



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΟΥΝΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΣΕ
ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ DC ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΤΟΛΗ ΤΟΥΣ ΜΕΣΩ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ
ΕΛΕΓΧΟΥ**

Διπλωματική Εργασία

Φέγγαρης Ι. Γεώργιος

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΟΥΝΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΣΕ
ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ DC ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΤΟΛΗ ΤΟΥΣ ΜΕΣΩ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ
ΕΛΕΓΧΟΥ**

Διπλωματική Εργασία

Φέγγαρης Ι. Γεώργιος

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 02/03/2018.

.....

Ν. Χατζηαργυρίου

Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Στ. Παπαθανασίου

Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Π. Γεωργιλάκης

Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2018

... ..

Φέγγαρης Ι. Γεώργιος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

Copyright © Φέγγαρης Ι. Γεώργιος, 2018.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, η ανάγκη για όλο και μεγαλύτερη αξιοπιστία στην παροχή της, τα προβλήματα στην ποιότητα της ισχύος, όπως επίσης η ρύπανση του περιβάλλοντος και η κλιματική αλλαγή, έχουν οδηγήσει στην αναζήτηση εναλλακτικών τρόπων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η Διεσπαρμένη Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω μικρής κλίμακας πηγών που βρίσκονται κοντά στο φορτίο, αποτελεί σήμερα μία αρκετά διαδεδομένη εναλλακτική λύση ή ενίσχυση του κεντρικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Στο πλαίσιο ανάπτυξης της Διεσπαρμένης Παραγωγής αναπτύχθηκε η ιδέα του μικροδικτύου. Το μικροδίκτυο είναι ένα τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνει πηγές διεσπαρμένης παραγωγής, φορτία, μέσα προστασίας και αποθήκευσης και μπορεί να λειτουργήσει είτε συνδεδεμένα με το κύριο δίκτυο με δυνατότητα εισαγωγής/εξαγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είτε σε κατάσταση νησιδοποίησης, δηλαδή απομόνωσης από το κύριο δίκτυο. Τα τελευταία χρόνια, τα μικροδίκτυα και ιδιαίτερα τα μικροδίκτυα DC, λόγω των πλεονεκτημάτων τους έναντι των μικροδικτύων AC, προσελκύουν την προσοχή όλο και περισσότερων ερευνητών από όλο τον κόσμο. Παρόλα τα πλεονεκτήματά τους, η ανάπτυξη των μικροδικτύων DC παρουσιάζει ορισμένες προκλήσεις. Η σημαντικότερη πρόκληση αποτελεί το φαινόμενο των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων, δηλαδή ηλεκτρικών ρευμάτων που κυκλοφορούν σε βρόχους που σχηματίζονται μεταξύ των πηγών αντί να καταλήγουν στο φορτίο προκαλώντας σημαντικές απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας στις γραμμές μεταφοράς. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκε η καταστολή του συγκεκριμένου φαινομένου.

Ειδικότερα, στο Κεφάλαιο 1, καταγράφονται οι λόγοι εμφάνισης της Διεσπαρμένης Παραγωγής, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της, ορίζεται το μικροδίκτυο, περιγράφονται οι καταστάσεις λειτουργίας του και τα χαρακτηριστικά του. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των μικροδικτύων AC και DC με ιδιαίτερη έμφαση να δίνεται στα πλεονεκτήματα των μικροδικτύων DC έναντι των μικροδικτύων AC.

Στο Κεφάλαιο 2, γίνεται εκτενής αναφορά στην εφαρμογή του ιεραρχικού ελέγχου στα μικροδίκτυα DC και ιδιαίτερα στον παθητικό πρωταρχικό ή πρωτογενή έλεγχο που ασχολείται με το διαμοιρασμό του φορτίου μεταξύ των πηγών. Ως η σημαντικότερη μορφή παθητικού πρωταρχικού ή πρωτογενούς ελέγχου αναδεικνύεται ο έλεγχος που βασίζεται στις χαρακτηριστικές καμπύλες Droop των μετατροπέων που χρησιμοποιούνται για την ένταξη των πηγών στο μικροδίκτυο. Τέλος, αναδεικνύονται τα δύο σημαντικότερα προβλήματα που σχετίζονται με τον έλεγχο Droop, ο κακός διαμοιρασμός του φορτίου και τα κυκλοφορούντα ηλεκτρικά ρεύματα.

Στο Κεφάλαιο 3, καταγράφονται οι τρόποι αντιμετώπισης του φαινομένου των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων που προτείνονται από τη διεθνή βιβλιογραφία μέχρι και σήμερα. Έμφαση δίνεται στη μέθοδο Droop Index (DI), όπου η καταστολή των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων πραγματοποιείται μέσω της επιλογής κατάλληλων τιμών για τις εικονικές αντιστάσεις εξόδου R_{droop} των μετατροπέων του μικροδικτύου DC. Η μέθοδος στοχεύει στη βέλτιστη λύση για το σύστημα, δηλαδή στην μεγαλύτερη δυνατή καταστολή των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων και ταυτόχρονα στη μεγαλύτερη δυνατή μείωση των απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας στις γραμμές μεταφοράς που αυξάνονται με την αύξηση των αντιστάσεων R_{droop} .

Στο Κεφάλαιο 4, μελετάται η σχέση ανάμεσα στις αντιστάσεις R_{droop} και στο λόγο ή στους λόγους των τάσεων εξόδου των μετατροπέων ενός μικροδικτύου DC. Συγκεκριμένα, για τέσσερις συνολικά συνδεσμολογίες, δύο μονοπολικές και δύο διπολικές, αναλύονται και υπολογίζονται τα κυκλοφορούντα ηλεκτρικά ρεύματα και τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς. Στη συνέχεια αναπτύσσονται αλγόριθμοι με τη βοήθεια του προγράμματος MATLAB που υπολογίζουν τις αντιστάσεις R_{droop} για διάφορες τιμές του λόγου ή των λόγων των τάσεων εξόδου των μετατροπέων των συνδεσμολογιών που μελετώνται με δεδομένα τα χαρακτηριστικά τους, δηλαδή τις αντιστάσεις των γραμμών μεταφοράς και τις αντιστάσεις των φορτίων. Τέλος, κατασκευάζονται τις καμπύλες ή τις επιφάνειες που δίνουν κατά προσέγγιση τις αντιστάσεις R_{droop} για οποιοσδήποτε τιμές του λόγου ή των λόγων των τάσεων εξόδου.

Στο Κεφάλαιο 5, με τη βοήθεια του Simulink, μοντελοποιούνται οι συνδεσμολογίες που μελετήθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Αρχικά, μηδενίζοντας τις αντιστάσεις R_{droop} , μετρώνται και καταγράφονται τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς και το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα για κάθε συνδεσμολογία και για διάφορες τιμές του λόγου ή των λόγων των τάσεων εξόδου των μετατροπέων ενός μικροδικτύου DC. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι αντιστάσεις R_{droop} , όπως επίσης τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς και το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα, με βάση τους αλγόριθμους που υλοποιούν τη μέθοδο Droop Index. Τέλος, επιλέγονται οι αντιστάσεις R_{droop} με βάση τις καμπύλες και τις επιφάνειες που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4 και μετρώνται τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς και το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα. Στόχος αποτελεί να συγκριθούν οι δύο μέθοδοι μεταξύ τους και να αντληθούν συμπεράσματα.

Στο Κεφάλαιο 6, καταγράφονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εργασία, όπως επίσης προτάσεις για τη συνέχεια.

Λέξεις-κλειδιά: Διεσπαρμένη Παραγωγή, μικροδίκτυο DC, παθητικός πρωταρχικός ή πρωτογενής έλεγχος, έλεγχος Droop, κυκλοφορούντα ηλεκτρικά ρεύματα, αντιστάσεις R_{droop} , μέθοδος Droop Index, δείκτης Droop Index, οικογένειες καμπυλών, οικογένεια επιφανειών.

Abstract

The energy shortage, the need for reliability of power supply, the environmental pollution and the climate change have led to the development of alternative ways of producing electricity. Nowadays, distributed power generation – the production of electricity by small-scale power generation devices located near the load- is being largely used either as an alternative to the main power grid or as a backup. The invention of microgrids promises further development of distributed power generation. Microgrids are local power grids consisted of distributed power generators, loads, protection and energy storage devices which can operate either as an independent entity connected to the main power grid or in islanding mode. Recently, DC microgrids have become an attractive technology to many researchers due to their advantages over AC microgrids. Despite of their advantages, DC microgrids appear some serious disadvantages. The major disadvantage of DC microgrids is the existence of circulating currents – currents which circulate in loops created between the voltage sources without yielding any power to the load. As a result, circulating currents cause great power losses on the distribution lines. In this diploma thesis, the suppression of these circulating currents is examined.

Extensively, in Chapter 1, the causes of the development of distributed power generation are explained and its advantages and disadvantages are presented. Afterwards, the microgrid is defined and its operating modes and characteristics are pointed. Finally, the advantages and disadvantages of DC and AC microgrids are discussed thoroughly.

In Chapter 2, the application of hierarchical control in DC microgrids is presented. Emphasis is placed on the passive primary control through which load sharing is achieved. Subsequently, Droop control – the control method based on the Droop characteristics of the converters used to integrate the voltage sources into the DC microgrid – is pointed as the most widespread passive primary control method. Poor voltage regulation and the phenomenon of circulating currents are also described as the main problems primary control has to solve.

In Chapter 3, the methods proposed by the international scientific community in order to suppress the circulating currents are listed. Emphasis is placed on the method called “Droop Index method”. According to this method, circulating currents are suppressed by the appropriately chosen virtual output resistances of the converters of a DC microgrid called R_{droop} . The Droop Index method looks for the optimum values of the abovementioned resistances in order to achieve the greatest possible suppression of the circulating currents as well as the greatest possible reduction of the power losses on the distribution lines which increase due to the existence of the R_{droop} resistances.

In Chapter 4, the correlation between the R_{droop} resistances and the ratio or ratios of the output voltages of the converters of a DC microgrid is examined. Extensively, the circulating currents and the currents flowing through the distribution lines are analyzed and calculated for two unipolar and two bipolar topologies. Afterwards, algorithms which calculate the values of the R_{droop} resistances for various ratios of the output voltages of the converters of the examined topologies are developed in MATLAB language. These algorithms also draw the curves or the surfaces which uniquely correlate the R_{droop} resistances with the ratio or ratios of the output voltages of the converters of the examined topologies. At this point, it should be mentioned that the algorithms are developed with specific values of distribution line and load resistances taken into account.

In Chapter 5, the examined topologies are modeled using Simulink. Firstly, the currents flowing through the distribution lines and the circulating currents are measured and presented for every examined topology and for various ratios of the output voltages of the converters. Secondly, the R_{droop} resistances, the currents flowing through the distribution lines and the circulating currents are calculated using conventional Droop Index method. Finally, the R_{droop} resistances are chosen from the curves and the surfaces drawn in Chapter 4 and the currents flowing through the distribution lines and the circulating currents are measured for one more time. The procedure followed aims to compare the two methods used to calculate the R_{droop} resistances.

In Chapter 6, the most important conclusions drawn are gathered and presented all together.

Key words: Distributed power generation, DC microgrid, passive primary control, Droop control, circulating currents, R_{droop} resistances, Droop Index method, Droop Index, sets of curves, set of surfaces.

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Νικόλαο Χατζηαργυρίου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα πραγματικά ενδιαφέρον θέμα. Ιδιαίτερα ευχαριστώ την ερευνήτρια Δρ. Χριστίνα Παπαδημητρίου για τη συνεχή βοήθεια, επιστημονική καθοδήγηση, αρμονική συνεργασία και συμπαράσταση που μου προσέφερε καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Με το κλείσιμο ενός κύκλου της ζωής μου, του κύκλου των προπτυχιακών σπουδών, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για τη δυνατότητα που έδωσε να φτάσω μέχρι και εδώ με κόπους και θυσίες, όπως επίσης στους φίλους μου που ήταν στο πλευρό μου σε όλα αυτά τα χρόνια για τη συνεχή στήριξή τους.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	13
1.1-Διεσπαρμένη Παραγωγή.....	13
1.1.1-Ορισμός.....	13
1.1.2-Εμφάνιση της Διεσπαρμένης Παραγωγής.....	13
1.1.3-Πλεονεκτήματα της Διεσπαρμένης Παραγωγής.....	14
1.1.4-Μειονεκτήματα της Διεσπαρμένης Παραγωγής.....	14
1.2-Μικροδίκτυο.....	15
1.2.1-Ορισμός.....	15
1.2.2-Λειτουργικές καταστάσεις ενός μικροδικτύου.....	15
1.2.3-Πλεονεκτήματα των μικροδικτύων.....	16
1.2.4-Μειονεκτήματα των μικροδικτύων.....	16
1.2.5-Μικροδίκτυο AC.....	16
1.2.6-Μικροδίκτυο DC.....	17
Αναφορές.....	20
Κεφάλαιο 2: Έλεγχος στα μικροδίκτυα DC.....	21
2.1-Εισαγωγή.....	21
2.2-Ιεραρχικός Έλεγχος.....	21
2.3-Πρωταρχικός ή πρωτογενής έλεγχος.....	22
2.3.1-Παθητικός πρωτογενής έλεγχος.....	22
2.3.2-Ενεργητικός πρωτογενής έλεγχος.....	24
2.4-Δευτερογενής και τριτογενής έλεγχος.....	25
Αναφορές.....	26
Κεφάλαιο 3: Το φαινόμενο των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων και η αντιμετώπισή του με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία.....	27
3.1-Εισαγωγή.....	27
3.2-Καταστολή των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων με τη χρήση αντιστάσεων σειράς.....	27

3.3-Η μέθοδος VbPV (Voltage-based Power-Voltage Control Method).....	28
3.4-Τροποποιημένος ελεγκτής Droop για τον παραλληλισμό δύο DC-DC μετατροπέων....	31
3.5-Η μέθοδος DI (Droop Index).....	34
3.6-Βελτιωμένη μέθοδος Droop βασισμένη σε μεταβλητό συντελεστή Droop.....	38
3.7-Βελτιωμένη μέθοδος Droop βασισμένη σε δίκτυο επικοινωνίας χαμηλού εύρους ζώνης (LBC) μεταξύ των μετατροπέων.....	39
Αναφορές.....	43
Κεφάλαιο 4: Η μέθοδος DI (Droop Index) και η σχέση των εικονικών αντιστάσεων εξόδου R_{droop} με το λόγο ή τους λόγους των τάσεων εξόδου των μετατροπέων ενός μικροδικτύου DC.....	44
4.1-Εισαγωγή.....	44
4.2-Μονοπολικές συνδεσμολογίες.....	44
4.2.1-Σύνδεση δύο μετατροπέων σε μονοπολική συνδεσμολογία.....	44
4.2.1.1-Ανάλυση των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων.....	44
4.2.1.2-Καταστολή των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων.....	45
4.2.1.3-Η σχέση της αντίστασης R_{droop2} με το λόγο $x = \frac{V_{dc1}}{V_{dc2}}$	46
4.2.2-Κοινή σύνδεση δύο παράλληλων μετατροπέων σε μονοπολική συνδεσμολογία.....	48
4.3-Διπολικές συνδεσμολογίες.....	51
4.3.1-Σύνδεση δύο μετατροπέων μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου.....	51
4.3.1.1-Ανάλυση των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων.....	51
4.3.1.2-Καταστολή των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων.....	53
4.3.1.3-Η σχέση της αντίστασης R_{droop2} με το λόγο $x = \frac{V_{dc1}}{V_{dc2}}$	54
4.3.2-Σύνδεση τριών μετατροπέων μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού πόλου-αρνητικού πόλου.....	56
4.3.2.1-Ανάλυση των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων.....	56
4.3.2.2-Καταστολή των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων.....	56
4.3.2.3-Η σχέση της αντίστασης R_{droop} με τους λόγους $x_1 = \frac{V_{dc1}}{V_{dc2}}$, $x_3 = \frac{V_{dc3}}{V_{dc2}}$	60
Αναφορές.....	67

Κεφάλαιο 5: Εφαρμογή νέας μεθόδου για την καταστολή των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων και αποτελέσματα εξομοίωσης.....	68
5.1-Εισαγωγή.....	68
5.2-Σύνδεση δύο μετατροπέων σε μονοπολική συνδεσμολογία.....	69
5.3-Κοινή σύνδεση δύο παράλληλων μετατροπέων σε μονοπολική συνδεσμολογία.....	71
5.4-Διπολική συνδεσμολογία σύνδεσης δύο μετατροπέων μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου.....	73
5.5-Διπολική συνδεσμολογία σύνδεσης τριών μετατροπέων μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού πόλου-αρνητικού πόλου.....	75
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προτάσεις για το μέλλον.....	78
6.1-Συμπεράσματα.....	78
6.2-Προτάσεις για το μέλλον.....	78
Παράρτημα.....	79

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

1.1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ

Η αλματώδης αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, η ανάγκη για όλο και μεγαλύτερη αξιοπιστία στην παροχή της, τα προβλήματα στην ποιότητα ισχύος, όπως επίσης η ρύπανση του περιβάλλοντος και η κλιματική αλλαγή, έχουν οδηγήσει στην αναζήτηση εναλλακτικών τρόπων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η Διεσπαρμένη Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Distributed Energy Resource-DER), δηλαδή η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω μικρής κλίμακας πηγών που βρίσκονται κοντά στο φορτίο, αποτελεί σήμερα μία αρκετά διαδεδομένη εναλλακτική λύση ή ενίσχυση του κεντρικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Η Διεσπαρμένη Παραγωγή ορίζεται ως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας, με τιμές που κατά κανόνα κυμαίνονται από 1kW μέχρι και 100MW. [1]

1.1.2 ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Η διεσπαρμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν εμφανίστηκε τώρα. Κατά τα πρώτα χρόνια παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας η διεσπαρμένη παραγωγή ήταν ο κανόνας. Οι πρώτες εγκαταστάσεις παραγωγής παρείχαν ηλεκτρική ενέργεια μόνο σε καταναλωτές που βρίσκονταν στη γειτονική περιοχή τους. Τα πρώτα δίκτυα ήταν δίκτυα DC τάσης και η απόσταση ανάμεσα στον παραγωγό και τον καταναλωτή έπρεπε να είναι περιορισμένη για να αποφεύγονται οι υψηλές απώλειες. Στη συνέχεια, όμως, η ανάπτυξη και η εξέλιξη της τεχνολογίας, η εμφάνιση των δικτύων AC τάσης επέτρεψαν τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγαλύτερες αποστάσεις και η τεράστια αύξηση στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας οδήγησε στην ανάγκη σημαντικής αύξησης της ισχύος εξόδου στις μονάδες παραγωγής. Έτσι, σταδιακά κατασκευάστηκαν μεγάλα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούμενα από μεγάλες εγκαταστάσεις παραγωγής και τεράστια δίκτυα μεταφοράς και διανομής. Η ασφάλεια της παροχής διαρκώς αυξανόταν μιας και ενδεχόμενη αποτυχία ενός σταθμού παραγωγής μπορούσε να καλυφθεί άμεσα. [1]

Παρόλα αυτά, λόγω των περιορισμών στην επέκταση του δικτύου μεταφοράς και διανομής, της αύξησης των απαιτήσεων για υψηλής ποιότητας ισχύ και μεγαλύτερη αξιοπιστία στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και της ρύπανσης του περιβάλλοντος σε συνδυασμό με την ανάπτυξη των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στη διεσπαρμένη παραγωγή, το ενδιαφέρον που γνωρίζουν οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), τα βήματα που γίνονται στην κατασκευή των ηλεκτρονικών ισχύος, η διεσπαρμένη παραγωγή ήρθε στο προσκήνιο. [2]

1.1.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Η διεσπαρμένη παραγωγή παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, αφού συνδράμει στην αποσυμφόρηση των ήδη υπάρχοντων δικτύων, οδηγεί σε μείωση των απωλειών και του κόστους μεταφοράς και αποτελεί εναλλακτική λύση για αξιόπιστη και οικονομική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε νοικοκυριά και επιχειρήσεις εξασφαλίζοντας ότι η παροχή θα είναι συνεχόμενη μιας και σε ενδεχόμενο διακοπής της ηλεκτροδότησης η παροχή μπορεί να αποκατασταθεί σε σύντομο χρονικό διάστημα. Επιπλέον, βοηθά στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στην αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ΑΠΕ συμβάλλοντας αποφασιστικά στην προστασία του περιβάλλοντος. Τέλος, μπορούν εύκολα να βρεθούν τοποθεσίες για την εγκατάσταση πηγών διεσπαρμένης παραγωγής ενώ η σύνδεσή τους στο δίκτυο μπορεί να πραγματοποιηθεί επίσης εύκολα και γρήγορα. [1]

1.1.4 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Παρόλα αυτά, η είσοδος της διεσπαρμένης παραγωγής σε ευρεία κλίμακα μπορεί να δημιουργήσει σοβαρά προβλήματα στην ευστάθεια του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με αποτέλεσμα την έντονη διακύμανση της τάσης. Το γεγονός ότι η ικανότητα παραγωγής συγκεκριμένων πηγών διεσπαρμένης παραγωγής, όπως τα φωτοβολταϊκά πάνελ, τα αιολικά πάρκα, δε μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια λόγω της έντονης εξάρτησής της από τις καιρικές συνθήκες μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές αποκλίσεις στη δυνατότητα παραγωγής, ακόμα και σε απώλεια παραγωγής. Έτσι η διείσδυση των ΑΠΕ είναι περιορισμένη και πρέπει πάντα να υπάρχει εφεδρεία συμβατικών μονάδων παραγωγής. Επιπλέον, η πιθανότητα αμφίδρομης ροής ισχύος, δηλαδή η πιθανότητα πλην της συνήθους ροής ισχύος από τη μέση τάση στη χαμηλή να υπάρξει ροή ισχύος από τη χαμηλή τάση στη μέση, προκαλεί καινούριες προκλήσεις στη διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας και απαιτεί διαφορετικά μέσα προστασίας και στα δύο επίπεδα τάσης. [1]

1.2 ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ

1.2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ

Το μικροδίκτυο είναι ένα τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνει πηγές διεσπαρμένης παραγωγής, φορτία, μέσα προστασίας και αποθήκευσης και μπορεί να λειτουργήσει είτε συνδεδεμένα με το κύριο δίκτυο με δυνατότητα εισαγωγής/εξαγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είτε σε κατάσταση νησιδοποίησης, δηλαδή απομόνωσης από το κύριο δίκτυο. [2]

Το βασικό χαρακτηριστικό του μικροδικτύου δεν είναι η έκταση του αλλά η δυνατότητα του να λειτουργεί αυτόνομα από το κύριο δίκτυο. [2] Έτσι, με δεδομένη την ύπαρξη της διεσπαρμένης παραγωγής, μικροδίκτυο μπορεί να αποτελεί ένα κτίριο ή ένα συγκρότημα κτιρίων, ένα τμήμα του δικτύου διανομής, ένα σύνολο δικτύων που βρίσκονται ιεραρχικά κάτω από ένα υποσταθμό διανομής, το δίκτυο ενός απομονωμένου χωριού, ενός νησιού ή ενός βιομηχανικού πάρκου.

