large Penetration from Renewable Power Sources", Renewable Energy, Vol. 12, No. 2, pp. 137-149, 1997.
- [114] K.C. Kalaitzakis, G. S. Stavrakakis, E. M. Anagnostakis, "Short-term Load Forecasting Based on Artificial Neural Networks Parallel Implementation", Electric Power Systems Research, Vol. 63, pp. 185-196, 2002.
- [115] N. D. Hatziargyriou, E. S. Karapidakis, G. S. Stavrakakis, I. F. Dimopoulos, K.C. Kalaitzakis, "Identification of Synchronous Machine Parameters Using Constrained Optimization" 2001 IEEE Power Tech Conference, September 10-13, 2001, Porto, Portugal.

[116] M. P. Papadopoulos, P.V. Malatestas, B. K. Papadias, G. S. Stavrakakis, "Modeling and Parameters Identification of Diesel-wind Turbines Systems", European Communities Wind Energy Conference, Glasgow, England 1989.