Το μικροδίκτυο χαρακτηρίζεται επίσης ως:

- «peer-to-peer» που σημαίνει ότι όλες οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής που διαθέτει συμμετέχουν ισότιμα στην κάλυψη της ζήτησης, δηλαδή δεν υπάρχει πηγή που είναι κρίσιμη για τη λειτουργία του μικροδικτύου. [2]
- «plug-and-play» που σημαίνει ότι μία μονάδα μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιαδήποτε σημείο του δικτύου και να ενταχθεί παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια αξιόπιστα μειώνοντας το ενδεχόμενο σφάλματος. [2]

Υπάρχουν δύο είδη μικροδικτύων, τα μικροδίκτυα DC και τα μικροδίκτυα AC. Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή και των δύο με μεγαλύτερη έμφαση να δίνεται ωστόσο στα μικροδίκτυα DC που σχετίζονται με το θέμα της εργασίας.

1.2.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΝΟΣ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ

Το μικροδίκτυο, όπως έχει ήδη σημειωθεί, μπορεί να βρεθεί με κατάλληλη συνδεσμολογία σε πλειάδα καταστάσεων:

- Σε διασύνδεση με το κύριο δίκτυο: Στη συγκεκριμένη λειτουργική κατάσταση δεν είναι αναγκαίο το μικροδίκτυο να ισορροπεί την παραγωγή του με τη ζήτησή του αφού οποιαδήποτε διαφορά μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης μπορεί να καλυφθεί από το κύριο δίκτυο. [2]
- Σε νησιδοποίηση: Στη συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας το μικροδίκτυο οφείλει να ισορροπεί την παραγωγή του με τη ζήτηση του. Οποιαδήποτε διαφορά μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης θα πρέπει να καλυφθεί από τα μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικότερα, θα πρέπει είτε να περικοπεί παραγωγή σε ενδεχόμενο υπέρβασης της ζήτησης από την παραγωγή είτε να περικοπεί φορτίο σε ενδεχόμενο απότομης αύξησης της ζήτησης πάνω από τα επίπεδα παραγωγής. [2]

Τα μικροδίκτυα που είναι ικανά να μεταβαίνουν μεταξύ των δύο καταστάσεων ομαλά είναι ιδιαίτερα επιθυμητά σε εγκαταστάσεις που απαιτούν υψηλής ποιότητας ισχύ.

1.2.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ

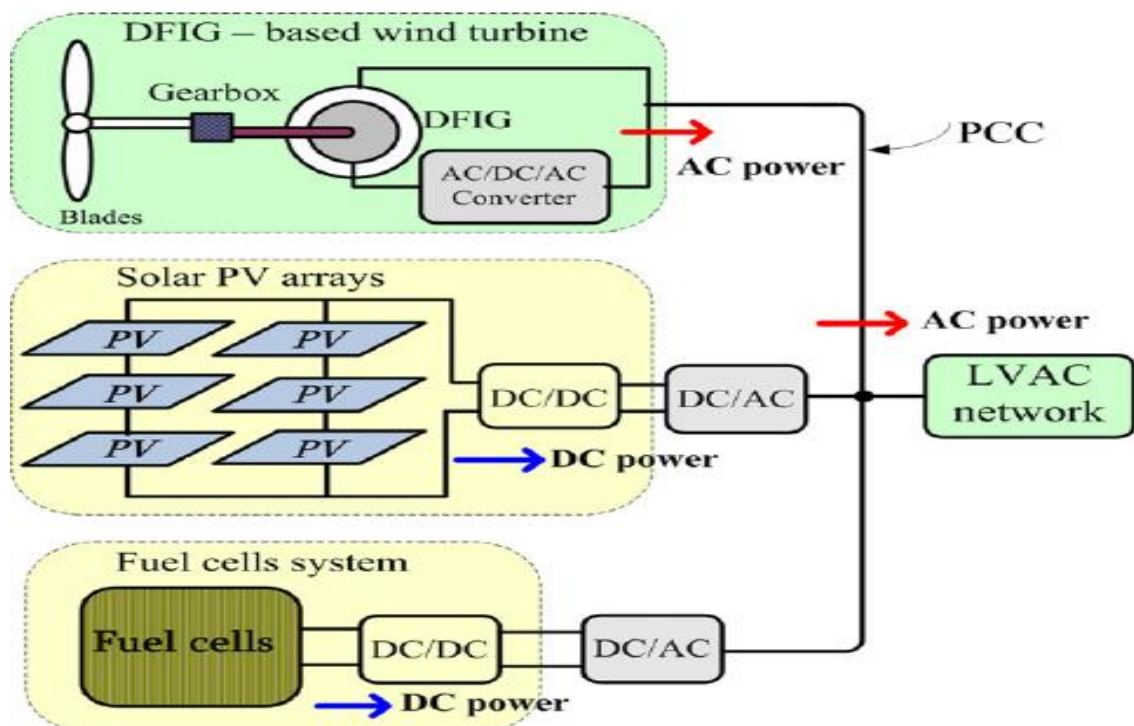
Τα μικροδίκτυα παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα. Αρχικά, μπορούν να αποσυμφορήσουν σημαντικά το κύριο δίκτυο διευκολύνοντας την ένταξη μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Παράλληλα, από την πλευρά του δικτύου μπορεί κανείς να μεταχειριστεί εύκολα το μικροδίκτυο ως μία ελεγχόμενη οντότητα, δηλαδή είτε ως φορτίο είτε ως πηγή. Επίσης, τα μικροδίκτυα μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας από μεταφορά μειώνοντας και το κόστος μιας και η παραγωγή γίνεται τοπικά. Τα μικροδίκτυα προσφέρουν ακόμη τη δυνατότητα τοπικού ελέγχου της τάσης και της συχνότητας, την καλύτερη αντιστοίχιση προσφοράς και ζήτησης και τη μείωση της επίδρασης διακοπών μεγάλης κλίμακας στην παραγωγή και τη μεταφορά εξασφαλίζοντας υψηλή ποιότητα και αξιοπιστία στην παροχή. Τέλος, συμβάλλουν στην προστασία του περιβάλλοντος μειώνοντας την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου και ενισχύοντας τη χρήση ΑΠΕ. [1] [2]

1.2.4 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ

Παρά τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν η ανάπτυξη των μικροδικτύων αντιμετωπίζει σοβαρές προκλήσεις. Προβλήματα που χρήζουν προσοχής είναι το χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο ορισμένων πηγών διεσπαρμένης παραγωγής, η εξαρτώμενη από τις καιρικές συνθήκες παραγωγή των ΑΠΕ και η έλλειψη τεχνικής εμπειρίας στον έλεγχο ενός σημαντικού αριθμού πηγών διεσπαρμένης παραγωγής. Απαιτείται επίσης έρευνα για την προστασία των μικροδικτύων, χρειάζεται να αναπτυχθούν ειδικές τηλεπικοινωνιακές δομές και πρωτοκόλλα επικοινωνίας για την επικοινωνία μεταξύ των διάφορων πηγών και πρότυπα για τη λειτουργία των μικροδικτύων σε συγχρονισμό με το κύριο δίκτυο. [1] [2]

1.2.5 ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ AC

Ένα τυπικό σχήμα που απεικονίζει ένα μικροδίκτυο AC είναι το σχήμα που ακολουθεί.



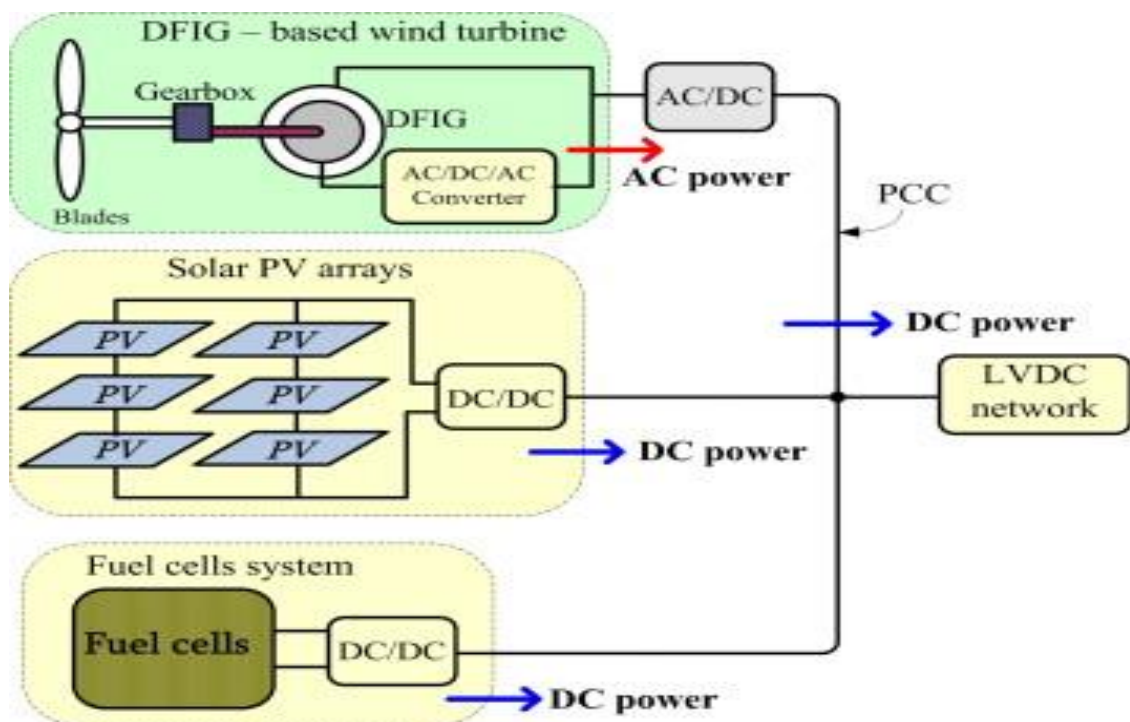
Εικόνα 1.1 Μικροδίκτυο AC.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, σε ένα μικροδίκτυο AC οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής με AC τάση εξόδου, όπως οι ανεμογεννήτριες, τα μικρά υδροηλεκτρικά, οι μικροτουρμπίνες, οι στρόβιλοι, συνδέονται αμέσως στο AC δίκτυο ή ενδεχόμενα χρειάζονται μετατροπείς AC/DC/AC για να συγχρονιστούν με το AC δίκτυο. Επιπλέον, τα AC φορτία είναι απευθείας συνδεδεμένα στο δίκτυο. Αντίθετα, οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής με DC τάση εξόδου, όπως τα φωτοβολταϊκά πάνελα, οι κυψέλες καυσίμου, και οι μονάδες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, όπως οι συσσωρευτές, χρειάζονται μετατροπείς DC/AC για να συνδεθούν στο δίκτυο ενώ τα DC φορτία απαιτούν μετατροπείς AC/DC για να συνδεθούν.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα που παρουσιάζουν τα μικροδίκτυα AC είναι η τεχνική εμπειρία και η εξοικείωση που υπάρχει με το σχεδιασμό δικτύων AC τάσης. Επίσης, η αυξομείωση της AC τάσης πραγματοποιείται πολύ εύκολα μέσω μετασχηματιστών, ηλεκτρικών μηχανών εξαιρετικά αποδοτικών -με απόδοση άνω του 95%- ενώ η αυξομείωση της DC τάσης απαιτεί μετατροπείς DC/DC που παρουσιάζουν σημαντικές προκλήσεις στην υλοποίησή τους παρά τα βήματα που γίνονται. Επιπλέον, η ανάπτυξη των μέσων προστασίας των AC δικτύων βρίσκεται σε πιο ώριμο στάδιο από την αντίστοιχη στα DC δίκτυα. Παρόλα αυτά, τα μικροδίκτυα AC παρουσιάζουν αυξημένες απαιτήσεις για μετατροπές DC/AC και AC/DC που έχουν ως αποτέλεσμα σημαντικές απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας. [2]

1.2.6 ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ DC

Ένα τυπικό σχήμα που απεικονίζει ένα μικροδίκτυο DC είναι το σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 1.2 Μικροδίκτυο DC.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής με DC τάση εξόδου συνδέονται απευθείας στο δίκτυο DC τάσης ενώ οι μονάδες με AC τάση εξόδου χρειάζονται μετατροπείς AC/DC.

Ιστορικά, όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα πρώτα δίκτυα διανομής ήταν δίκτυα DC και στη συνέχεια αντικαταστάθηκαν από δίκτυα AC λόγω των πλεονεκτημάτων των δευτέρων. Σήμερα, το DC χρησιμοποιείται κυρίως σε γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης μεγάλου μήκους –άνω των 600km (High Voltage Direct Current-HVDC). Η μεταφορά HVDC χρησιμοποιείται κατά βάση για τη σύνδεση δύο μεγάλων AC δικτύων διαφορετικών συχνοτήτων απαλλάσσοντας από τις απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας λόγω των υψηλών χωρητικοτήτων που παρουσιάζουν τα καλώδια μεγάλου μήκους όταν διαρρέονται από AC και από την ανάγκη συγχρονισμού των δύο δικτύων. Στο επίπεδο της διανομής το DC ή εναλλακτικά η διανομή LVDC (Low Voltage Direct Current) δε χρησιμοποιούνται ακόμα ευρέως και περιορίζονται σε επικουρικές εγκαταστάσεις σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και υποσταθμών, συστήματα ηλεκτροκίνησης λόγω της ευρείας χρήσης DC κινητήρων στο σιδηρόδρομο και το μετρό, στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και σε κέντρα επικοινωνιών και δεδομένων. [2]

Στη διανομή LVDC η μέση τάση του AC δικτύου μετατρέπεται μέσω ενός μετασχηματιστή σε χαμηλή τάση που στη συνέχεια μετατρέπεται σε DC τάση μέσω ανορθωτών. Η DC τάση μετατρέπεται εκ νέου σε AC τάση κοντά στο φορτίο. Στο πλαίσιο της διανομής LVDC αναπτύχθηκε και η ιδέα του μικροδικτύου DC χαμηλής τάσης (LVDC MG). Οι τοπολογίες που συναντώνται στα LVDC MGs διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τις μονοπολικές και τις διπολικές. Κάθε είδος έχει διάφορες παραλλαγές που αφορούν στον αριθμό των πηγών και τον τρόπο σύνδεσής τους στο ζυγό του φορτίου (DC bus). Η βασική διαφορά μεταξύ των μονοπολικών και των διπολικών τοπολογιών είναι ότι στις μονοπολικές υπάρχουν πηγές μόνο θετικής πολικότητας ενώ στις διπολικές υπάρχουν πηγές και θετικής και αρνητικής πολικότητας. Τα επίπεδα τάσης που προτείνονται για τη λειτουργία των LVDC MGs είναι τα 326V σε μονοπολική συνδεσμολογία ή τα $\pm 326V$ σε διπολική συνδεσμολογία. [2] [4]

Τα μικροδίκτυα DC παρουσιάζουν πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα μικροδίκτυα AC. Καταρχήν η χρήση DC τάσης επιτρέπει τη μεταφορά μεγαλύτερης ενεργού ισχύος λόγω της απουσίας άεργου ισχύος και του υψηλότερου επιπέδου τάσης που μπορεί να επιλεγεί σε σχέση με τα μικροδίκτυα AC. Οι απώλειες μειώνονται σημαντικά μιας και οι αυτεπαγωγές και οι αλληλεπαγωγές των καλωδίων στα μικροδίκτυα DC δεν έχουν επίδραση με αποτέλεσμα η άεργος συνιστώσα του ηλεκτρικού ρεύματος που αυξάνει το πλάτος του να μην υφίσταται. Η μείωση της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος επιτρέπει επιπλέον τη μείωση της διατομής των καλωδίων και άρα τη μείωση του κόστους. Επίσης τα μικροδίκτυα DC διευκολύνουν τη σύνδεση πηγών διεσπαρμένης παραγωγής με DC τάση εξόδου και των μέσων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας καθιστώντας περιττές τις μετατροπές DC/AC που συνεπάγονται σημαντικές απώλειες. Κατά τη σύνδεση πηγών διεσπαρμένης παραγωγής με AC τάση εξόδου τα στάδια μετατροπής μειώνονται από δύο σε ένα μιας και δεν είναι απαραίτητος ο συγχρονισμός με το δίκτυο. Τέλος, το μικροδίκτυο DC είναι καταλληλότερο για τη σύνδεση των ηλεκτρονικών συσκευών που καταναλώνουν DC. Σήμερα ο οικιακός εξοπλισμός κυριαρχείται από ηλεκτρονικές συσκευές που καταναλώνουν DC, όπως λαμπτήρες φθορισμού και LED, Η/Υ, τηλεοράσεις, με αποτέλεσμα το μικροδίκτυο DC να καθιστά περιττή την ευρύτατη σήμερα χρήση αρχικά μετασχηματιστών για τη μείωση της χαμηλής τάσης του AC δικτύου διανομής (230V) σε χαμηλότερα επίπεδα και στη συνέχεια ανορθωτών για τη μετατροπή του AC σε DC. [2] [4]

Αξίζει ακόμη να σημειωθεί ότι τα μικροδίκτυα DC μπορούν να εξασφαλίσουν καλύτερη ποιότητα ισχύος αφού σε ενδεχόμενο σφάλμα στο AC δίκτυο μέσης τάσης μπορούν να απομονωθούν από το κύριο δίκτυο μέσω της λειτουργίας της νησιδοποίησης και να εξασφαλίσουν για ένα χρονικό διάστημα αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των συσκευών αποθήκευσης. Παράλληλα αυξάνεται και η αξιοπιστία του AC δικτύου μέσης τάσης αφού το μικροδίκτυο DC σχηματίζει τη δική του περιοχή προστασίας. Επιπρόσθετα ο έλεγχος στα μικροδίκτυα DC είναι απλούστερος σε σχέση με τα μικροδίκτυα AC μιας και δεν απαιτούνται ρύθμιση συχνότητας και αντιστάθμιση άεργου ισχύος ενώ η ρύθμιση της τάσης πραγματοποιείται αποκλειστικά και μόνο ως προς το μέτρο. [2] [4]

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, τα μικροδίκτυα DC παρουσιάζουν αξιοσημείωτες προκλήσεις. Αρχικά, η προστασία των μικροδικτύων DC έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις λόγω των υψηλότερων επιπέδων τάσης ενώ μέχρι και σήμερα δεν έχει προτυποποιηθεί. Επίσης, στα μικροδίκτυα DC ο διαμοιρασμός του φορτίου μεταξύ των πηγών είναι χειρότερος σε σχέση με τα μικροδίκτυα AC ενώ παρατηρείται και το φαινόμενο των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων που απασχολεί και τη συγκεκριμένη εργασία. [3]

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Κατασκευή DC μικροδικτύου σε περιβάλλον MATLAB/SIMULINK και μελέτη τεχνικών ελέγχου, Διπλωματική Εργασία, Πετράκη Αικατερίνη, Επιβλέπων: Χατζηαργυρίου Νικόλαος-Καθηγητής ΕΜΠ, ΕΜΠ, Αθήνα, Απρίλιος 2015.
- [2] Συγκριτική μελέτη μικροδικτύων σταθερού και εναλλασσόμενου ρεύματος, Διπλωματική Εργασία, Νικόλαος Κ. Κεφάλας, Επιβλέπων: Χατζηαργυρίου Νικόλαος-Καθηγητής ΕΜΠ, ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούλιος 2015.
- [3] Μελέτη των κυκλοφορούντων ρευμάτων στα DC μικροδίκτυα με σκοπό την ελαχιστοποίησή τους, Διπλωματική Εργασία, Καπάκης Θεόδωρος, Επιβλέπων: Χατζηαργυρίου Νικόλαος-Καθηγητής ΕΜΠ, ΕΜΠ, Αθήνα, Οκτώβριος 2016.
- [4] Pasi Salonen, Tero Kaipia, Pasi Nuutinen, Pasi Peltoniemi and Jarmo Partanen, An LVDC Distribution System Concept. Paper was presented at the Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORPIE). The workshop was held on Helsinki University of Technology in faculty of Electronics, Communication and Automation, Espoo, Finland, 9-11 June 2008.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΤΑ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ DC

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως έχει σημειωθεί ήδη από το πρώτο κεφάλαιο, ο έλεγχος στα μικροδίκτυα DC είναι απλούστερος σε σχέση με τα μικροδίκτυα AC αφού δεν απαιτούνται αντιστάθμιση της άεργου ισχύος και ρύθμιση της συχνότητας ενώ η ρύθμιση της τάσης πραγματοποιείται αποκλειστικά και μόνο ως προς το μέτρο της. Ωστόσο, το πρόβλημα που τα μικροδίκτυα DC παρουσιάζουν στο διαμοιρασμό του φορτίου μεταξύ των πηγών και το φαινόμενο των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων συνιστούν δύο σημαντικές προκλήσεις. Η υπέρβασή τους είναι κρίσιμης σημασίας για να χρησιμοποιηθούν τα μικροδίκτυα DC σε περισσότερες εφαρμογές.

Ο διαμοιρασμός του φορτίου πρακτικά σημαίνει ότι κάθε πηγή του μικροδικτύου DC θα πρέπει να συμμετέχει ισότιμα στην τροφοδότηση του φορτίου. Αυτό όμως στην πραγματικότητα δε συμβαίνει. Όταν οι τάσεις εξόδου των πηγών είναι ίσες μεταξύ τους, το ζήτημα του διαμοιρασμού του φορτίου ανάγεται σε ζήτημα διαμοιρασμού του ηλεκτρικού ρεύματος του φορτίου μεταξύ των πηγών με τις αντιστάσεις των γραμμών μεταφοράς να παίζουν κυρίαρχο ρόλο.

Ως προς το φαινόμενο των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων, στα μικροδίκτυα DC παρατηρείται μέρος των ηλεκτρικών ρευμάτων που παράγονται από τις διάφορες πηγές για να τροφοδοτήσουν το φορτίο να κυκλοφορεί μεταξύ των πηγών και να μην καταλήγει στο φορτίο. Τα εν λόγω ηλεκτρικά ρεύματα, που χαρακτηρίζονται ως κυκλοφορούντα, κυκλοφορούν σε βρόχους που σχηματίζονται μεταξύ των πηγών όταν οι τάσεις εξόδου τους δεν είναι ίσες μεταξύ τους. Άμεσο αποτέλεσμα του φαινομένου των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων είναι η σημαντική αύξηση των απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο. Επιπλέον, τα κυκλοφορούντα ηλεκτρικά ρεύματα έχουν σημαντική αρνητική επίδραση στο διαμοιρασμό του φορτίου μεταξύ των πηγών.

Με σκοπό την υπέρβαση των συγκεκριμένων προκλήσεων και τον έλεγχο των διάφορων παραμέτρων λειτουργίας των μικροδικτύων DC εφαρμόζεται ο ιεραρχικός έλεγχος.

2.2 ΙΕΡΑΡΧΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

Ο ιεραρχικός έλεγχος (Hierarchical Control) χωρίζεται σε τρία επίπεδα:

- Τον πρωταρχικό ή πρωτογενή έλεγχο.
- Το δευτερογενή έλεγχο.
- Τον τριτογενή έλεγχο.

Στη συνέχεια, τα τρία επίπεδα ελέγχου θα αναλυθούν με μεγαλύτερη έμφαση ωστόσο να δίνεται στον πρωταρχικό ή πρωτογενή έλεγχο που έχει την κύρια ευθύνη για την αντιμετώπιση των δύο προβλημάτων που αναφέρθηκαν στην εισαγωγή του κεφαλαίου.

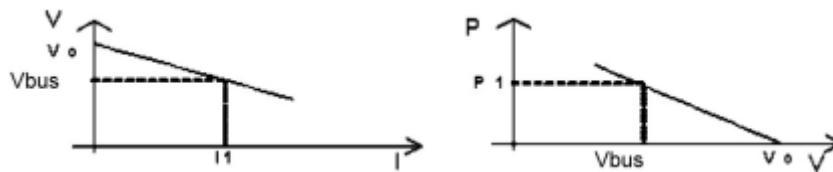
2.3 ΠΡΩΤΑΡΧΙΚΟΣ Ή ΠΡΩΤΟΓΕΝΗΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

Ο πρωταρχικός ή πρωτογενής έλεγχος ασχολείται με το διαμοιρασμό του φορτίου μεταξύ των πηγών του μικροδικτύου DC. Με δεδομένο, όμως, ότι οι τάσεις εξόδου των πηγών πρέπει να είναι ίσες μεταξύ τους για να αποφεύγεται το φαινόμενο των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων, ο διαμοιρασμός του φορτίου ανάγεται σε διαμοιρασμό του ηλεκτρικού ρεύματος του φορτίου μεταξύ των πηγών.

Υπάρχουν δύο είδη πρωταρχικού ή πρωτογενούς ελέγχου, ο παθητικός (passive load sharing), όπου δεν υπάρχει επικοινωνία μεταξύ των πηγών, και ο ενεργητικός (active load sharing), όπου οι πηγές επικοινωνούν μεταξύ τους.

2.3.1 ΠΑΘΗΤΙΚΟΣ ΠΡΩΤΟΓΕΝΗΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

Η σημαντικότερη μορφή παθητικού πρωτογενούς ελέγχου στα μικροδίκτυα DC είναι ο έλεγχος που βασίζεται στις χαρακτηριστικές καμπύλες στατισμού (Droop) των μετατροπέων που χρησιμοποιούνται για την ένταξη των πηγών στο μικροδίκτυο DC. Η χαρακτηριστική Droop ενός μετατροπέα συσχετίζει κατά κύριο λόγο γραμμικά την τάση εξόδου του με το ηλεκτρικό ρεύμα ή την ενεργό ισχύ με την τάση, όπως φαίνεται και από τα σχήματα που ακολουθούν. Με V_0 συμβολίζεται η ονομαστική τάση εξόδου του μετατροπέα.

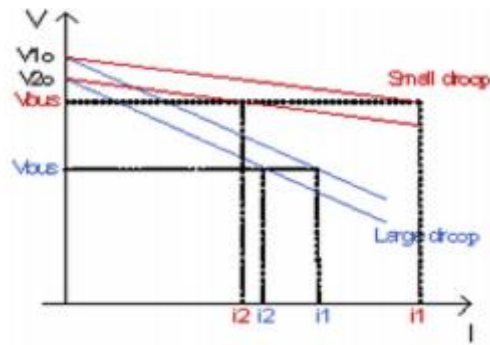


Εικόνα 2.1 Οι χαρακτηριστικές καμπύλες Droop V-I και P-V ενός μετατροπέα.

Ο έλεγχος Droop, όπως αποκαλείται, εξασφαλίζει ότι κάθε πηγή μέσω του μετατροπέα που χρησιμοποιείται για την ένταξή της στο μικροδίκτυο DC θα προσαρμόζεται ευέλικτα και ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες πηγές σε κάθε μεταβολή του φορτίου.

Ωστόσο, σε ένα μικροδίκτυο DC με μεγάλο πλήθος μετατροπέων η ακρίβεια στο διαμοιρασμό του φορτίου μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά στην περίπτωση που παρουσιαστεί σφάλμα στην τάση εξόδου ενός ή περισσότερων μετατροπέων. Η ακρίβεια θα επηρεαστεί, επίσης, στην περίπτωση που οι μετατροπείς έχουν διαφορετικές ονομαστικές τάσεις εξόδου.

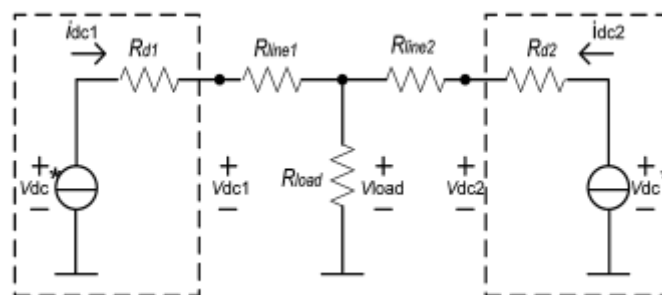
Υποτίθεται ένα μικροδίκτυο DC με δύο παράλληλα συνδεδεμένους μετατροπείς. Στο σχήμα που παρατίθεται αποτυπώνεται χαρακτηριστικά το πρόβλημα στο διαμοιρασμό του φορτίου λόγω της διαφοράς στις ονομαστικές τάσεις εξόδου των μετατροπέων $V_{01} - V_{02}$.



Εικόνα 2.2 Το πρόβλημα του διαμοιρασμού του φορτίου ενός μικροδικτύου DC λόγω της διαφοράς που υπάρχει στις ονομαστικές τάσεις εξόδου των δύο μετατροπέων του.

Επιπλέον, από το σχήμα εύκολα συμπεραίνεται ότι όταν οι χαρακτηριστικές Droop έχουν μικρή κλίση, όταν δηλαδή ο συντελεστής Droop είναι μικρός, η ρύθμιση της τάσης είναι σχετικά ακριβής ενώ ο διαμοιρασμός του φορτίου είναι κακός. Το αντίθετο ισχύει όταν οι χαρακτηριστικές Droop έχουν μεγάλη κλίση. Επομένως, παρατηρείται ότι ο έλεγχος Droop μπορεί να εξασφαλίσει καλό διαμοιρασμό του φορτίου εις βάρος όμως της ρύθμισης της τάσης.

Ένα ακόμα ζήτημα που σχετίζεται με τον έλεγχο Droop είναι και το φαινόμενο των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων. Στο πλαίσιο του ελέγχου Droop, η καταστολή των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων βασίζεται στη διαφορά ανάμεσα στην τάση εξόδου κάθε μετατροπέα κατά την εν κενώ λειτουργία και στην πτώση τάσης που εμφανίζεται σε μία εικονική αντίσταση εξόδου R_{droop} . Η συγκεκριμένη τεχνική ελέγχου περιγράφεται στη συνέχεια με βάση το σχήμα που παρατίθεται και απεικονίζει ένα μικροδίκτυο DC με δύο παράλληλα συνδεδεμένους μετατροπέες. Στο σχήμα κάθε μετατροπέας αντικαθίσταται από το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin.



Εικόνα 2.3 Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin ενός μικροδικτύου DC με δύο παράλληλα συνδεδεμένους μετατροπέες.

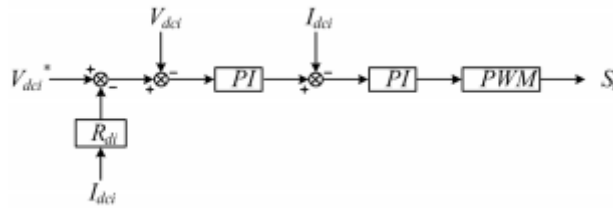
Έτσι, οι τάσεις αναφοράς για τις τάσεις εξόδου των δύο μετατροπέων είναι ίσες με:

$$V_{dc1} = V_{dc}^* - i_{dc1} * R_{d1}$$

$$V_{dc2} = V_{dc}^* - i_{dc2} * R_{d2}$$

Στόχος αποτελεί οι τάσεις εξόδου των μετατροπέων να συγκλίνουν με τις τάσεις αναφοράς τους και μεταξύ τους ώστε να κατασταλεί ή να περιοριστεί το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα.

Στη γενική μορφή του το κύκλωμα ελέγχου της τάσης εξόδου κάθε μετατροπέα παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 2.4 Η γενική μορφή του κυκλώματος ελέγχου της τάσης εξόδου ενός μετατροπέα με βάση τον έλεγχο Droop.

Αρχικά, αφαιρείται από την τάση αναφοράς η τάση εξόδου του μετατροπέα. Το αποτέλεσμα εισέρχεται ως είσοδος σε ένα PI ελεγκτή που παράγει ως έξοδο το ηλεκτρικό ρεύμα αναφοράς. Στη συνέχεια αφαιρείται από το ηλεκτρικό ρεύμα αναφοράς το ηλεκτρικό ρεύμα εξόδου του μετατροπέα και το αποτέλεσμα που προκύπτει εισάγεται ως είσοδος σε ένα PI ελεγκτή. Η έξοδος του ελεγκτή χρησιμοποιείται ως σήμα αναφοράς για την τεχνική PWM που καθορίζει τους παλμούς οδήγησης του διακόπτη (MOSFET) που διαθέτει ο μετατροπέας και άρα την τάση εξόδου του.

Επίσης, επιστρέφοντας στο μικροδίκτυο DC με τους δύο παράλληλα συνδεδεμένους μετατροπείς, με εφαρμογή του Νόμου Τάσεων του Kirchhoff, προκύπτουν οι σχέσεις:

$$V_{load} = V_{dc}^* - i_{dc1} * (R_{d1} + R_{line1})$$

$$V_{load} = V_{dc}^* - i_{dc2} * (R_{d2} + R_{line2})$$

Επομένως:

$$\frac{i_{dc1}}{i_{dc2}} = \frac{R_{d2} + R_{line2}}{R_{d1} + R_{line1}}$$

Ο καλύτερος διαμοιρασμός του φορτίου απαιτεί $\frac{R_{d1}}{R_{d2}} = \frac{R_{line1}}{R_{line2}}$. Επιπλέον, σε μικροδίκτυα DC περιορισμένου μεγέθους όπου οι αντιστάσεις των γραμμών είναι της τάξης του 0,1mΩ ισχύουν $R_{d1} \gg R_{line1}$ και $R_{d2} \gg R_{line2}$ με αποτέλεσμα:

$$\frac{i_{dc1}}{i_{dc2}} \cong \frac{R_{d2}}{R_{d1}}$$

Οι τρόποι προσδιορισμού των αντιστάσεων R_{droop} και συνολικά οι μέθοδοι καταστολής των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων που προτείνονται από τη διεθνή βιβλιογραφία θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

2.3.2 ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΟΣ ΠΡΩΤΟΓΕΝΗΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

Ο ενεργητικός πρωτογενής έλεγχος επιτυγχάνει καλύτερη ρύθμιση της τάσης και καλύτερο διαμοιρασμό του φορτίου μέσω της επικοινωνίας των πηγών του μικροδικτύου DC. Ωστόσο, τα σφάλματα στις συνδέσεις που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία των πηγών μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα στη διαδικασία του ελέγχου.

Μορφές του ενεργητικού πρωτογενούς ελέγχου είναι:

- Centralized Control.

Με τη χρήση ενός ελεγκτή μετράται το ηλεκτρικό ρεύμα του φορτίου και στη συνέχεια διαιρείται με το πλήθος των πηγών. Το ηλεκτρικό ρεύμα που προκύπτει είναι το ηλεκτρικό ρεύμα αναφοράς.

- Master-slave Control.

Μία πηγή ορίζεται ως πηγή αναφοράς (master) και το ηλεκτρικό ρεύμα της ως ηλεκτρικό ρεύμα αναφοράς των υπόλοιπων πηγών (slaves).

- Average load sharing.

Ως ηλεκτρικό ρεύμα αναφοράς χρησιμοποιείται η μέση τιμή των ηλεκτρικών ρευμάτων των πηγών.

- Circular chain control.

Το ηλεκτρικό ρεύμα αναφοράς κάθε πηγής είναι το ηλεκτρικό ρεύμα της προηγούμενης πηγής. Το ηλεκτρικό ρεύμα αναφοράς της πρώτης πηγής της κυκλικής αλυσίδας που σχηματίζεται νοητά είναι το ηλεκτρικό ρεύμα της τελευταίας.

2.4 ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗΣ ΚΑΙ ΤΡΙΤΟΓΕΝΗΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

Ο δευτερογενής έλεγχος έχει ως στόχο τη διατήρηση της τάσης στο ζυγό του φορτίου (DC bus) σε ένα επιθυμητό επίπεδο.

Μορφές του δευτερογενούς ελέγχου είναι:

- Centralized Control.

Ένας ελεγκτής χρησιμοποιείται για να αντιμετωπίζεται η διακύμανση της τάσης που προκαλείται στην τάση του ζυγού του φορτίου από την εφαρμογή του πρωτογενούς ελέγχου. Η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί κάποιου είδους επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο.

- Decentralized Control.

Κάθε πηγή ελέγχει αυτόνομα την τάση εξόδου της ώστε να διατηρείται σταθερή η τάση του ζυγού του φορτίου στο επιθυμητό επίπεδο. Υπάρχουν δύο είδη decentralized control, με επικοινωνία μεταξύ των πηγών και χωρίς επικοινωνία μεταξύ των πηγών.

- Hybrid control.

Συνδυάζονται οι στρατηγικές ελέγχου που αναφέρθηκαν για να επιτυγχάνονται καλύτερα αποτελέσματα μέσω της αξιοποίησης των πλεονεκτημάτων κάθε στρατηγικής.

Ο τριτογενής έλεγχος καθορίζει και ρυθμίζει τις ανταλλαγές ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ του μικροδικτύου DC και του κύριου δικτύου σε συνεργασία με το διαχειριστή το

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] C. N. Papadimitriou, E. I. Zountouridou, N. D. Hatziargyriou, Review of Hierarchical Control in DC microgrids. Paper was published in May 2015 by journal “Electric Power Systems Research”.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΩΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΟΥΝΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ Η ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΔΙΕΘΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αντιμετώπιση του φαινομένου των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων είναι κρίσιμης σημασίας για να χρησιμοποιηθούν ευρύτερα τα μικροδίκτυα DC. Οι μέθοδοι που προτείνονται μέχρι και σήμερα από τη διεθνή βιβλιογραφία και καταγράφονται στη συνέχεια βασίζονται κυρίως στη συμβατική μέθοδο Droop που αναλύθηκε στο δεύτερο κεφάλαιο. Παράλληλα, υπάρχουν τεχνικές ρύθμισης των τάσεων εξόδου των μετατροπέων ενός μικροδικτύου DC που στοχεύουν στον καλό διαμοιρασμό του φορτίου και την καταστολή των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων αλλά δε χρησιμοποιούν τις χαρακτηριστικές καμπύλες Droop των μετατροπέων. Ανάμεσα στις συγκεκριμένες τεχνικές είναι και η τεχνική που παρουσιάζεται στην υποενότητα 3.2 του κεφαλαίου. Αξιοπρόσεκτη, επίσης, τεχνική ελέγχου είναι η τεχνική που παρουσιάζεται στην υποενότητα 3.6, βασίζεται στη συμβατική μέθοδο Droop και ταυτόχρονα χρησιμοποιεί ένα δίκτυο επικοινωνίας χαμηλού εύρους ζώνης LBC (Low-Bandwidth Communication) μεταξύ δύο μετατροπέων για τον έλεγχο των τάσεων εξόδου τους και την καταστολή του μεταξύ τους κυκλοφορούντος ηλεκτρικού ρεύματος.

Η σημαντικότερη μέθοδος από τις μεθόδους που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια είναι η μέθοδος που υπολογίζει τις εικονικές αντιστάσεις εξόδου R_{droop} της συμβατικής μεθόδου Droop με στόχο να επιτυγχάνεται ο καλύτερος δυνατός διαμοιρασμός του φορτίου μέσω της μεγαλύτερης δυνατής καταστολής των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων και ταυτόχρονα η μεγαλύτερη δυνατή μείωση των απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας στις γραμμές μεταφοράς που αυξάνονται με την αύξηση των αντιστάσεων R_{droop} . Για το σκοπό αυτό η συγκεκριμένη μέθοδος εισάγει ένα δείκτη που ονομάζεται Droop Index (DI).

3.2 ΚΑΤΑΣΤΟΛΗ ΤΩΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΟΥΝΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ ΣΕΙΡΑΣ [1]

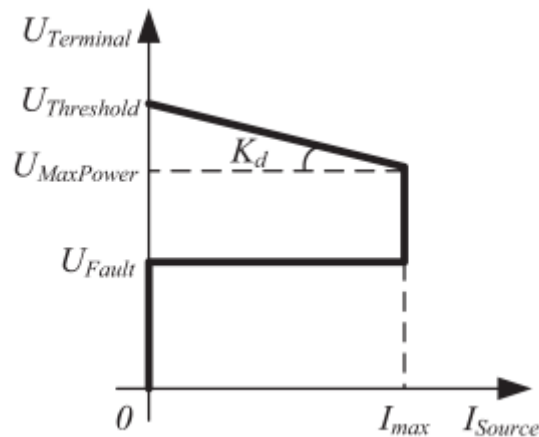
Στη συγκεκριμένη μέθοδο μία μεταβλητή αντίσταση τοποθετείται σε σειρά με κάθε πηγή ώστε να παρέχει μία πτώση τάσης στην τάση εξόδου της. Στόχος αποτελεί οι τάσεις εξόδου όλων των πηγών με την κατάλληλη ρύθμιση των μεταβλητών αντιστάσεων να είναι ίσες με μία συγκεκριμένη τιμή για να αποφεύγεται η δημιουργία κυκλοφορούντος ηλεκτρικού ρεύματος.

Η χρήση των αντιστάσεων σειράς, ωστόσο, δε χρησιμοποιείται ευρέως μιας και συνεπάγεται υψηλές απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας στις αντιστάσεις σειράς, ειδικά όταν η πτώση τάσης στην τάση εξόδου κάθε πηγής είναι μεγάλη.

3.3 Η ΜΕΘΟΔΟΣ VbPV (Voltage-based Power-Voltage Control Method) [2]

Η μέθοδος VbPV (Voltage-based Power-Voltage Control Method) χρησιμοποιείται κυρίως σε μικροδίκτυα που τροφοδοτούν ευαίσθητα φορτία. Στη συγκεκριμένη κατηγορία μικροδικτύων προτεραιότητα έχει η διατήρηση της διακύμανσης της τάσης από την ονομαστική τιμή σε χαμηλά επίπεδα.

Στο πλαίσιο της μεθόδου VbPV χρησιμοποιείται για κάθε πηγή η καμπύλη τάσης εξόδου-ηλεκτρικού ρεύματος εξόδου που παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



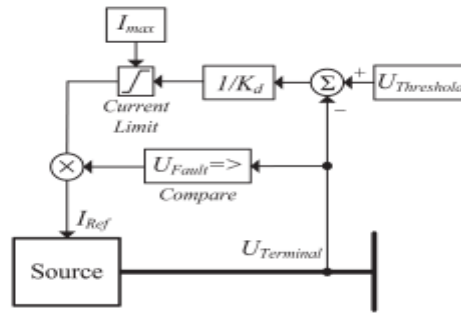
Εικόνα 3.1 Η καμπύλη τάσης εξόδου-ηλεκτρικού ρεύματος εξόδου κάθε πηγής που χρησιμοποιείται στο πλαίσιο της μεθόδου VbPV.

Εύκολα προκύπτει ότι η καμπύλη κάθε πηγής χαρακτηρίζεται από πέντε παραμέτρους, την τάση κατωφλίου $V_{threshold}$, την τάση σφάλματος V_{fault} , το συντελεστή Droop k_d , την τάση εξόδου $V_{maxpower}$ και το ηλεκτρικό ρεύμα εξόδου I_{max} , όπου επιτυγχάνεται μέγιστη ισχύς εξόδου. Ουσιαστικά η πηγή αρχίζει να παράγει ισχύ όταν η τάση εξόδου της «πέσει» κάτω από το επίπεδο της τάσης κατωφλίου. Καθώς μειώνεται η τάση εξόδου, η ισχύς εξόδου αυξάνεται μέχρι και το σημείο όπου φτάνει τη μέγιστη τιμή της. Στο συγκεκριμένο σημείο το ηλεκτρικό ρεύμα είναι ίσο με:

$$I_{source} = \frac{V_{threshold} - V_{maxpower}}{k_d}$$

Όταν η τάση εξόδου της πηγής βρίσκεται μεταξύ των τάσεων $V_{maxpower}$ και V_{fault} , το ηλεκτρικό ρεύμα εξόδου παραμένει σταθερό και ίσο με τη μέγιστη τιμή του. Όταν η τάση εξόδου της πηγής «πέσει» κάτω από τα επίπεδο της τάσης σφάλματος, η πηγή παύει να παράγει ισχύ.

Το κύκλωμα ελέγχου που χρησιμοποιείται για κάθε πηγή απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί. Η απλότητά του καθιστά τη συγκεκριμένη μέθοδο αξιόπιστη και πρακτική.



Εικόνα 3.2 Το κύκλωμα που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της τάσης εξόδου κάθε πηγής στο πλαίσιο της μεθόδου VbPV.

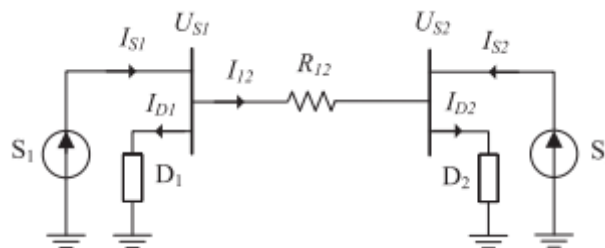
Όσον αφορά τον προσδιορισμό των παραμέτρων της καμπύλης τάσης εξόδου-ηλεκτρικού ρεύματος εξόδου, το επίπεδο της τάσης σφάλματος V_{fault} εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του μικροδικτύου και κυρίως από το χαμηλότερο επίπεδο της επιτρεπόμενης τάσης και την τάση έναρξης κατάρρευσης της τάσης. Προφανώς το επίπεδο της τάσης σφάλματος είναι κοινό για όλες τις πηγές. Η τάση εξόδου $V_{maxpower}$ και το ηλεκτρικό ρεύμα εξόδου I_{max} όπου επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση της ισχύος εξόδου προκύπτουν από τις σχέσεις που ακολουθούν δοθέντων της τάσης κατωφλίου και του συντελεστή Droop.

$$I_{max} = \frac{P_{max}}{V_{maxpower}}$$

$$V_{maxpower} = V_{threshold} - I_{max} * k_d$$

Όπως έχει ήδη τονιστεί, προτεραιότητα στα μικροδίκτυα DC με ευαίσθητα φορτία έχει η παροχή τάσης στα φορτία στο επίπεδο της ονομαστικής. Επομένως, η καμπύλη τάσης εξόδου-ηλεκτρικού ρεύματος εξόδου θα πρέπει να βρίσκεται στο υψηλότερο δυνατό σημείο για να εξασφαλίζεται η παροχή σχεδόν ονομαστικής τάσης και στα πιο απομακρυσμένα φορτία. Άρα, η τάση κατωφλίου $V_{threshold}$ όλων των πηγών θα πρέπει να είναι ίση με την ανώτερη επιτρεπόμενη τάση.

Για τον υπολογισμό της κατάλληλης τιμής του συντελεστή Droop k_d χρησιμοποιείται το κύκλωμα που ακολουθεί.



Εικόνα 3.3 Το κύκλωμα που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της κατάλληλης τιμής του συντελεστή Droop k_d .

Από τις καμπύλες τάσης εξόδου-ηλεκτρικού ρεύματος εξόδου είναι γνωστό ότι:

$$V_{S1} = V_{\text{threshold}} - k_d * I_{S1} \quad (1)$$

$$V_{S2} = V_{\text{threshold}} - k_d * I_{S2} \quad (2)$$

Λύνοντας τις σχέσεις (1) και (2) ως προς την τάση κατωφλίου και εξισώνοντας προκύπτει ότι:

$$I_{S1} = I_{S2} + \frac{V_{S1} - V_{S2}}{k_d} \quad (3)$$

Στη συνέχεια, με εφαρμογή του Νόμου Ρευμάτων του Kirchhoff στους ζυγούς με τάση V_{S1} και V_{S2} και πρόσθεση κατά μέλη προσδιορίζεται το άθροισμα των ηλεκτρικών ρευμάτων I_{S1} και I_{S2} ως:

$$I_{S1} + I_{S2} = \frac{P_{D1}}{V_{S1}} + \frac{P_{D2}}{V_{S2}} \quad (4)$$

Αντικαθιστώντας το ηλεκτρικό ρεύμα I_{S1} από τη σχέση (3) στη σχέση (4) υπολογίζεται το ηλεκτρικό ρεύμα I_{S2} ως:

$$I_{S2} = \frac{1}{2} * \left(\frac{P_{D1}}{V_{S1}} + \frac{P_{D2}}{V_{S2}} \right) + \frac{1}{2 * k_d} * (V_{S1} - V_{S2})$$

ή

$$I_{S2} = \frac{1}{2} * \left(\frac{P_{D1}}{V_{S1}} + \frac{P_{D2}}{V_{S2}} \right) + \frac{1}{2 * k_d} * R_{12} * I_{12} \quad (5)$$

Επομένως, το ηλεκτρικό ρεύμα I_{S1} είναι ίσο με:

$$I_{S1} = \frac{1}{2} * \left(\frac{P_{D1}}{V_{S1}} + \frac{P_{D2}}{V_{S2}} \right) - \frac{1}{2 * k_d} * (V_{S1} - V_{S2})$$

ή

$$I_{S1} = \frac{1}{2} * \left(\frac{P_{D1}}{V_{S1}} + \frac{P_{D2}}{V_{S2}} \right) - \frac{1}{2 * k_d} * R_{12} * I_{12} \quad (6)$$

Με I_{12} συμβολίζεται το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει τη γραμμή μεταφοράς που συνδέει τους ζυγούς με τάση V_{S1} και V_{S2} και είναι ίσο με:

$$I_{12} = I_{S1} - \frac{P_{D1}}{V_{S1}}$$

ή

$$I_{12} = \frac{\frac{P_{D2}}{V_{S2}} - \frac{P_{D1}}{V_{S1}}}{2 * \left(1 + \frac{R_{12}}{2 * k_d} \right)} \quad (7)$$

Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί ότι όταν $R_{12} = 0$ ή $I_{12} = 0$ ισχύει:

$$I_{S1} = I_{S2} = \frac{1}{2} * \frac{P_{D1} + P_{D2}}{V_{GRID}}$$

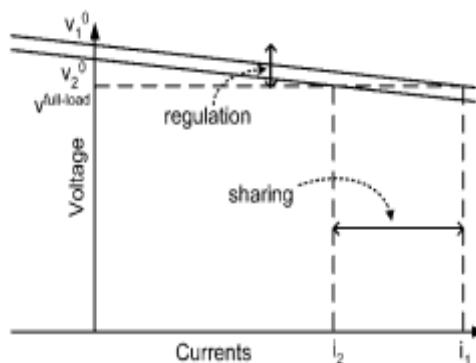
Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε και συγκεκριμένα από τη σχέση (7) συμπεραίνεται ότι η επιλογή μίας πολύ μικρής μη μηδενικής θετικής τιμής για το συντελεστή Droop k_d οδηγεί σε μεγάλη μείωση του ηλεκτρικού ρεύματος I_{12} , των απωλειών και της πτώσης τάσης στη γραμμή μεταφοράς με αποτέλεσμα $V_{S1} \approx V_{S2}$ και να μην εμφανίζεται κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα μεταξύ των πηγών.

Επιπλέον, αν ένα μέρος του καταναλισκόμενου ηλεκτρικού ρεύματος μίας περιοχής, έστω της περιοχής 2, παρέχεται από την άλλη περιοχή, δηλαδή την περιοχή 1, το ηλεκτρικό ρεύμα I_{12} αυξάνεται. Αυτό, όμως, έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται το ηλεκτρικό ρεύμα της περιοχής 1 και να αυξάνεται το ηλεκτρικό ρεύμα της περιοχής 2, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά από τις σχέσεις (5) και (6). Έτσι, εξασφαλίζεται ότι κάθε φορτίο θα τροφοδοτείται από την πλησιέστερη πηγή διεσπαρμένης παραγωγής εκτός αν η πηγή έχει φτάσει να παρέχει τη μέγιστη ισχύ της και εξακολουθεί να μην καλύπτει το φορτίο.

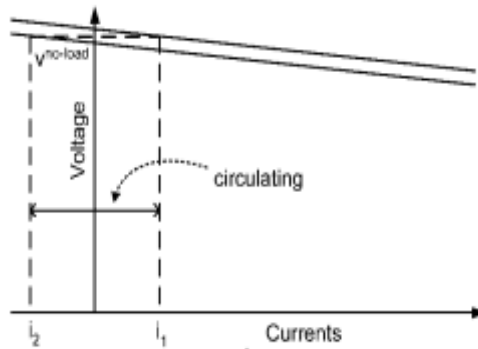
Επίσης, δοθείσης μίας πολύ μικρής μη μηδενικής θετικής τιμής του συντελεστή Droop k_d η ποσότητα $2 * \left(1 + \frac{R_{12}}{2 * k_d}\right)$ είναι ίση προσεγγιστικά με την ποσότητα $\frac{R_{12}}{k_d}$. Άρα, το ηλεκτρικό ρεύμα I_{12} θα είναι ίσο με $I_{12} = \frac{k_d}{R_{12}} * \left(\frac{P_{D2}}{V_{S2}} - \frac{P_{D1}}{V_{S1}}\right)$. Το γεγονός ότι το ηλεκτρικό ρεύμα I_{12} είναι αντιστρόφως ανάλογο της αντίστασης της γραμμής μεταφοράς R_{12} εξασφαλίζει ότι η μέθοδος VbPV αποτρέπει την αύξηση της πτώσης τάσης $V_{S1} - V_{S2}$ κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς με την αύξηση του μήκους της.

3.4 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟΣ ΕΛΕΓΚΤΗΣ DROOP ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΑΡΑΛΛΗΛΙΣΜΟ ΔΥΟ DC-DC ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΣΕ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ DC [3]

Κατά τον παραλληλισμό δύο DC-DC μετατροπέων υπάρχει το ενδεχόμενο οι ονομαστικές τάσεις να είναι διαφορετικές μεταξύ τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σε συνθήκες πλήρους φορτίου τον άνισο διαμοιρασμό του, όπως έχει σημειωθεί ήδη από το δεύτερο κεφάλαιο και φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Στη συνέχεια, αποτυπώνεται και το σημείο λειτουργίας του συστήματος κατά την εν κενώ λειτουργία.



Εικόνα 3.4 Ο άνισος διαμοιρασμός του φορτίου λόγω της διαφοράς που υπάρχει στις ονομαστικές τάσεις εξόδου των δύο παράλληλα συνδεδεμένων DC-DC μετατροπέων που χρησιμοποιούνται για την τροφοδότησή του.



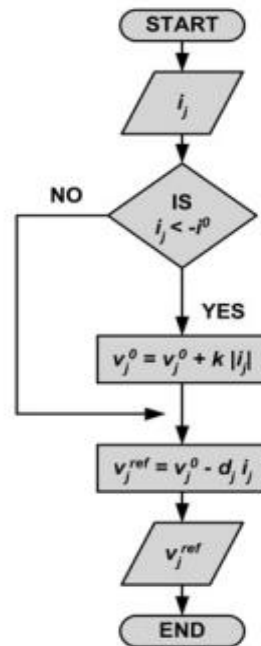
Εικόνα 3.5 Το σημείο λειτουργίας του συστήματος δύο παράλληλα συνδεδεμένων DC-DC μετατροπέων κατά την εν κενώ λειτουργία και η εμφάνιση κυκλοφορούντος ηλεκτρικού ρεύματος λόγω της διαφοράς των ονομαστικών τάσεων εξόδου των μετατροπέων.

Από το δεύτερο σχήμα εύκολα συμπεραίνεται ότι κατά την εν κενώ λειτουργία η διαφορά στις ονομαστικές τάσεις προκαλεί κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα μεταξύ των μετατροπέων που είναι ίσο με $i_c = \frac{v_1^* - v_2^*}{d_1 + d_2}$, όπου $d_1 = d_2 = d$ ο συντελεστής Droop που έχει επιλεγεί σκόπιμα μικρός ώστε να εξασφαλίζεται καλή ρύθμιση της τάσης.

Επίσης, από τα δύο σχήματα που παρατέθηκαν φαίνεται ότι το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα είναι ίσο με τη διαφορά των ηλεκτρικών ρευμάτων των μετατροπέων από την ιδανική τιμή τους κατά τη λειτουργία πλήρους φορτίου.

Ο εκμηδενισμός του κυκλοφορούντος ηλεκτρικού ρεύματος απαιτεί οι ονομαστικές τάσεις των μετατροπέων να είναι ίσες μεταξύ τους και άρα την αύξηση της ονομαστικής τάσης του μετατροπέα με αρνητικό ηλεκτρικό ρεύμα μιας και αυτός ο μετατροπέας έχει τη χαμηλότερη ονομαστική τάση. Η ονομαστική τάση του μετατροπέα με θετικό ηλεκτρικό ρεύμα θα παραμείνει αμετάβλητη καθ' όλη τη διαδικασία ελέγχου. Η νέα ονομαστική τάση του μετατροπέα με αρνητικό ηλεκτρικό ρεύμα – εν προκειμένω του μετατροπέα (2)- θα χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο του συμβατικού ελέγχου Droop για να υπολογιστεί η τάση αναφοράς.

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής που ακολουθεί.

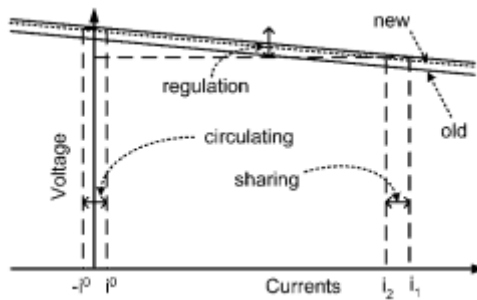


Εικόνα 3.6 Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου που χρησιμοποιείται κατά τον τροποποιημένο έλεγχο Droop.

Ως είσοδος στον ελεγκτή εισέρχεται το ηλεκτρικό ρεύμα του μετατροπέα που ιδανικά θα έπρεπε να συγκρίνεται με το μηδέν. Παρόλα αυτά, για λόγους ευστάθειας του συστήματος, επιλέγεται να συγκρίνεται με ένα ηλεκτρικό ρεύμα αναφοράς που θα συμβολίζεται με i^0 από εδώ και πέρα. Η ονομαστική τάση θα μεταβάλλεται μόνο αν $i[n] < -i^0$, όπου το n είναι το σύμβολο του χρόνου στη διακριτή περιοχή και είναι ίσο με το ηλικίο του χρόνου προς την περίοδο δειγματοληψίας T_S . Στην περίπτωση που η παραπάνω ανισότητα ισχύει η ονομαστική τάση ακολουθεί τη σχέση $v^*[n] = v^*[n - 1] + k * |i[n]|$, όπου με k συμβολίζεται το κέρδος τάσης σε V/A. Τέλος, η νέα τιμή της ονομαστικής τάσης χρησιμοποιείται από τον ελεγκτή Droop για τον υπολογισμό της τάσης αναφοράς με βάση τη γνωστή σχέση $v_{ref}[n] = v^*[n] - d * i[n]$.

Πρακτικά, κατά την έναρξη λειτουργίας του συστήματος, οι μετατροπείς ενεργοποιούνται. Τα φορτία, όμως, παραμένουν αποσυνδεδεμένα μέχρι όλοι οι μετατροπείς να ενεργοποιηθούν και οι ονομαστικές τάσεις τους να σταθεροποιηθούν, δηλαδή τα φορτία θα μείνουν αποσυνδεδεμένα για κάποιο διάστημα. Στη διάρκειά του, λόγω της διαφοράς μεταξύ των ονομαστικών τάσεων των μετατροπέων θα αναπτυχθεί κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα. Η ονομαστική τάση του μετατροπέα με ηλεκτρικό ρεύμα μικρότερο του ηλεκτρικού ρεύματος αναφοράς $-i^0$ θα αυξάνεται περιοδικά - με περίοδο T_S - με βάση τη σχέση $v^*[n] = v^*[n - 1] + k * |i[n]|$, όπως έχει ήδη σημειωθεί, μέχρι και να ισχύσει $i[n] = -i^0$. Αφού υπολογιστεί η νέα τιμή της ονομαστικής τάσης, υπολογίζεται η τάση αναφοράς για τον προσδιορισμό της τάσης εξόδου του μετατροπέα με βάση τη συμβατική μέθοδο Droop.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τροποποιημένες καμπύλες Droop των μετατροπέων. Από το σχήμα φαίνεται ότι ο διαμοιρασμός του φορτίου βελτιώνεται σημαντικά μιας και η διαφορά μεταξύ των ηλεκτρικών ρευμάτων των μετατροπέων από την ιδανική τιμή τους και το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα τείνει να εξισωθεί με το ηλεκτρικό ρεύμα αναφοράς i^0 .



Εικόνα 3.7 Οι τροποποιημένες καμπύλες Droop των δύο παράλληλα συνδεδεμένων DC-DC μετατροπέων.

Όσον αφορά τον προσδιορισμό των παραμέτρων i^0 και k , ισχύουν τα εξής:

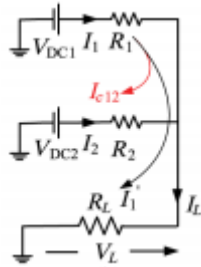
- Ιδανικά, το ηλεκτρικό ρεύμα αναφοράς θα έπρεπε να είναι ίσο με το μηδέν. Όμως, στην πραγματική εφαρμογή κατά τη μέτρηση του ηλεκτρικού ρεύματος ενός μετατροπέα εισάγεται ένα σφάλμα i^{err} . Για την εξήγηση της σχέσης του σφάλματος μέτρησης με την επιλογή του ηλεκτρικού ρεύματος αναφοράς υποτίθεται ότι τα ηλεκτρικά ρεύματα και των δύο μετατροπέων που μετρώνται είναι μικρότερα των πραγματικών. Έτσι, ακόμα και αν οι ονομαστικές τάσεις των μετατροπέων είναι ίσες και τα πραγματικά ηλεκτρικά ρεύματα τους είναι ίσα με το μηδέν κατά την εν κενώ λειτουργία, τα μετρούμενα ηλεκτρικά ρεύματα θα είναι ίσα με $-i^{err}$. Επομένως, αν επιλεγεί $i^0 < i^{err}$, η συνθήκη $i < -i^0$ θα ισχύει και για τους δύο μετατροπείς με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι ονομαστικές τάσεις κι των δύο κάνοντας το σύστημα ασταθές. Επιλέγεται, λοιπόν, $i^0 > i^{err}$.
- Το κέρδος τάσης υπολογίζεται από τη σχέση $\frac{dv^*}{dt} = \frac{v^*[n]-v^*[n-1]}{T_s} = \frac{k*|i[n]|}{T_s}$. Εύκολα φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερη τιμή έχει το κέρδος τάσης τόσο ταχύτερα καταστέλλεται το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα.

Η συγκεκριμένη μέθοδος κατορθώνει να καταστέλλει ικανοποιητικά το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα. Εντούτοις, όμως, είναι αναποτελεσματική για παράλληλη σύνδεση μετατροπέων σε μικροδίκτυο DC, επειδή δε μπορούν να υπάρξουν συνθήκες εν κενώ λειτουργίας. Επίσης, η συγκεκριμένη μέθοδος προϋποθέτει ότι οι μετατροπείς συνδέονται αμέσως στο φορτίο χωρίς την παρεμβολή καλωδίου. Για αυτό το λόγο, αγνοεί πλήρως τις αντιστάσεις γραμμών μεταφοράς.

3.5 Η ΜΕΘΟΔΟΣ DI (DROOP INDEX) [4] [5]

Κατά την ανάπτυξη της συγκεκριμένης μεθόδου πραγματοποιήθηκε εκτενής μελέτη των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων σε ένα μικροδίκτυο DC με δύο παράλληλα συνδεδεμένους μετατροπείς.

Αρχικά, η μελέτη κατέληξε σε συγκεκριμένες σχέσεις για τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς του μικροδικτύου DC και για το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα που αναπτύσσεται μεταξύ των δύο μετατροπέων όταν υπάρχει διαφορά μεταξύ των τάσεων εξόδου τους. Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin του μικροδικτύου DC απεικονίζεται στη συνέχεια.



Εικόνα 3.8 Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin ενός μικροδικτύου DC με δύο παράλληλα συνδεδεμένους μετατροπέις.

Εφαρμόζοντας το Νόμο Τάσεων του Kirchhoff, προκύπτουν οι σχέσεις:

$$V_{DC1} - I_1 * R_1 - I_L * R_L = 0$$

$$V_{DC2} - I_2 * R_2 - I_L * R_L = 0$$

Λύνοντας το σύστημα των δύο εξισώσεων με αγνώστους I_1 , I_2 , προκύπτουν οι σχέσεις:

$$I_1 = \frac{R_2 * V_{DC1}}{R_1 * R_2 + R_1 * R_L + R_2 * R_L} + \frac{(V_{DC1} - V_{DC2}) * R_L}{R_1 * R_2 + R_1 * R_L + R_2 * R_L} \quad (1)$$

$$I_2 = \frac{R_1 * V_{DC2}}{R_1 * R_2 + R_1 * R_L + R_2 * R_L} - \frac{(V_{DC1} - V_{DC2}) * R_L}{R_1 * R_2 + R_1 * R_L + R_2 * R_L} \quad (2)$$

Αν θεωρηθεί ότι $R_L \gg R_1, R_2$, στις σχέσεις (1) και (2) μπορεί να παραληφθεί από τους παρονομαστές των κλασμάτων το γινόμενο $R_1 * R_2$, οπότε:

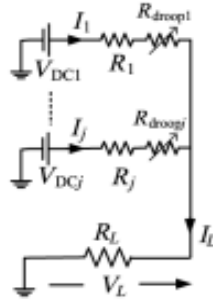
$$I_1 = \frac{R_2 * V_{DC1}}{R_1 * R_L + R_2 * R_L} + \frac{V_{DC1} - V_{DC2}}{R_1 + R_2}$$

$$I_2 = \frac{R_1 * V_{DC2}}{R_1 * R_L + R_2 * R_L} - \frac{V_{DC1} - V_{DC2}}{R_1 + R_2}$$

Παρατηρείται, επομένως, ότι στις σχέσεις που δίνουν τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς ο πρώτος προσθετός είναι το μέρος του ηλεκτρικού ρεύματος που καταλήγει στο φορτίο ενώ ο δεύτερος προσθετός υφίσταται όταν $V_{DC1} \neq V_{DC2}$ και εκφράζει το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα που είναι ίσο με:

$$I_{C12} = -I_{C21} = \frac{V_{DC1} - V_{DC2}}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

Η μέθοδος που προτείνεται για την καταστολή των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων βασίζεται στη συμβατική μέθοδο Droop. Το νέο στοιχείο που εισάγεται είναι η επιλογή ενός διαρκώς μεταβαλλόμενου συντελεστή Droop με βάση τα χαρακτηριστικά και τις μεταβλητές του κυκλώματος. Στη συνέχεια παρατίθεται το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin του μικροδικτύου DC μαζί με τις εικονικές αντιστάσεις εξόδου R_{droop} .



Εικόνα 3.9 Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin ενός μικροδικτύου DC με n παράλληλα συνδεδεμένους μετατροπείς μαζί με τις εικονικές αντιστάσεις εξόδου R_{droop} .

Όπως έχει σημειωθεί ήδη από την εισαγωγή, η μέθοδος Droop Index (DI) προσπαθεί να επιτύχει τον καλύτερο δυνατό διαμορισμό του φορτίου μέσω της μεγαλύτερης δυνατής καταστολής του κυκλοφορούντος ηλεκτρικού ρεύματος και ταυτόχρονα τη μεγαλύτερη δυνατή μείωση των απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας στις γραμμές μεταφοράς που αυξάνονται με την αύξηση των αντιστάσεων R_{droop} . Για αυτό το λόγο η μέθοδος Droop Index εισάγει το δείκτη DI που είναι ίσος με:

$$DI = \frac{1}{2} * (|I_1 - I_2| * N_I + P_{loss} * N_P)$$

Με P_{loss} συμβολίζονται οι απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας στις γραμμές μεταφοράς που είναι ίσες με:

$$P_{loss} = (I_1^2 * (R_1 + R_{droop1}) + I_2^2 * (R_2 + R_{droop2}))$$

Οι συντελεστές N_I και N_P χρησιμοποιούνται για την κανονικοποίηση της διαφοράς μεταξύ των ηλεκτρικών ρευμάτων των γραμμών μεταφοράς και των απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας αντίστοιχά και άρα είναι ίσες με:

$$N_I = \frac{1}{\max(|I_1 - I_2|)}$$

$$N_P = \frac{1}{\max(P_{loss})}$$

Αν υποθεθεί ότι $x = \frac{V_{DC1}}{V_{DC2}}$ και $y = \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_{droop1}}{R_{droop2}} = \frac{R_1 + R_{droop1}}{R_2 + R_{droop2}}$, τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς I_1, I_2 μετά από την προσθήκη των αντιστάσεων R_{droop} είναι ίσα με:

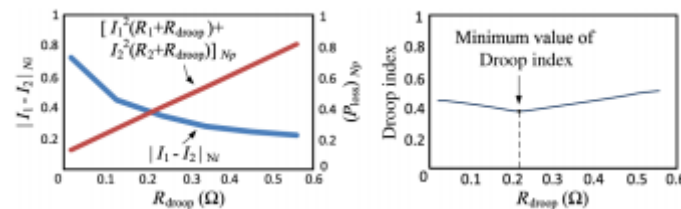
$$I_1 = \frac{((R_2 + R_{droop2}) + R_L) * x * V_{DC2} - R_L * V_{DC2}}{y * (R_2 + R_{droop2})^2 + y * (R_2 + R_{droop2}) * R_L + (R_2 + R_{droop2}) * R_L}$$

$$I_2 = \frac{(y * (R_2 + R_{droop2}) + R_L) * V_{DC2} - R_L * x * V_{DC2}}{y * (R_2 + R_{droop2})^2 + y * (R_2 + R_{droop2}) * R_L + (R_2 + R_{droop2}) * R_L}$$

Έτσι, τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς και κατ' επέκταση οι απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας και ο δείκτης DI εκφράζονται αποκλειστικά συναρτήσει της αντίστασης R_{droop2} .

Ουσιαστικά, κατά την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου, η αντίσταση R_{droop2} αυξάνεται μέχρι και τη μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει και είναι ίση με το πηλίκο της μέγιστης δυνατής διακύμανσης της τάσης εξόδου προς το ονομαστικό ηλεκτρικό ρεύμα εξόδου του μετατροπέα 2. Η μέγιστη διακύμανση της τάσης εξόδου ενός μετατροπέα με ονομαστική τιμή τα 326V είναι ίση με $\pm 5\% * 326V$, δηλαδή $\pm 16V$.

Με την αύξηση της αντίστασης R_{droop2} καταστέλλεται το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα και μειώνεται η διαφορά $|I_1 - I_2|$ με αποτέλεσμα να βελτιώνεται ο διαμοιρασμός του φορτίου. Παράλληλα, όμως, αυξάνονται οι απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας στις γραμμές μεταφοράς. Στη συνέχεια παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις $|I_1 - I_2| * N_I - R_{droop2}$, $P_{loss} * N_P - R_{droop2}$ και $DI - R_{droop2}$.



Εικόνα 3.10 Οι γραφικές παραστάσεις $|I_1 - I_2| * N_I - R_{droop2}$, $P_{loss} * N_P - R_{droop2}$ και $DI - R_{droop2}$.

Από τις γραφικές παραστάσεις εύκολα προκύπτει ότι υπάρχει συγκεκριμένη τιμή της αντίστασης R_{droop2} όπου ο δείκτης DI γίνεται ελάχιστος. Η συγκεκριμένη τιμή εξασφαλίζει βέλτιστο αποτέλεσμα και ως προς την καταστολή του κυκλοφορούντος ηλεκτρικού ρεύματος και ως προς τη μείωση των απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας και άρα θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της τάσης αναφοράς για τον προσδιορισμό της τάσης εξόδου του μετατροπέα (2) στο πλαίσιο της συμβατικής μεθόδου Droop. Ως προς την αντίσταση R_{droop1} θα ισχύει $R_{droop1} = \frac{R_1}{R_2} * R_{droop2} = y * R_{droop2}$.

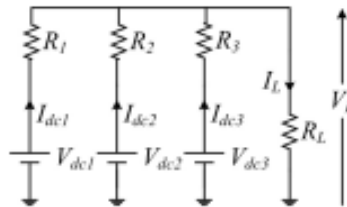
Συμπερασματικά, η μέθοδος DI καταστέλλει ικανοποιητικά, αλλά δεν εξαλείφει το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα με αποτέλεσμα να μην επιτυγχάνει τον καλύτερο δυνατό διαμοιρασμό του φορτίου. Παρόλα αυτά, εγγυάται τη βέλτιστη λύση για το σύστημα λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας στις γραμμές μεταφοράς.

Τα δύο βασικά προβλήματα που αντιμετωπίζει η μέθοδος DI είναι:

- Το γεγονός ότι δεν ικανοποιεί το σενάριο «plug-and-play» από την άποψη ότι για κάθε αλλαγή της τοπολογίας χρειάζεται εκ νέου υπολογισμός των ηλεκτρικών ρευμάτων των γραμμών μεταφοράς, των απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας, του δείκτη DI και των αντιστάσεων R_{droop} .
- Το γεγονός ότι κατά τους υπολογισμούς απαιτείται η γνώση χαρακτηριστικών του δικτύου που δεν είναι εύκολα γνωστά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι αντιστάσεις των γραμμών μεταφοράς που συνήθως δε μπορούν να προσδιοριστούν με ακρίβεια.

3.6 ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ DROOP ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ DROOP [6]

Κατά την παρουσίαση της συγκεκριμένης μεθόδου θα χρησιμοποιηθεί μικροδίκτυο DC με τρεις παράλληλα συνδεδεμένους μετατροπείς. Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 3.11 Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin ενός μικροδικτύου DC με τρεις παράλληλα συνδεδεμένους μετατροπείς.

Με βάση το κύκλωμα προκύπτουν τα κυκλοφορούντα ηλεκτρικά ρεύματα μεταξύ των μετατροπέων I_{c12} , I_{c23} και I_{c13} ως:

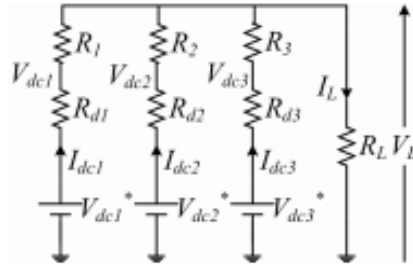
$$I_{c12} = \frac{(V_{dc1} - V_{dc2}) * R_L * R_3}{R_1 * R_2 * R_3 + R_1 * R_2 * R_L + R_2 * R_3 * R_L + R_1 * R_3 * R_L}$$

$$I_{c23} = \frac{(V_{dc2} - V_{dc3}) * R_L * R_1}{R_1 * R_2 * R_3 + R_1 * R_2 * R_L + R_2 * R_3 * R_L + R_1 * R_3 * R_L}$$

$$I_{c13} = \frac{(V_{dc1} - V_{dc3}) * R_L * R_2}{R_1 * R_2 * R_3 + R_1 * R_2 * R_L + R_2 * R_3 * R_L + R_1 * R_3 * R_L}$$

Έτσι, αποδεικνύεται για μία ακόμη φορά ότι κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα μεταξύ δύο οποιωνδήποτε μετατροπέων ενός μικροδικτύου DC δημιουργείται μόνο όταν οι τάσεις εξόδου τους είναι διαφορετικές μεταξύ τους. Επίσης, το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα μεταξύ δύο οποιωνδήποτε μετατροπέων μηδενίζει όταν η αντίσταση του φορτίου ή η αντίσταση της γραμμής μεταφοράς που συνδέει τον άλλο μετατροπέα με το ζυγό του φορτίου είναι ίση με το μηδέν. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά μεταξύ των τάσεων εξόδου δύο μετατροπέων ή η αντίσταση του φορτίου τόσο μεγαλύτερο είναι το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα ενώ όσο μικρότερες είναι οι αντιστάσεις των γραμμών μεταφοράς που συνδέουν τους δύο μετατροπείς με το ζυγό του φορτίου τόσο μικρότερο είναι το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα.

Η μέθοδος που προτείνεται για την καταστολή των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων βασίζεται στη συμβατική μέθοδο Droop. Όπως και στη μέθοδο DI, επιλέγεται ένας διαρκώς μεταβαλλόμενος συντελεστής Droop με βάση τις μεταβλητές του κυκλώματος. Στη συνέχεια παρατίθεται το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin του μικροδίκτυου DC μαζί τις εικονικές αντιστάσεις εξόδου R_{droop} .



Εικόνα 3.12 Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin ενός μικροδίκτυου DC με τρεις παράλληλα συνδεδεμένους μετατροπείς μαζί με τις εικονικές αντιστάσεις εξόδου R_{droop} .

Οι συντελεστές Droop R_{d1} , R_{d2} και R_{d3} με βάση τη μέθοδο που παρουσιάζεται είναι ίσοι με:

$$R_{d1} = \frac{|V_{dc1} - V_{dc2}| + |V_{dc1} - V_{dc3}|}{I_L}$$

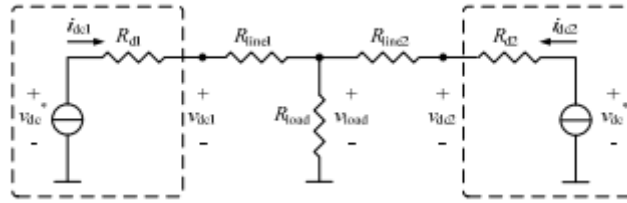
$$R_{d2} = \frac{|V_{dc1} - V_{dc2}| + |V_{dc2} - V_{dc3}|}{I_L}$$

$$R_{d3} = \frac{|V_{dc1} - V_{dc3}| + |V_{dc2} - V_{dc3}|}{I_L}$$

Με βάση τις σχέσεις που παρατέθηκαν εύκολα προκύπτει η αποτελεσματικότητα της μεθόδου στην καταστολή των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων. Έτσι, αν υπάρξει διαφορά στις τάσεις εξόδου μεταξύ δύο οποιωνδήποτε μετατροπέων, έστω του (1) και του (2), οι συντελεστές Droop R_{d1} και R_{d2} θα αυξηθούν και θα καταστείλουν το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα I_{c12} . Επίσης, αν υπάρξει αύξηση στην αντίσταση του φορτίου και άρα μείωση του ηλεκτρικού ρεύματος που το διαρρέει, προκαλείται πάλι αύξηση των συντελεστών Droop με στόχο την καταστολή του κυκλοφορούντος ηλεκτρικού ρεύματος.

3.7 ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ DROOP ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΧΑΜΗΛΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΖΩΝΗΣ (LBC) ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ [7]

Η συγκεκριμένη μέθοδος σχεδιάστηκε για να εξασφαλίσει καλό διαμοιρασμό του φορτίου και καταστολή του κυκλοφορούντος ηλεκτρικού ρεύματος σε μικροδίκτυο DC με δύο παράλληλα συνδεδεμένους μετατροπείς. Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin του μικροδίκτυου DC μαζί με τις εικονικές αντιστάσεις εξόδου R_{droop} απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 3.13 Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin ενός μικροδικτύου DC με δύο παράλληλα συνδεδεμένους μετατροπείς.

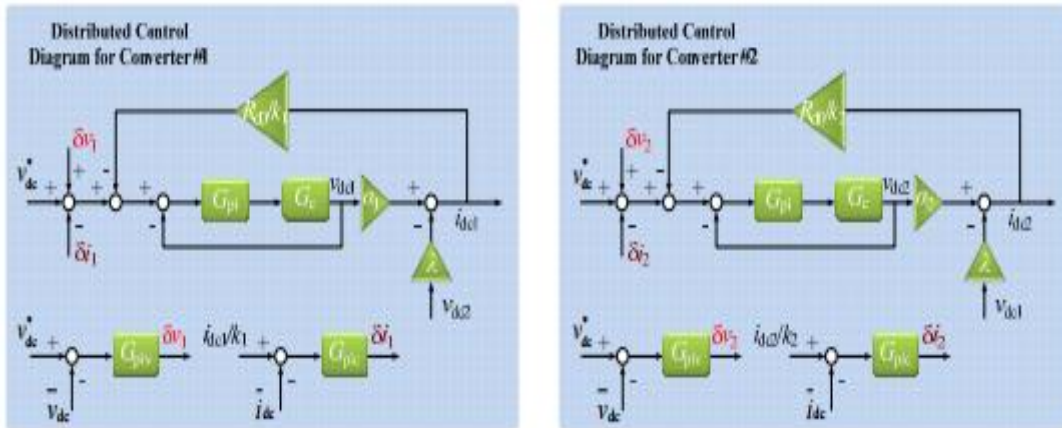
Με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin προκύπτουν τα ηλεκτρικά ρεύματα εξόδου των δύο μετατροπέων ως $i_{dc1} = \alpha_1 * v_{dc1} - \lambda * v_{dc2}$ και $i_{dc2} = \alpha_2 * v_{dc2} - \lambda * v_{dc1}$ με:

$$\alpha_1 = \frac{R_{line2} + R_{load}}{R_{line1} * R_{line2} + R_{line1} * R_{load} + R_{line2} * R_{load}}$$

$$\alpha_2 = \frac{R_{line1} + R_{load}}{R_{line1} * R_{line2} + R_{line1} * R_{load} + R_{line2} * R_{load}}$$

$$\lambda = \frac{R_{load}}{R_{line1} * R_{line2} + R_{line1} * R_{load} + R_{line2} * R_{load}}$$

Τα κυκλώματα ελέγχου που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των τάσεων εξόδου των δύο μετατροπέων παρουσιάζονται στα σχήματα που παρατίθενται:



Εικόνα 3.14 Τα κυκλώματα ελέγχου που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των τάσεων εξόδου των δύο μετατροπέων.

Από τα σχήματα εύκολα προκύπτει ότι η μέθοδος που παρουσιάζεται βασίζεται στο συμβατικό έλεγχο Droop. Οι τάσεις αναφοράς για τους δυο μετατροπείς είναι ίσες με:

$$v_{dc1} = \left(v_{dc}^* + (v_{dc}^* - \overline{v_{dc1}}) * G_{piv} - \left(\frac{i_{dc1}}{k_1} - \overline{i_{dc1}} \right) * G_{pic} - \frac{R_{d0}}{k_1} * G_{lpf} * i_{dc1} \right) * G_v$$

$$v_{dc2} = \left(v_{dc}^* + (v_{dc}^* - \overline{v_{dc2}}) * G_{piv} - \left(\frac{i_{dc2}}{k_2} - \overline{i_{dc2}} \right) * G_{pic} - \frac{R_{d0}}{k_2} * G_{lpf} * i_{dc2} \right) * G_v$$

Στις σχέσεις που παρατέθηκαν:

- Με G_v συμβολίζεται η συνάρτηση μεταφοράς του τοπικού βρόχου ελέγχου της τάσης που είναι ίση με $G_v = \frac{G_{pi} * G_c}{1 + G_{pi} * G_c}$.
- Οι σταθερές k_1, k_2 έχουν τιμές ώστε ο λόγος $\frac{k_1}{k_2}$ να εκφράζει τον επιθυμητό διαμοιρασμό του φορτίου μεταξύ των μετατροπέων, δηλαδή να ισχύει $\frac{k_1}{k_2} = \frac{i_{dc1}}{i_{dc2}}$.
- Με G_{lpf} συμβολίζεται η συνάρτηση μεταφοράς του βαθυπερατού φίλτρου που χρησιμοποιείται για το ηλεκτρικό ρεύμα εξόδου κάθε μετατροπέα και είναι ίσο με $G_{lpf} = \frac{\omega_c}{\omega_c + s}$, όπου ω_c η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου.
- Με $\overline{v_{dcj}}$ ($j = 1, 2$) συμβολίζεται η μέση τιμή των τάσεων εξόδου και με $\overline{i_{dcj}}$ ($j = 1, 2$) η μέση τιμή των ηλεκτρικών ρευμάτων εξόδου των μετατροπέων. Κατά τους υπολογισμούς θα χρειαστούν $v_{dc1}, i_{dc1}, v_{dc2}$ και i_{dc2} . Όμως, για το μετατροπέα (1), τα v_{dc1}, i_{dc1} είναι τοπικές μεταβλητές ενώ τα v_{dc2}, i_{dc2} πρέπει να μεταφερθούν από το μετατροπέα (2). Αντίστοιχα, για το μετατροπέα (2), τα v_{dc2}, i_{dc2} είναι τοπικές μεταβλητές ενώ τα v_{dc1}, i_{dc1} πρέπει να μεταφερθούν από το μετατροπέα (1). Άρα, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα δίκτυο επικοινωνίας χαμηλού εύρους ζώνης (LBC) μεταξύ των δύο μετατροπέων. Λόγω της χρήσης δικτύου LBC δημιουργείται η ανάγκη να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς η καθυστέρηση του δικτύου τ . Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται η συνάρτηση G_d που είναι ίση με $G_d = \frac{1}{1 + \tau * s}$. Επομένως, τα $\overline{v_{dc1}}, \overline{i_{dc1}}, \overline{v_{dc2}}$ και $\overline{i_{dc2}}$ είναι ίσα με:

$$\overline{v_{dc1}} = \frac{v_{dc1} + G_d * v_{dc2}}{2}$$

$$\overline{i_{dc1}} = \frac{\frac{i_{dc1}}{k_1} + G_d * \frac{i_{dc2}}{k_2}}{2}$$

$$\overline{v_{dc2}} = \frac{v_{dc2} + G_d * v_{dc1}}{2}$$

$$\overline{i_{dc2}} = \frac{\frac{i_{dc2}}{k_2} + G_d * \frac{i_{dc1}}{k_1}}{2}$$

Ο λόγος που χρησιμοποιείται η μέση τιμή των τάσεων εξόδου και των ηλεκτρικών ρευμάτων εξόδου των μετατροπέων κατά τον υπολογισμό των τάσεων αναφοράς έχει ως στόχο οι τάσεις αναφοράς να συγκλίνουν σε μία συγκεκριμένη τιμή ώστε οι τάσεις εξόδου να κάνουν το ίδιο, να μην υπάρχει διαφορά μεταξύ τους και να μην αναπτύσσεται κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα.

Σε αυτό το σημείο, πρέπει να σημειωθεί ότι οι τάσεις εξόδου των μετατροπέων δε θα είναι πάντα ίσες με τις τάσεις αναφοράς και κατ' επέκταση μπορεί να διαφέρουν μεταξύ τους προκαλώντας κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα μεταξύ των μετατροπέων.

Από το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin του μικροδικτύου DC οι τάσεις εξόδου των μετατροπέων είναι ίσες με:

$$v_{dc1} = i_{dc1} * R_{line1} + v_{load}$$

$$v_{dc2} = i_{dc2} * R_{line2} + v_{load}$$

Η διαφορά μεταξύ των τάσεων εξόδου των μετατροπέων είναι, επομένως, ίση με:

$$e_v = v_{dc1} - v_{dc2} = \left(R_{line1} - \frac{k_2}{k_1} R_{line2} \right) * i_{dc1}$$

Εύκολα συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι η διαφορά μεταξύ των τάσεων εξόδου των μετατροπέων μηδενίζεται αν και μόνο αν $\frac{R_{line1}}{R_{line2}} = \frac{k_2}{k_1}$.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Marko Gulin, Control of a DC microgrid, University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing, Department of Control and Computer Engineering.
- [2] Roozbeh Asad and Ahad Kazemi, A novel decentralized voltage control method for direct current microgrids with sensitive loads, Center of Excellence for Power Systems Automation and Operation, Department of Electrical Engineering, University of Science and Technology, Iran, Published online in Wiley Online library (wileyonlinelibrary.com) in 2013.
- [3] S. Anand and B.G. Fernandes, Modified droop controller for paralleling of dc –dc converters in standalone dc system, Department of Electrical Engineering, Institute of Technology, Bombay, India, Published in IET Power Electronics in 2012.
- [4] Sijo Augustine, Student Member, IEEE, Mahesh K. Mishra, Senior Member, IEEE, and N. Lakshminarasamma, Member, IEEE, An Improved Droop Control Algorithm for Load Sharing and Circulating Current Control for Parallel DC-DC Converters in Standalone DC Microgrid, Presented in International Conference on Magnetics, Machines & Drives in 2014.
- [5] Sijo Augustine, Student Member, IEEE, Mahesh K. Mishra, Senior Member, IEEE, and N. Lakshminarasamma, Member, IEEE, Adaptive Droop Control Strategy for Load Sharing and Circulating Current Minimization in Low-Voltage Standalone DC Microgrid, Published in IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY in 2014.
- [6] Chengcheng Li, Jianguo Wu, Kun Zhan, Sheng Xu, Xiang Dai, Improved Droop Control based Voltage Compensation and Variable Droop Coefficient in DC Microgrids, Presented in 11th International Conference on Control held in Belfast, UK, 31st August - 2nd September, 2016.
- [7] Xiaonan Lu, Student Member, IEEE, Josep M. Guerrero, Senior Member, IEEE, Kai Sun, Member, IEEE, Juan C. Vasquez, Member, IEEE, An Improved Droop Control Method for DC Microgrids Based on Low Bandwidth Communication with DC Bus Voltage Restoration and Enhanced Current Sharing Accuracy, Published by IEEE in 2013.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Η ΜΕΘΟΔΟΣ DI (DROOP INDEX) ΚΑΙ Η ΣΧΕΣΗ ΤΩΝ ΕΙΚΟΝΙΚΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ ΕΞΟΔΟΥ R_{droop} ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΟ Ή ΤΟΥΣ ΛΟΓΟΥΣ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΕΞΟΔΟΥ ΤΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΕΝΟΣ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ DC

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

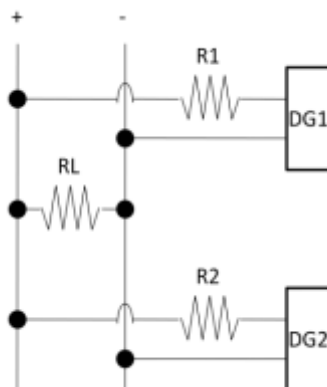
Η μέθοδος DI (DROOP INDEX) είναι η μέθοδος που έχει αναπτυχθεί μέχρι και σήμερα για την καταστολή του φαινομένου των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων και που παράλληλα εξασφαλίζει τη βέλτιστη λύση συνολικά για το σύστημα, όπως χαρακτηριστικά αποτυπώθηκε στο κεφάλαιο 3. Στο κεφάλαιο 4 θα αναλυθούν τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς και τα κυκλοφορούντα και θα εφαρμοστεί η μέθοδος DI για την καταστολή τους για δύο μονοπολικές και δύο διπολικές -τέσσερις συνολικά- συνδεσμολογίες. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου DI θα υπάρξει μία τροποποίηση. Στον υπολογισμό του δείκτη DI δε θα υπολογίζεται η απόλυτη τιμή της διαφοράς μεταξύ των ηλεκτρικών ρευμάτων των γραμμών μεταφοράς που συνδέουν δύο μετατροπείς του μικροδικτύου DC με το φορτίο αλλά το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα που αναπτύσσεται μεταξύ τους όταν οι τάσεις εξόδου τους είναι διαφορετικές. Επομένως, ο δείκτης DI θα είναι ίσος με $DI = \frac{1}{2} * (|I_C| * N_I + P_{loss} * N_P)$, όπου $N_I = \frac{1}{\max(|I_C|)}$. Στη συνέχεια, θα μελετηθεί η σχέση των εικονικών αντιστάσεων εξόδου R_{droop} με το λόγο των τάσεων εξόδου των μετατροπέων x .

4.2 ΜΟΝΟΠΟΛΙΚΕΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΕΣ

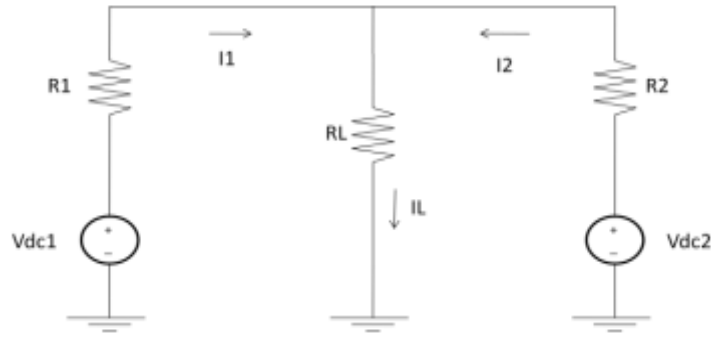
4.2.1 ΣΥΝΔΕΣΗ ΔΥΟ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΣΕ ΜΟΝΟΠΟΛΙΚΗ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ

4.2.1.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΟΥΝΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ

Η συνδεσμολογία που θα εξεταστεί σε αυτό το υποκεφάλαιο είναι η συνδεσμολογία που εικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί. Το ισοδύναμο κύκλωμά της εικονίζεται στη συνέχεια.



Εικόνα 4.1 Σύνδεση δύο μετατροπέων σε μονοπολική συνδεσμολογία.



Εικόνα 4.2 Το ισοδύναμο κύκλωμα της συνδεσμολογίας που μελετάται.

Όπως έχει ήδη αποδειχθεί στο υποκεφάλαιο 3.5 του κεφαλαίου 3, τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς είναι ίσα με:

$$I_1 = \frac{R_2 \cdot V_{DC1}}{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_L + R_2 \cdot R_L} + \frac{(V_{DC1} - V_{DC2}) \cdot R_L}{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_L + R_2 \cdot R_L} \quad (1) \quad [1]$$

$$I_2 = \frac{R_1 \cdot V_{DC2}}{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_L + R_2 \cdot R_L} - \frac{(V_{DC1} - V_{DC2}) \cdot R_L}{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_L + R_2 \cdot R_L} \quad (2) \quad [1]$$

Αν θεωρηθεί ότι $R_L \gg R_1, R_2$, στις σχέσεις (1) και (2) μπορεί να παραληφθεί από τους παρονομαστές των κλασμάτων το γινόμενο $R_1 \cdot R_2$, οπότε:

$$I_1 = \frac{R_2 \cdot V_{DC1}}{R_1 \cdot R_L + R_2 \cdot R_L} + \frac{V_{DC1} - V_{DC2}}{R_1 + R_2} \quad (3) \quad [1]$$

$$I_2 = \frac{R_1 \cdot V_{DC2}}{R_1 \cdot R_L + R_2 \cdot R_L} - \frac{V_{DC1} - V_{DC2}}{R_1 + R_2} \quad (4) \quad [1]$$

Παρατηρείται, επομένως, ότι στις σχέσεις που δίνουν τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς ο πρώτος προσθετέος είναι το μέρος του ηλεκτρικού ρεύματος που καταλήγει στο φορτίο ενώ ο δεύτερος προσθετέος υφίσταται όταν $V_{DC1} \neq V_{DC2}$ και εκφράζει το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα που είναι ίσο με:

$$I_{C12} = -I_{C21} = \frac{V_{DC1} - V_{DC2}}{R_1 + R_2} \quad (5) \quad [1]$$

4.2.1.2 ΚΑΤΑΣΤΟΛΗ ΤΩΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΟΥΝΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ

Για την καταστολή του κυκλοφορούντος ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ των δύο μετατροπέων θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος DI με την τροποποίηση που αναφέρθηκε στην εισαγωγή του κεφαλαίου, δηλαδή ο δείκτης DI θα είναι ίσος με:

$$DI = \frac{1}{2} * (|I_C| * N_I + P_{loss} * N_P) [1]$$

Σε μία προσπάθεια να απλοποιηθεί η διαδικασία θεωρείται ότι $R_L \gg R_1, R_2$ ώστε τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς να δίνονται από τις σχέσεις (3) και (4) του υποκεφαλαίου 4.2.1.1.

Συνυπολογίζοντας τις εικονικές αντιστάσεις εξόδου R_{droop} προκύπτουν για τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς και το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα οι σχέσεις:

$$I_1 = \frac{V_{DC1}*(R_2+R_{droop2})}{R_L*(R_1+R_{droop1}+R_2+R_{droop2})} + \frac{V_{DC1}-V_{DC2}}{R_1+R_{droop1}+R_2+R_{droop2}}$$

$$I_2 = \frac{V_{DC2}*(R_1+R_{droop1})}{R_L*(R_1+R_{droop1}+R_2+R_{droop2})} - \frac{V_{DC1}-V_{DC2}}{R_1+R_{droop1}+R_2+R_{droop2}}$$

$$I_{C12} = -I_{C21} = \frac{V_{DC1}-V_{DC2}}{R_1+R_{droop1}+R_2+R_{droop2}}$$

Θέτοντας $x = \frac{V_{DC1}}{V_{DC2}}$ και $y = \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_{droop1}}{R_{droop2}} = \frac{R_1+R_{droop1}}{R_2+R_{droop2}}$, οι σχέσεις που παρατέθηκαν θα γίνουν:

$$I_1 = \frac{V_{DC1}*(R_2+R_{droop2})}{R_L*(y+1)*(R_2+R_{droop2})} + \frac{V_{DC1}-V_{DC2}}{(R_2+R_{droop2})*(y+1)}$$

$$I_2 = \frac{V_{DC2}*y*(R_2+R_{droop2})}{R_L*(y+1)*(R_2+R_{droop2})} - \frac{V_{DC1}-V_{DC2}}{(R_2+R_{droop2})*(y+1)}$$

$$I_{C12} = -I_{C21} = \frac{V_{DC1}-V_{DC2}}{(R_2+R_{droop2})*(y+1)}$$

Επιπλέον, οι απώλειες στις γραμμές μεταφοράς θα είναι ίσες με:

$$P_{loss} = I_1^2 * (R_1 + R_{droop1}) + I_2^2 * (R_2 + R_{droop2})$$

ή

$$P_{loss} = I_1^2 * y * (R_2 + R_{droop2}) + I_2^2 * (R_2 + R_{droop2})$$

Παρατηρείται, επομένως, ότι ο μόνος άγνωστος για τον υπολογισμό του κυκλοφορούντος ηλεκτρικού ρεύματος, των ηλεκτρικών ρευμάτων των γραμμών μεταφοράς και κατ' επέκταση των απωλειών στις γραμμές μεταφοράς είναι η αντίσταση R_{droop2} .

Πρακτικά, η διαδικασία από εδώ και πέρα είναι ήδη γνωστή από το υποκεφάλαιο 3.5 του κεφαλαίου 3. Μεταβάλλοντας την αντίσταση R_{droop2} μέχρι και τη μέγιστη τιμή της υπολογίζονται διαφορετικές τιμές για το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα και τις απώλειες στις γραμμές μεταφοράς. Επιλέγονται οι μέγιστες τιμές τους και προσδιορίζονται οι συντελεστές κανονικοποίησης N_I και N_P . Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο δείκτης DI για τις διάφορες τιμές της αντίστασης R_{droop2} . Η τιμή της αντίστασης R_{droop2} που θα οδηγήσει στην ελάχιστη τιμή του δείκτη DI είναι η επιθυμητή τιμή. Τέλος, υπολογίζεται και η αντίσταση R_{droop1} από τη σχέση $R_{droop1} = \frac{R_1}{R_2} * R_{droop2} = y * R_{droop2}$.

4.2.1.3 Η ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ R_{droop2} ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΟ $x = \frac{V_{dc1}}{V_{dc2}}$

Παίρνοντας ως βάση τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν στα υποκεφάλαια 4.2.1.1 και 4.2.1.2, θα υπάρξει προσπάθεια να αποτυπωθεί η σχέση ανάμεσα στην αντίσταση R_{droop2} και στο λόγο των τάσεων εξόδου των μετατροπέων x .

Αρχικά, πρέπει να καταγραφούν οι περιορισμοί που εισάγονται κατά τη διαδικασία που θα ακολουθηθεί. Υποτίθεται ότι η ονομαστική τάση εξόδου των μετατροπέων είναι ίση με 326V. Επομένως, η επιτρεπόμενη διακύμανση των τάσεων εξόδου των μετατροπέων με βάση το όριο ανοχής είναι ίση με $\pm 5\% * 326V \cong \pm 16V$, δηλαδή ισχύει $310V \leq V_{dc1}, V_{dc2} \leq 342V$. Άρα, η μέγιστη τιμή που μπορεί να αποδοθεί στην αντίσταση R_{droop2} είναι ίση με $R_{droop2(max)} = 1,6\Omega$ υπό τον όρο ότι το ονομαστικό ηλεκτρικό ρεύμα εξόδου των μετατροπέων είναι ίσο με 10A. Επιπλέον, υποτίθεται ότι οι αντιστάσεις των γραμμών μεταφοράς ικανοποιούν την ανισότητα $0,2\Omega \leq R_1, R_2 \leq 5\Omega$.

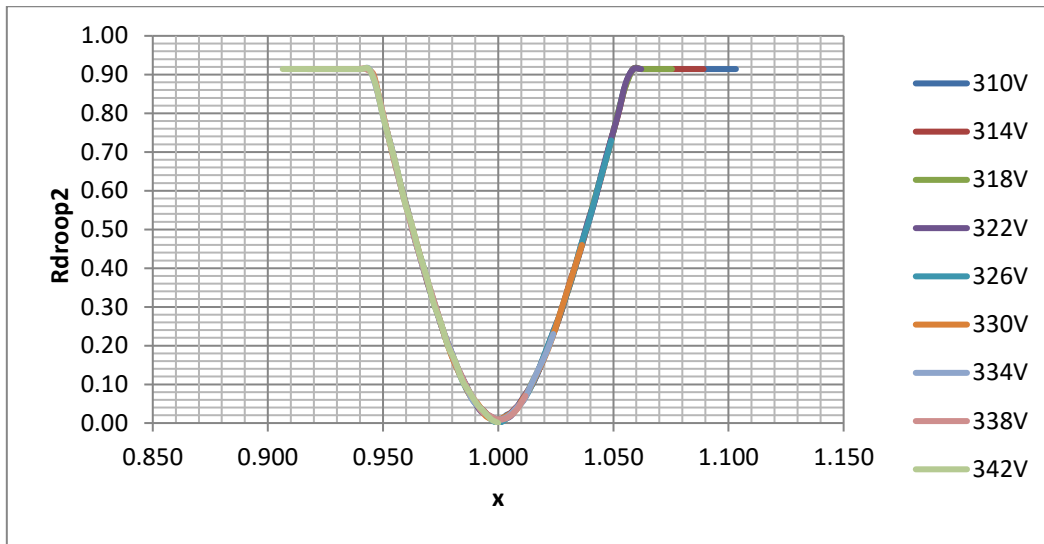
Με βάση τους περιορισμούς για τις τάσεις εξόδου των μετατροπέων και τις αντιστάσεις των γραμμών μεταφοράς προκύπτει ότι:

$$0,906 \leq x \leq 1,103$$

$$0,04 \leq y \leq 25$$

Πρακτικά, κατά τη διαδικασία εύρεσης της σχέσης ανάμεσα στην αντίσταση R_{droop2} και στο λόγο των τάσεων εξόδου των μετατροπέων x , με άγνωστη την τιμή της τάσης εξόδου V_{dc1} και για συγκεκριμένη τιμή της τάσης εξόδου V_{dc2} προσδιορίζεται το διάστημα όπου «κινείται» το x . Στη συνέχεια, θεωρώντας γνωστές τις αντιστάσεις των γραμμών μεταφοράς και την αντίσταση του φορτίου και μεταβάλλοντας το x με κάποιο βήμα στο διάστημα όπου «κινείται», υπολογίζεται η τιμή της αντίστασης R_{droop2} με βάση τη μέθοδο DI, οπότε σχηματίζονται ζεύγη τιμών (x, R_{droop2}) καθιστώντας δυνατή την κατασκευή της γραφικής παράστασης $R_{droop2} - x$. Πραγματοποιώντας την ίδια διαδικασία για κάθε τιμή της τάσης εξόδου V_{dc2} από 310V μέχρι και 342V με βήμα 4V, προκύπτει μία οικογένεια 9 καμπυλών $R_{droop2} - x$. Κατά τον υπολογισμό της αντίστασης R_{droop2} θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το γινόμενο $y * R_{droop2}$ που ισούται με την αντίσταση R_{droop1} δε μπορεί να υπερβαίνει την τιμή 1,6Ω. Σε περίπτωση που το γινόμενο $y * R_{droop2}$ υπερβαίνει την τιμή 1,6Ω, η αντίσταση R_{droop2} παίρνει την τιμή $\frac{1,6\Omega}{y}$ που πρακτικά αποτελεί και τη μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει.

Υποτίθεται μικροδίκτυο DC με δύο συνδεδεμένους σε μονοπολική συνδεσμολογία μετατροπείς, με $R_1 = 1,4\Omega$, $R_2 = 0,8\Omega$ και $R_L = 25\Omega$. Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MATLAB για να υπολογίζει τα ζεύγη (x, R_{droop2}) με βάση συγκεκριμένη τιμή της τάσης εξόδου V_{dc2} και να σχεδιάζει την αντίστοιχη καμπύλη παρατίθεται στο Παράρτημα ενώ ακολουθεί η οικογένεια των 9 καμπυλών $R_{droop2} - x$.



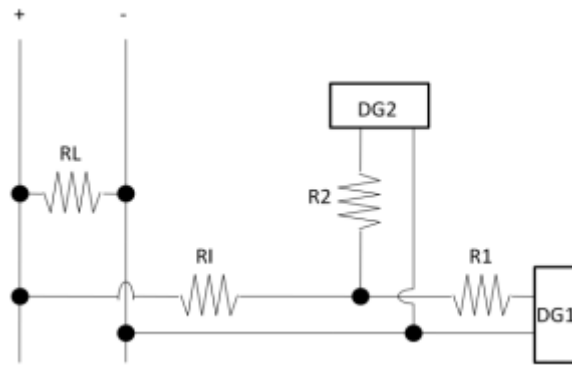
Εικόνα 4.3 Η οικογένεια των καμπυλών $R_{droop2} - x$ για διάφορες τιμές της τάσης εξόδου V_{dc2} στη μονοπολική συνδεσμολογία σύνδεσης δύο μετατροπέων.

Με βάση τις καμπύλες $R_{droop2} - x$ που παρατέθηκαν προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

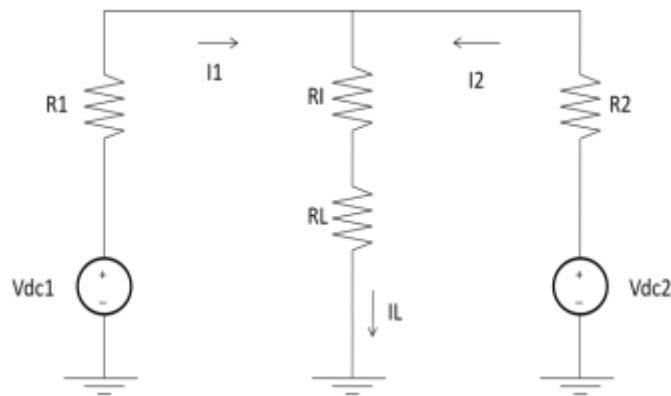
1. Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η αντίσταση R_{droop2} είναι ίση με $0,90\Omega$ μιας και για οποιαδήποτε άλλη τιμή από $0,90\Omega$ μέχρι και $1,60\Omega$ το γινόμενο $y * R_{droop2}$ που είναι ίσο με την αντίσταση R_{droop1} υπερβαίνει την τιμή $1,60\Omega$. Εκεί οφείλεται το γεγονός ότι στις καμπύλες $R_{droop2} - x$ που παρατέθηκαν η αντίσταση R_{droop2} είναι ίση με $0,90\Omega$ όταν $0,906 < x < 0,950$ και $1,050 < x < 1,103$.
2. Όταν $x < 1$, η αντίσταση R_{droop2} μειώνεται με την αύξηση της τάσης εξόδου V_{dc1} και κατ' επέκταση του λόγου x ενώ όταν $x > 1$, η αντίσταση R_{droop2} αυξάνεται με την αύξηση της τάσης εξόδου V_{dc1} και κατ' επέκταση του λόγου x . Όταν $x \approx 1$, η αντίσταση R_{droop2} είναι ίση με το μηδέν. Ανάλογα συμπεράσματα ισχύουν και για την αντίσταση R_{droop1} .
3. Η μεταβολή της εικονικής αντίστασης εξόδου R_{droop2} σε σχέση με το λόγο των τάσεων εξόδου των μετατροπέων x είναι μη γραμμική.
4. Κοινό σημείο όλων των καμπυλών $R_{droop2} - x$ είναι το σημείο $(1, 0)$.

4.2.2 ΚΟΙΝΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΔΥΟ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΣΕ ΜΟΝΟΠΟΛΙΚΗ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ

Η συνδεσμολογία που θα εξεταστεί σε αυτό το υποκεφάλαιο είναι η συνδεσμολογία που εικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί. Το ισοδύναμο κύκλωμά της εικονίζεται στη συνέχεια.



Εικόνα 4.4 Κοινή σύνδεση δύο παράλληλων μετατροπέων σε μονοπολική συνδεσμολογία.

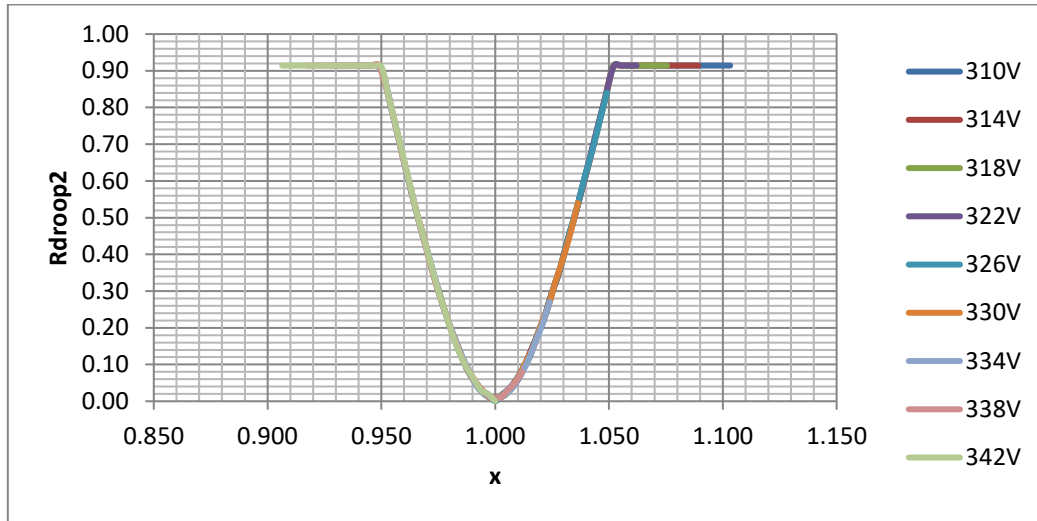


Εικόνα 4.5 Το ισοδύναμο κύκλωμα της συνδεσμολογίας που μελετάται.

Παρατηρώντας το ισοδύναμο κύκλωμα της συγκεκριμένης συνδεσμολογίας εύκολα προκύπτει ότι η μόνη διαφορά της από τη συνδεσμολογία που μελετήθηκε στο υποκεφάλαιο 4.2.1 είναι μία επιπλέον αντίσταση R_I σε σειρά με την αντίσταση φορτίου R_L . Η αντίσταση R_I αποτελεί την αντίσταση της γραμμής μεταφοράς που συνδέει το σημείο κοινής σύνδεσης των δύο μετατροπέων με το φορτίο. Επομένως, οι σχέσεις που δίνουν τα ηλεκτρικά ρεύματα μεταφοράς και το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα θα είναι παρόμοιες με τις σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο υποκεφάλαιο 4.2.1.1 με τη διαφορά ότι η αντίσταση φορτίου R_L θα πρέπει να αντικατασταθεί με την αντίσταση $R_L + R_I$.

Αντίστοιχα, η διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί για την επιλογή των εικονικών αντιστάσεων εξόδου R_{droop} ώστε να καταστέλλεται το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα με βάση τη μέθοδο DI είναι παρόμοια με την διαδικασία που ακολουθήθηκε στο υποκεφάλαιο 4.2.1.2 Άρα, ο αλγόριθμος που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των ζευγών (x, R_{droop2}) για μία συγκεκριμένη τιμή της τάσης εξόδου V_{dc2} και τη σχεδίαση της αντίστοιχης καμπύλης θα είναι παρόμοιος με τον αλγόριθμο που χρησιμοποιήθηκε στο υποκεφάλαιο 4.2.1.3 με τη διαφορά ότι θα πρέπει επιπλέον να «διαβάξει» και να προσθέσει την τιμή της αντίστασης R_I στην αντίσταση του φορτίου R_L . Ο αλγόριθμος παρατίθεται στο Παράρτημα.

Υποτίθεται μικροδίκτυο DC με δύο παράλληλα συνδεδεμένους μετατροπείς, με $R_1 = 1,4\Omega$, $R_2 = 0,8\Omega$ και $R_L = 25\Omega$. Η αντίσταση της γραμμής μεταφοράς που συνδέει το σημείο κοινής σύνδεσης των δύο μετατροπέων με το φορτίο υποτίθεται ίση με $R_I = 2,5\Omega$. Στη συνέχεια παρατίθενται οι καμπύλες $R_{droop2} - x$ που προέκυψαν για τάση εξόδου V_{dc2} από 310V μέχρι και 342V με βήμα 4V.



Εικόνα 4.6 Η οικογένεια των καμπυλών $R_{droop2} - x$ για διάφορες τιμές της τάσης εξόδου V_{dc2} στη μονοπολική συνδεσμολογία κοινής σύνδεσης δύο παράλληλων μετατροπέων.

Με βάση τις καμπύλες $R_{droop2} - x$ που σχεδιάστηκαν προκύπτουν τα ίδια συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την ανάλυση της σχέσης $R_{droop2} - x$ στη σύνδεση δύο μετατροπέων σε μονοπολική συνδεσμολογία που πραγματοποιήθηκε στο υποκεφάλαιο 4.2.1.3. Ειδικότερα:

1. Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η αντίσταση R_{droop2} είναι ίση με $0,90\Omega$ μιας και για οποιαδήποτε άλλη τιμή από $0,90\Omega$ μέχρι και $1,60\Omega$ το γινόμενο $y * R_{droop2}$ που είναι ίσο με την αντίσταση R_{droop1} υπερβαίνει την τιμή $1,60\Omega$. Εκεί οφείλεται το γεγονός ότι στις καμπύλες $R_{droop2} - x$ που παρατέθηκαν η αντίσταση R_{droop2} είναι ίση με $0,90\Omega$ όταν $0,906 < x < 0,950$ και $1,050 < x < 1,103$.
2. Όταν $x < 1$, η αντίσταση R_{droop2} μειώνεται με την αύξηση της τάσης εξόδου V_{dc1} και κατ' επέκταση του λόγου x ενώ όταν $x > 1$, η αντίσταση R_{droop2} αυξάνεται με την αύξηση της τάσης εξόδου V_{dc1} και κατ' επέκταση του λόγου x . Όταν $x \approx 1$, η αντίσταση R_{droop2} είναι ίση με το μηδέν. Ανάλογα συμπεράσματα ισχύουν και για την αντίσταση R_{droop1} .
3. Η μεταβολή της εικονικής αντίστασης εξόδου R_{droop2} σε σχέση με το λόγο των τάσεων εξόδου των μετατροπέων x είναι μη γραμμική.
4. Κοινό σημείο όλων των καμπυλών $R_{droop2} - x$ είναι το σημείο $(1, 0)$.

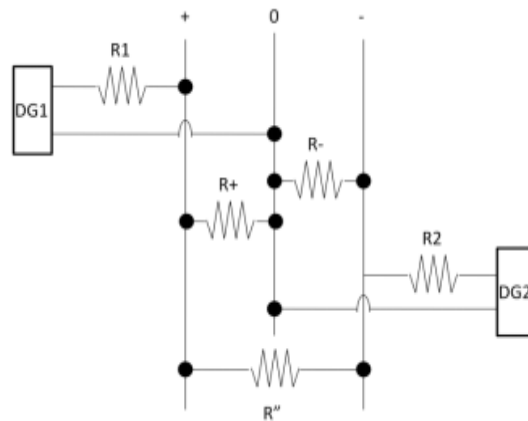
Σε αυτό το σημείο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι πιθανή μεγάλη τιμή της αντίστασης R_I μπορεί να επηρεάσει τη μορφή της καμπύλης. Συγκεκριμένα, μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση των διαστημάτων του λόγου x όπου η αντίσταση R_{droop2} είναι ίση με τη μέγιστη τιμή της, δηλαδή με $0,90\Omega$. Από τη στιγμή, όμως, που η αντίσταση R_I είναι αντίσταση γραμμής μεταφοράς σε μικροδίκτυο DC, υποτίθεται ότι παίρνει τιμές από $0,2\Omega$ μέχρι και 5Ω . Επομένως, η μορφή της καμπύλης δε θα μεταβληθεί σημαντικά ακόμα και αν η αντίσταση R_I πάρει τη μέγιστη τιμή της.

4.3 ΔΙΠΟΛΙΚΕΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΕΣ

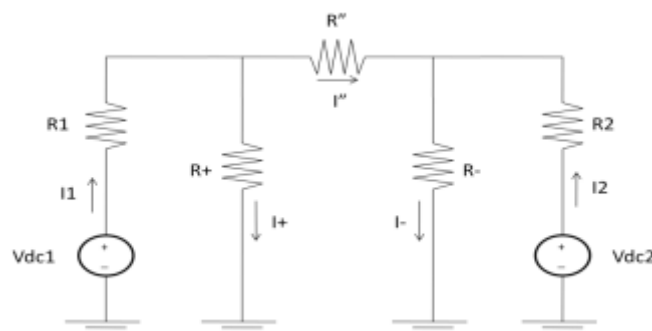
4.3.1 ΣΥΝΔΕΣΗ ΔΥΟ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΘΕΤΙΚΟΥ ΠΟΛΟΥ-ΟΥΔΕΤΕΡΟΥ ΚΑΙ ΑΡΝΗΤΙΚΟΥ ΠΟΛΟΥ-ΟΥΔΕΤΕΡΟΥ

4.3.1.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΟΥΝΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ

Η συνδεσμολογία που θα εξεταστεί σε αυτό το υποκεφάλαιο είναι η συνδεσμολογία που εικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί. Το ισοδύναμο κύκλωμά της εικονίζεται στη συνέχεια.

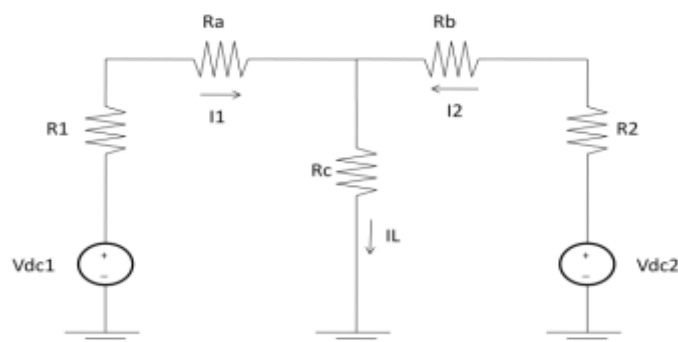


Εικόνα 4.7 Διπολική συνδεσμολογία σύνδεσης δύο μετατροπέων μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου.



Εικόνα 4.8 Το ισοδύναμο κύκλωμα της συνδεσμολογίας που μελετάται.

Με τη μετατροπή του τριγώνου των αντιστάσεων R^+ , R^- , R'' σε αστέρα προκύπτει το κύκλωμα που ακολουθεί.



Εικόνα 4.9 Το ισοδύναμο κύκλωμα της συνδεσμολογίας που μελετάται με μετατροπή του τριγώνου των αντιστάσεων R^+ , R^- , R'' σε αστέρα.

Στο κύκλωμα που παρατέθηκε και θα χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς που θα ακολουθήσουν οι αντιστάσεις R_a, R_b, R_c είναι ίσες με:

$$R_a = \frac{R^+ * R''}{R^+ + R^- + R''}$$

$$R_b = \frac{R^- * R''}{R^+ + R^- + R''}$$

$$R_c = \frac{R^+ * R^-}{R^+ + R^- + R''}$$

Με βάση το Νόμο Τάσεων του Kirchoff προκύπτει ότι:

$$V_{dc1} = I_1 * (R_1 + R_a) + I_L * R_c$$

$$V_{dc2} = I_2 * (R_2 + R_b) + I_L * R_c$$

Όμως, επειδή με βάση το Νόμο Ρευμάτων του Kirchoff ισχύει $I_1 + I_2 = I_L$, οι τάσεις V_{dc1}, V_{dc2} γίνονται:

$$V_{dc1} = I_1 * (R_1 + R_a + R_c) + I_2 * R_c \quad (1)$$

$$V_{dc2} = I_2 * (R_2 + R_b + R_c) + I_1 * R_c \quad (2)$$

Στη συνέχεια, λύνοντας το σύστημα των δύο εξισώσεων (1) και (2) ως προς τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς I_1, I_2 προκύπτει ότι:

$$I_1 = \frac{V_{dc1} * (R_2 + R_b) + R_c * (V_{dc1} - V_{dc2})}{R_1 * (R_b + R_c) + R_2 * (R_a + R_c) + R_a * R_b + R_b * R_c + R_c * R_a} \quad (3) \quad [1]$$

$$I_2 = \frac{V_{dc2} * (R_1 + R_a) - R_c * (V_{dc1} - V_{dc2})}{R_1 * (R_b + R_c) + R_2 * (R_a + R_c) + R_a * R_b + R_b * R_c + R_c * R_a} \quad (4) \quad [1]$$

Στις σχέσεις (3) και (4) εμφανίζεται η διαφορά των τάσεων εξόδου των μετατροπέων $V_{dc1} - V_{dc2}$ που, όμως, δεν αποτελεί την αιτία πρόκλησης του κυκλοφορούντος ηλεκτρικού ρεύματος μιας και στη συνδεσμολογία που μελετάται έχει υποθεθεί ότι ο μετατροπέας 1 έχει συνδεθεί μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και ο μετατροπέας 2 μεταξύ αρνητικού πόλου-ουδετέρου, δηλαδή ισχύει εξ' ορισμού $V_{dc1} \neq V_{dc2}$.

Πρακτικά κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργείται όταν $|V_{dc1}| \neq |V_{dc2}|$ ή $V_{dc1} + V_{dc2} \neq 0$. Στη συνέχεια, αναδιαμορφώνονται οι σχέσεις (3) και (4) ώστε να προκύπτει η ποσότητα $V_{dc1} + V_{dc2}$, οπότε προκύπτει ότι:

$$I_1 = \frac{V_{dc1} * (R_2 + R_b + 2 * R_c) - R_c * (V_{dc1} + V_{dc2})}{R_1 * (R_b + R_c) + R_2 * (R_a + R_c) + R_a * R_b + R_b * R_c + R_c * R_a} \quad (5) \quad [1]$$

$$I_2 = \frac{V_{dc2} * (R_1 + R_a + 2 * R_c) - R_c * (V_{dc1} + V_{dc2})}{R_1 * (R_b + R_c) + R_2 * (R_a + R_c) + R_a * R_b + R_b * R_c + R_c * R_a} \quad (6) \quad [1]$$

Παρατηρείται, επομένως, ότι στις σχέσεις που δίνουν τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς ο πρώτος προσθετέος είναι το μέρος του ηλεκτρικού ρεύματος που καταλήγει στο φορτίο ενώ ο δεύτερος προσθετέος υφίσταται όταν $V_{dc1} + V_{dc2} \neq 0$ και εκφράζει το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα που είναι ίσο με:

$$I_C = - \frac{R_c * (V_{dc1} + V_{dc2})}{R_1 * (R_b + R_c) + R_2 * (R_a + R_c) + R_a * R_b + R_b * R_c + R_c * R_a} \quad (7) [1]$$

4.3.1.2 ΚΑΤΑΣΤΟΛΗ ΤΩΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΟΥΝΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ

Για την καταστολή του κυκλοφορούντος ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ των δύο μετατροπέων θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος DI με την τροποποίηση που αναφέρθηκε στην εισαγωγή του κεφαλαίου, δηλαδή ο δείκτης DI θα είναι ίσος με:

$$DI = \frac{1}{2} * (|I_C| * N_I + P_{loss} * N_P) [1]$$

Συνυπολογίζοντας τις εικονικές αντιστάσεις εξόδου R_{droop} προκύπτουν για τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς και το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα οι σχέσεις:

$$I_1 = \frac{V_{dc1} * (R_2 + R_b + 2 * R_c) - R_c * (V_{dc1} + V_{dc2})}{(R_1 + R_{dr1}) * (R_b + R_c) + (R_2 + R_{dr2}) * (R_a + R_c) + R_a * R_b + R_b * R_c + R_c * R_a}$$

$$I_2 = \frac{V_{dc2} * (R_1 + R_a + 2 * R_c) - R_c * (V_{dc1} + V_{dc2})}{(R_1 + R_{dr1}) * (R_b + R_c) + (R_2 + R_{dr2}) * (R_a + R_c) + R_a * R_b + R_b * R_c + R_c * R_a}$$

$$I_C = - \frac{R_c * (V_{dc1} + V_{dc2})}{(R_1 + R_{dr1}) * (R_b + R_c) + (R_2 + R_{dr2}) * (R_a + R_c) + R_a * R_b + R_b * R_c + R_c * R_a}$$

Έχοντας προσδιορίσει τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς και το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα στόχος αποτελεί ο μόνος άγνωστος στις σχέσεις που παρατέθηκαν να είναι η αντίσταση R_{droop2} . Θα πρέπει, δηλαδή, να εκφραστεί η αντίσταση R_{droop2} ως προς την αντίσταση R_{droop1} .

Λαμβάνοντας υπόψη τη συνθήκη που πρέπει να ικανοποιείται για να μην αναπτύσσεται κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα, δηλαδή $|V_{dc1}| = |V_{dc2}|$, και αντικαθιστώντας τις τάσεις εξόδου των μετατροπέων από τις σχέσεις (1) και (2) του υποκεφαλαίου 4.3.1.1 προκύπτει ότι για την αποφυγή δημιουργίας κυκλοφορούντος ηλεκτρικού ρεύματος πρέπει να ισχύει:

$$-\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_1 + R_a + 2 * R_c}{R_2 + R_b + 2 * R_c}$$

Αν $y = \frac{R_1+R_a+2*R_c}{R_2+R_b+2*R_c}$, τότε ο καλός διαμοιρασμός του φορτίου απαιτεί $y = \frac{R_{droop1}+R_a+2*R_c}{R_{droop2}+R_b+2*R_c} = \frac{R_1+R_{droop1}+R_a+2*R_c}{R_2+R_{droop2}+R_b+2*R_c}$. Αν, επιπλέον, $x = \frac{V_{dc1}}{V_{dc2}}$, οι σχέσεις για τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς και το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα θα γίνουν:

$$I_1 = \frac{x * V_{dc2} * (R_2 + R_b + 2 * R_c) - R_c * (x * V_{dc2} + V_{dc2})}{(y * (R_2 + R_{dr2} + R_b + 2 * R_c) - R_a - 2 * R_c) * (R_b + R_c) + (R_2 + R_{dr2}) * (R_a + R_c) + R_a * R_b + R_b * R_c + R_c * R_a}$$

$$I_2 = \frac{V_{dc2} * (R_1 + R_a + 2 * R_c) - R_c * (x * V_{dc2} + V_{dc2})}{(y * (R_2 + R_{dr2} + R_b + 2 * R_c) - R_a - 2 * R_c) * (R_b + R_c) + (R_2 + R_{dr2}) * (R_a + R_c) + R_a * R_b + R_b * R_c + R_c * R_a}$$

$$I_c = -\frac{R_c * (V_{dc1} + V_{dc2})}{(y * (R_2 + R_{dr2} + R_b + 2 * R_c) - R_a - 2 * R_c) * (R_b + R_c) + (R_2 + R_{dr2}) * (R_a + R_c) + R_a * R_b + R_b * R_c + R_c * R_a}$$

Επιπλέον, οι απώλειες στις γραμμές μεταφοράς θα είναι ίσες με:

$$P_{loss} = I_1^2 * (R_1 + R_{droop1}) + I_2^2 * (R_2 + R_{droop2})$$

ή

$$P_{loss} = I_1^2 * y * ((R_2 + R_{dr2} + R_b + 2 * R_c) - R_a - 2 * R_c) + I_2^2 * (R_2 + R_{droop2})$$

Παρατηρείται, επομένως, ότι ο μόνος άγνωστος για τον υπολογισμό του κυκλοφορούντος ηλεκτρικού ρεύματος, των ηλεκτρικών ρευμάτων των γραμμών μεταφοράς και κατ' επέκταση των απωλειών στις γραμμές μεταφοράς είναι η αντίσταση R_{droop2} .

Από εδώ και πέρα, μεταβάλλοντας την αντίσταση R_{droop2} μέχρι και τη μέγιστη τιμή της υπολογίζονται διαφορετικές τιμές για το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα και τις απώλειες στις γραμμές μεταφοράς. Επιλέγονται οι μέγιστες τιμές τους και προσδιορίζονται οι συντελεστές κανονικοποίησης N_I και N_P . Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο δείκτης DI για τις διάφορες τιμές της αντίστασης R_{droop2} . Η τιμή της αντίστασης R_{droop2} που θα οδηγήσει στην ελάχιστη τιμή του δείκτη DI είναι η επιθυμητή τιμή. Τέλος, υπολογίζεται και η αντίσταση R_{droop1} από τη σχέση $y = \frac{R_{droop1}+R_a+2*R_c}{R_{droop2}+R_b+2*R_c}$.

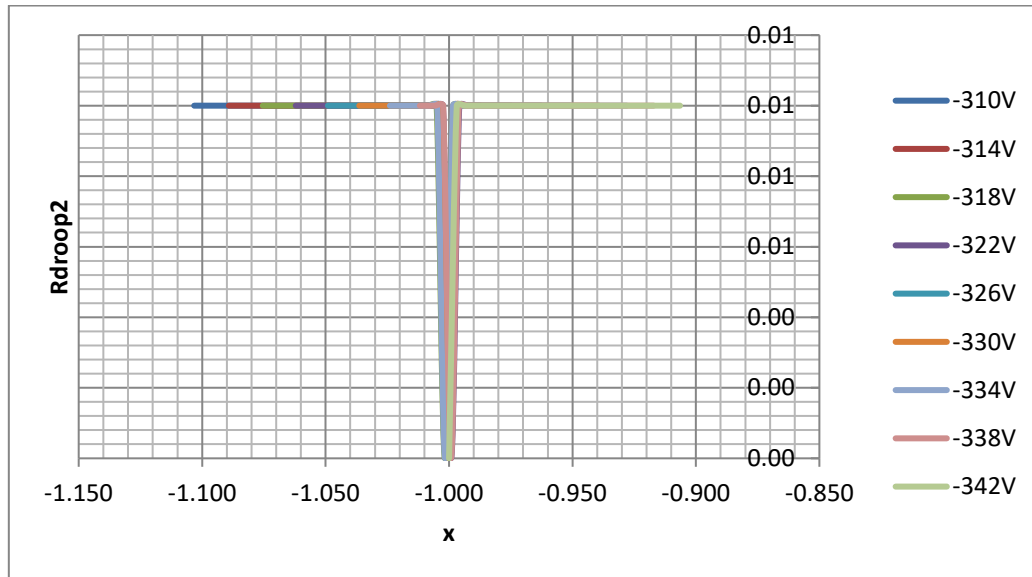
4.3.1.3 Η ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ R_{droop2} ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΟ $x = \frac{V_{dc1}}{V_{dc2}}$

Παίρνοντας ως βάση τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν στα υποκεφάλαια 4.3.1.1 και 4.3.1.2 και ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 4.2.1.3 με γνωστές τις παραμέτρους της συνδεσμολογίας που μελετάται –τις αντιστάσεις των γραμμών μεταφοράς και τα φορτία R^+ , R^- , R'' - θα υπάρξει προσπάθεια να αποτυπωθεί η σχέση ανάμεσα στην αντίσταση R_{droop2} και στο λόγο των τάσεων εξόδου των μετατροπέων x .

Πρακτικά, η μόνη διαφορά που εισάγεται στη διαδικασία που ακολουθούνταν μέχρι και τώρα είναι ότι η τάση εξόδου V_{dc2} «κινείται» –342V μέχρι και –310V με ονομαστική τιμή ίση με –326V μιας και είναι συνδεδεμένη μεταξύ του αρνητικού πόλου και του ουδέτερου. Επομένως, ο λόγος των τάσεων εξόδου των μετατροπέων x θα παίρνει αρνητικές τιμές και θα «κινείται» μεταξύ –1,103 και –0,906.

Υποτίθεται μικροδίκτυο DC με δύο μετατροπείς συνδεδεμένους μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου, με $R_1 = 1,4\Omega$, $R_2 = 0,8\Omega$, $R^+ = 100\Omega$, $R^- = 100\Omega$, $R'' = 50\Omega$.

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MATLAB για να υπολογίζει τα ζεύγη (x, R_{droop2}) με βάση συγκεκριμένη τιμή της τάσης εξόδου V_{dc2} και να σχεδιάζει την αντίστοιχη καμπύλη παρατίθεται στο Παράρτημα ενώ ακολουθούν οι καμπύλες $R_{droop2} - x$ που σχεδιάστηκαν για τάση εξόδου V_{dc2} από $-342V$ μέχρι και $-310V$ με βήμα $4V$.



Εικόνα 4.10 Η οικογένεια των καμπυλών $R_{droop2} - x$ για διάφορες τιμές της τάσης εξόδου V_{dc2} στη διπολική συνδεσμολογία σύνδεσης δύο μετατροπέων μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου.

Με βάση τις καμπύλες $R_{droop2} - x$ που παρατέθηκαν προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

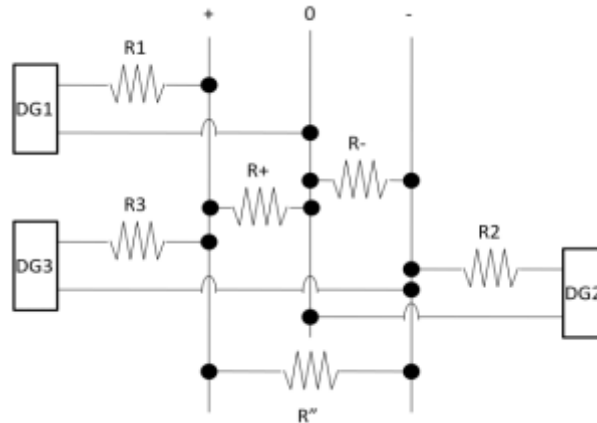
1. Η αντίσταση R_{droop2} εμφανίζεται σταθερή και ίση με $0,01\Omega$ καθώς μεταβάλλεται ο λόγος των τάσεων εξόδου των μετατροπέων x για όλες τις τιμές της τάσης εξόδου V_{dc2} . Η αντίσταση R_{droop2} είναι ίση με το μηδέν μόνο όταν $x = -1$.
2. Όλες οι καμπύλες $R_{droop2} - x$ έχουν κοινό σημείο το σημείο $(-1,0)$.

Το γεγονός ότι η αντίσταση R_{droop2} είναι σταθερή και ίση με $0,01\Omega$ και ότι οι καμπύλες $R_{droop2} - x$ δεν έχουν τη μορφή των αντίστοιχων στις δύο μονοπολικές συνδεσμολογίες που μελετήθηκαν στο υποκεφάλαιο 4.2 εξηγείται. Στη συγκεκριμένη συνδεσμολογία, το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα είναι πολύ χαμηλό ενώ η μείωσή του με την αύξηση των αντιστάσεων R_{droop} είναι αμελητέα. Αντίθετα, οι απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας στις γραμμές μεταφοράς αυξάνονται σημαντικά με την αύξηση των αντιστάσεων R_{droop} με αποτέλεσμα ο δείκτης DI να γίνεται ελάχιστος όταν οι αντιστάσεις R_{droop} παίρνουν την ελάχιστη δυνατή τιμή τους, δηλαδή όταν η αντίσταση R_{droop2} παίρνει την ελάχιστη δυνατή τιμή της ($0,01\Omega$) κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου.

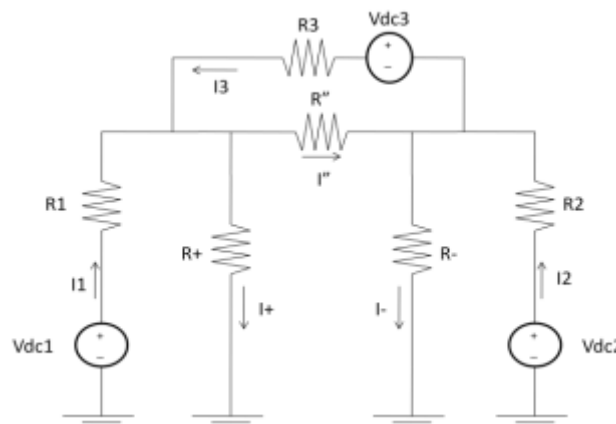
4.3.2 ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΡΙΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΘΕΤΙΚΟΥ ΠΟΛΟΥ-ΟΥΔΕΤΕΡΟΥ, ΑΡΝΗΤΙΚΟΥ ΠΟΛΟΥ-ΟΥΔΕΤΕΡΟΥ ΚΑΙ ΘΕΤΙΚΟΥ ΠΟΛΟΥ-ΑΡΝΗΤΙΚΟΥ ΠΟΛΟΥ

4.3.2.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΟΥΝΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ

Η συνδεσμολογία που θα εξεταστεί σε αυτό το υποκεφάλαιο είναι η συνδεσμολογία που εικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί. Το ισοδύναμο κύκλωμά της εικονίζεται στη συνέχεια.

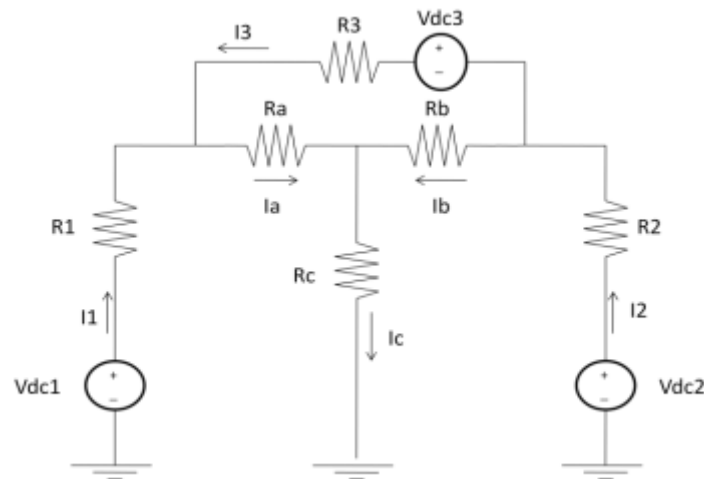


Εικόνα 4.11 Διπολική συνδεσμολογία σύνδεσης τριών μετατροπέων μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού πόλου-αρνητικού πόλου.



Εικόνα 4.12 Το ισοδύναμο κύκλωμα της συνδεσμολογίας που μελετάται.

Με τη μετατροπή του τριγώνου των αντιστάσεων R^+ , R^- , R'' σε αστέρα προκύπτει το κύκλωμα που ακολουθεί.



Εικόνα 4.13 Το ισοδύναμο κύκλωμα της συνδεσμολογίας που μελετάται με μετατροπή του τριγώνου των αντιστάσεων R^+ , R^- , R'' σε αστέρα.

Στο κύκλωμα που παρατέθηκε και θα χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς που θα ακολουθήσουν οι αντιστάσεις R_a , R_b , R_c είναι ίσες με:

$$R_a = \frac{R^+ * R''}{R^+ + R^- + R''}$$

$$R_b = \frac{R^- * R''}{R^+ + R^- + R''}$$

$$R_c = \frac{R^+ * R^-}{R^+ + R^- + R''}$$

Για την απλοποίηση των υπολογισμών που θα ακολουθήσουν γίνονται οι εξής παραδοχές:

1. Οι αντιστάσεις των γραμμών μεταφοράς είναι ίσες μεταξύ τους, δηλαδή ισχύει $R_1 = R_2 = R_3 = r$.
2. Οι αντιστάσεις των φορτίων είναι ίσες μεταξύ τους, δηλαδή ισχύει $R_a = R_b = R_c = R$.

Με βάση το Νόμο Τάσεων του Kirchhoff προκύπτει ότι:

$$V_{dc1} = I_1 * r + I_a * R - I_b * R - I_2 * r + V_{dc2} \quad (1)$$

$$V_{dc2} = I_2 * r + I_b * R + I_c * R \quad (2)$$

$$V_{dc3} = I_3 * R_3 + I_a * R - I_b * R \quad (3)$$

Με βάση το Νόμο Ρευμάτων του Kirchhoff προκύπτει ότι:

$$I_a = I_1 + I_3 \quad (4)$$

$$I_b = I_2 - I_3 \quad (5)$$

$$I_c = I_1 + I_2 \quad (6)$$

Αντικαθιστώντας τα ηλεκτρικά ρεύματα I_a , I_b , I_c από τις σχέσεις (4), (5), (6) στις σχέσεις (1), (2), (3) προκύπτει ότι:

$$V_{dc1} = V_{dc2} + I_1 * (r + R) - I_2 * (r + R) + I_3 * 2 * R \quad (7)$$

$$V_{dc2} = I_1 * R + I_2 * (r + 2 * R) - I_3 * R \quad (8)$$

$$V_{dc3} = I_1 * R - I_2 * R + I_3 * (r + 2 * R) \quad (9)$$

Στη συνέχεια, λύνοντας το σύστημα των τριών εξισώσεων (7), (8), (9) ως προς τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς I_1 , I_2 , I_3 προκύπτει ότι:

$$I_1 = \frac{V_{dc1}}{r+3*R} - \frac{R*(V_{dc3}+V_{dc2}-V_{dc1})}{r*(r+3*R)} \quad (10) \quad [1]$$

$$I_2 = \frac{V_{dc2}}{r+3*R} + \frac{R*(V_{dc3}+V_{dc2}-V_{dc1})}{r*(r+3*R)} \quad (11) \quad [1]$$

$$I_3 = \frac{V_{dc3}}{r+3*R} + \frac{R*(V_{dc3}+V_{dc2}-V_{dc1})}{r*(r+3*R)} \quad (12) \quad [1]$$

Ο όρος $\frac{R*(V_{dc3}+V_{dc2}-V_{dc1})}{r*(r+3*R)}$ που εμφανίζεται και στις τρεις σχέσεις που δίνουν τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς μηδενίζει όταν $V_{dc3} = V_{dc1} - V_{dc2}$ ή $|V_{dc3}| = |V_{dc1}| + |V_{dc2}|$ αφού $V_{dc2} < 0$. Ο συγκεκριμένος όρος πρακτικά εκφράζει το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα που αναπτύσσεται όταν $|V_{dc3}| \neq |V_{dc1}| + |V_{dc2}|$. Επομένως:

$$I_c = \frac{R*(V_{dc3}+V_{dc2}-V_{dc1})}{r*(r+3*R)} \quad [1]$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι στη συγκεκριμένη συνδεσμολογία δεν υπάρχουν κυκλοφορούντα ηλεκτρικά ρεύματα που αναπτύσσονται μεταξύ δύο κάθε φορά διαφορετικών μετατροπέων αλλά ένα κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα που ρέει στο κύκλωμα επιβαρύνοντας τις γραμμές μεταφοράς.

4.3.2.2 ΚΑΤΑΣΤΟΛΗ ΤΩΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΟΥΝΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ

Για την καταστολή του κυκλοφορούντος ηλεκτρικού ρεύματος που εμφανίζεται στη συγκεκριμένη συνδεσμολογία θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος DI με την τροποποίηση που αναφέρθηκε στην εισαγωγή του κεφαλαίου, δηλαδή ο δείκτης DI θα είναι ίσος με:

$$DI = \frac{1}{2} * (|I_c| * N_I + P_{loss} * N_P) \quad [1]$$

Συνοπολογίζοντας τις εικονικές αντιστάσεις εξόδου R_{droop} προκύπτουν για τις τάσεις εξόδου των μετατροπέων οι σχέσεις:

$$V_{dc1} = V_{dc2} + I_1 * (r + R_{dr1} + R) - I_2 * (r + R_{dr2} + R) + I_3 * 2 * R$$

$$V_{dc2} = I_1 * R + I_2 * (r + R_{dr2} + 2 * R) - I_3 * R$$

$$V_{dc3} = I_1 * R - I_2 * R + I_3 * (r + R_{dr3} + 2 * R)$$

Αντικαθιστώντας τις τάσεις εξόδου στη σχέση $V_{dc3} + V_{dc2} - V_{dc1} = 0$ που πρέπει να ισχύει για να μην προκαλείται κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα προκύπτει η σχέση:

$$r + R_{dr1} - \frac{I_2}{I_1} * (r + R_{dr2}) - \frac{I_3}{I_1} * (r + R_{dr3}) = 0$$

Επιπλέον, στη διπολική συνδεσμολογία, είναι επιθυμητό οι τάσεις εξόδου των μετατροπέων που συνδέονται σε θετικό πόλο-ουδέτερο και σε αρνητικό πόλο-ουδέτερο να έχουν το ίδιο μέτρο ώστε το άθροισμά τους να είναι ίσο με το μηδέν, δηλαδή $V_{dc2} + V_{dc1} = 0$. Αντικαθιστώντας τις τάσεις εξόδου στη συγκεκριμένη σχέση, προκύπτει ότι:

$$-\frac{I_2}{I_1} = \frac{r + R_{dr1} + 3 * R}{r + R_{dr2} + 3 * R}$$

Ταυτόχρονα, αν ληφθεί υπόψη ότι $3 * R \gg r$, η σχέση που παρατέθηκε γίνεται $-\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_{dr1} + 3 * R}{R_{dr2} + 3 * R}$. Ο καλός διαμοιρασμός του φορτίου απαιτεί, όμως, $-\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_{dr1} + 3 * R}{R_{dr2} + 3 * R} = \frac{r + 3 * R}{r + 3 * R} = 1$, δηλαδή $R_{dr1} = R_{dr2}$.

Επομένως, από τη σχέση $r + R_{dr1} - \frac{I_2}{I_1} * (r + R_{dr2}) - \frac{I_3}{I_1} * (r + R_{dr3}) = 0$ προκύπτει ότι:

$$\frac{I_3}{I_1} = \frac{2 * (r + R_{dr1})}{r + R_{dr3}}$$

Αν υποθεθεί $R_{dr1} = R_{dr3}$, η σχέση $r + R_{dr1} - \frac{I_2}{I_1} * (r + R_{dr2}) - \frac{I_3}{I_1} * (r + R_{dr3}) = 0$ θα ικανοποιείται οπότε θα πληρείται η συνθήκη $V_{dc3} + V_{dc2} - V_{dc1} = 0$. Άρα, εύκολα συμπεραίνεται ότι στη συγκεκριμένη συνδεσμολογία πρέπει $R_{dr1} = R_{dr2} = R_{dr3} = R_{dr}$.

Συνυπολογίζοντας τις εικονικές αντιστάσεις εξόδου R_{droop} και θέτοντας $x_1 = \frac{V_{dc1}}{V_{dc2}}$, $x_3 = \frac{V_{dc3}}{V_{dc2}}$ προκύπτουν για τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς και το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα οι σχέσεις:

$$I_1 = \frac{x_1 * V_{dc2}}{r + R_{dr} + 3 * R} - \frac{R * V_{dc2} * (x_3 + 1 - x_1)}{(r + R_{dr}) * (r + R_{dr} + 3 * R)}$$

$$I_2 = \frac{V_{dc2}}{r + R_{dr} + 3 * R} + \frac{R * V_{dc2} * (x_3 + 1 - x_1)}{(r + R_{dr}) * (r + R_{dr} + 3 * R)}$$

$$I_3 = \frac{x_3 * V_{dc2}}{r + R_{dr} + 3 * R} + \frac{R * V_{dc2} * (x_3 + 1 - x_1)}{(r + R_{dr}) * (r + R_{dr} + 3 * R)}$$

$$I_c = \frac{R * V_{dc2} * (x_3 + 1 - x_1)}{(r + R_{dr}) * (r + R_{dr} + 3 * R)}$$

Επιπλέον, οι απώλειες στις γραμμές μεταφοράς θα είναι ίσες με:

$$P_{loss} = I_1^2 * (r + R_{dr}) + I_2^2 * (r + R_{dr}) + I_3^2 * (r + R_{dr})$$

Παρατηρείται, επομένως, ότι ο μόνος άγνωστος για τον υπολογισμό του κυκλοφορούντος ηλεκτρικού ρεύματος, των ηλεκτρικών ρευμάτων των γραμμών μεταφοράς και κατ' επέκταση των απωλειών στις γραμμές μεταφοράς είναι η αντίσταση R_{droop} .

Από εδώ και πέρα, μεταβάλλοντας την αντίσταση R_{droop} μέχρι και τη μέγιστη τιμή της υπολογίζονται διαφορετικές τιμές για το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα και τις απώλειες στις γραμμές μεταφοράς. Επιλέγονται οι μέγιστες τιμές τους και προσδιορίζονται οι συντελεστές κανονικοποίησης N_I και N_P . Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο δείκτης DI για τις διάφορες τιμές της αντίστασης R_{droop} . Η τιμή της αντίστασης R_{droop} που θα οδηγήσει στην ελάχιστη τιμή του δείκτη DI είναι η επιθυμητή τιμή.

4.3.2.3 Η ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ R_{droop} ΜΕ ΤΟΥΣ ΛΟΓΟΥΣ $x_1 = \frac{V_{dc1}}{V_{dc2}}$, $x_3 = \frac{V_{dc3}}{V_{dc2}}$

Παίρνοντας ως βάση τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν στα υποκεφάλαια 4.3.2.1 και 4.3.2.2, θα υπάρξει προσπάθεια να αποτυπωθεί η σχέση ανάμεσα στην αντίσταση R_{droop} και στους λόγους x_1 , x_3 .

Αρχικά, πρέπει να καταγραφούν οι περιορισμοί που εισάγονται κατά τη διαδικασία που θα ακολουθηθεί. Υποτίθεται ότι η ονομαστική τάση εξόδου του μετατροπέα 1 είναι ίση με $326V$, του μετατροπέα 2 $-326V$ και του μετατροπέα 3 $326V - (-326V) = 652V$. Επομένως, η επιτρεπόμενη διακύμανση των τάσεων εξόδου των μετατροπέων 1 και 2 είναι ίση με $\pm 5\% * |326|V \cong \pm 16V$ ενώ η επιτρεπόμενη διακύμανση της τάσης εξόδου του μετατροπέα 3 είναι ίση με $\pm 5\% * 652V \cong \pm 32V$.

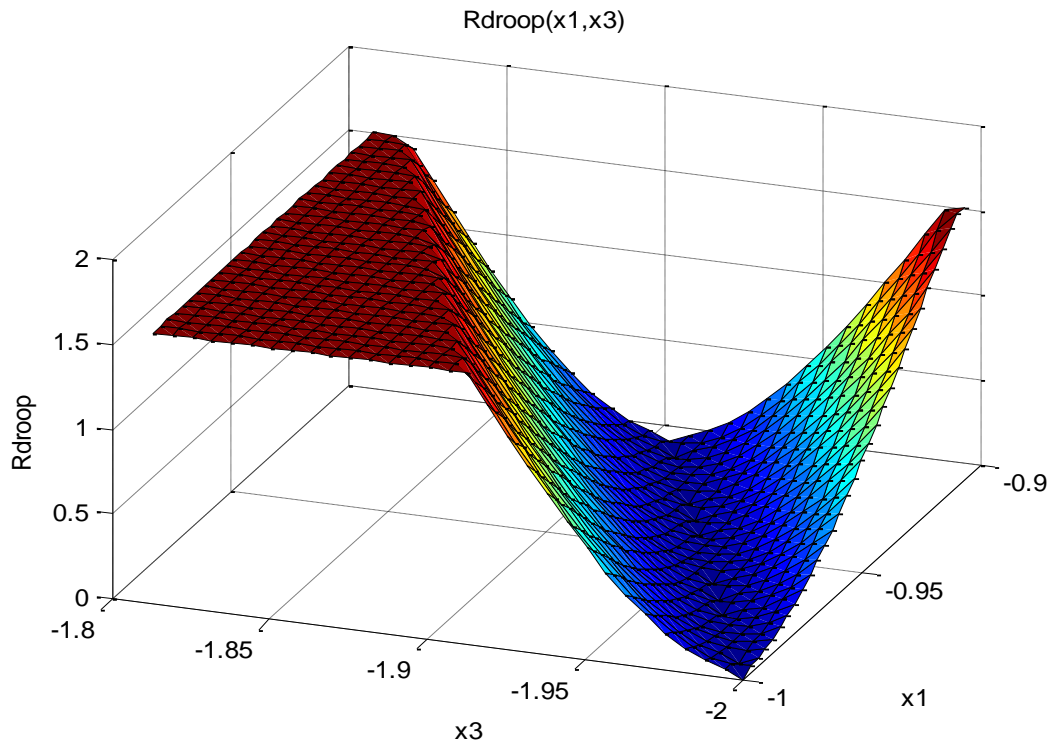
Επομένως, ισχύουν οι ανισότητες $310V \leq V_{dc1} \leq 342V$, $-342V \leq V_{dc2} \leq -310V$, $620V \leq V_{dc3} \leq 684V$, όπως επίσης $-1,103 \leq x_1 \leq -0,906$, $-2,206 \leq x_3 \leq -1,813$.

Η μέγιστη τιμή που μπορεί να αποδοθεί στην αντίσταση R_{droop} είναι ίση με $R_{droop(max)} = 1,6\Omega$ υπό τον όρο ότι το ονομαστικό ηλεκτρικό ρεύμα εξόδου των μετατροπέων είναι ίσο με $10A$. Επιπλέον, υποτίθεται ότι οι αντιστάσεις των γραμμών μεταφοράς ικανοποιούν την ανισότητα $0,2\Omega \leq R_1, R_2, R_3 \leq 5\Omega$.

Πρακτικά, κατά τη διαδικασία εύρεσης της σχέσης ανάμεσα στην αντίσταση R_{droop} και στους λόγους x_1 , x_3 , με άγνωστες τις τιμές των τάσεων εξόδου V_{dc1} , V_{dc3} και για συγκεκριμένη τιμή της τάσης εξόδου V_{dc2} προσδιορίζονται τα διαστήματα όπου «κινούνται» τα x_1 , x_3 . Στη συνέχεια, θεωρώντας γνωστές τις αντιστάσεις των γραμμών μεταφοράς και τις αντιστάσεις των φορτίων R^+ , R^- , R'' , διατηρώντας σταθερό το x_1 και μεταβάλλοντας το x_3 με κάποιο βήμα στο διάστημα όπου «κινείται», υπολογίζεται η τιμή της αντίστασης R_{droop} με βάση τη μέθοδο DI, οπότε σχηματίζονται ζεύγη τιμών (x_3, R_{droop}) καθιστώντας δυνατή την κατασκευή της γραφικής παράστασης $R_{droop} - x_3$. Μεταβάλλοντας το x_1 με κάποιο βήμα στο διάστημα όπου «κινείται», ακολουθείται η ίδια διαδικασία με αποτέλεσμα την κατασκευή μίας τρισδιάστατης επιφάνειας που δίνει τη σχέση ανάμεσα στην αντίσταση R_{droop} και στους λόγους x_3 , x_1 . Πραγματοποιώντας την ίδια διαδικασία για κάθε τιμή της τάσης εξόδου V_{dc2} από $310V$ μέχρι και $342V$ με βήμα $4V$, προκύπτουν μία οικογένεια 9 συνολικά τρισδιάστατων επιφανειών.

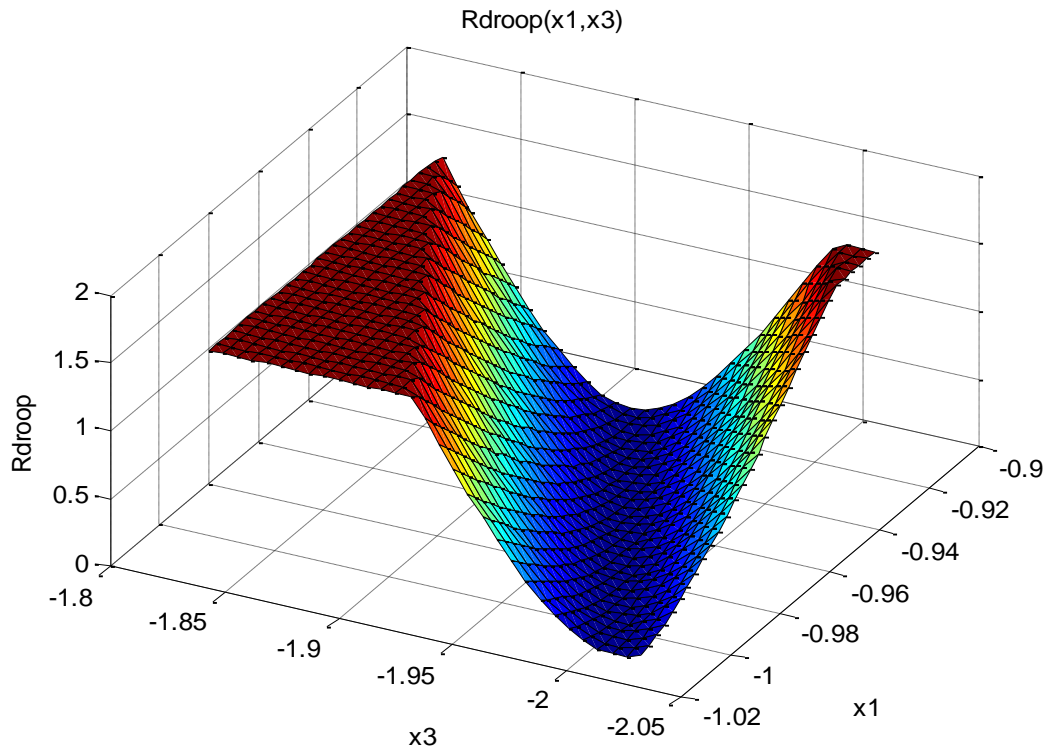
Υποτίθεται μικροδίκτυο DC με τρεις μετατροπείς συνδεδεμένους μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού πόλου-αρνητικού πόλου, με $R_1 = R_2 = R_3 = r = 1,1\Omega$ και $R^+ = R^- = R'' = 75\Omega$. Στη συνέχεια, παρατίθενται οι 9 επιφάνειες. Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MATLAB και χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των 9 επιφανειών παρατίθεται στο Παράρτημα.

- $V_{dc2} = -342V$



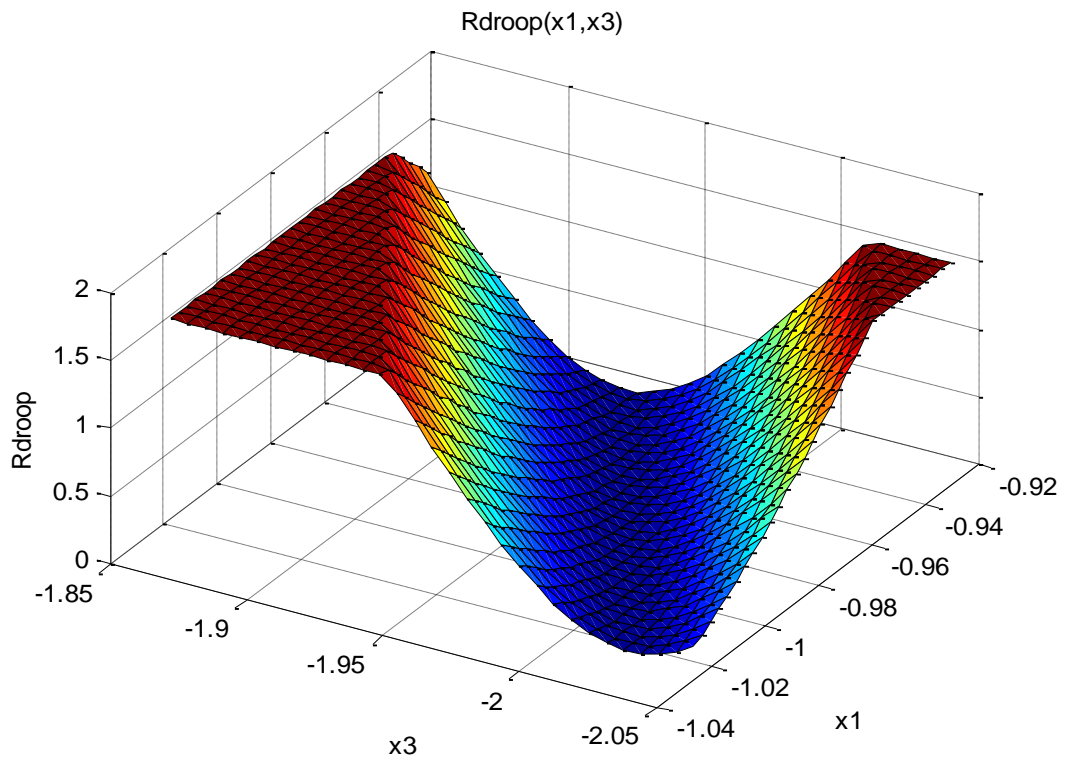
Εικόνα 4.14 Η επιφάνεια $R_{droop}(x_1, x_3)$ για τάση εξόδου $V_{dc2} = -342V$.

- $V_{dc2} = -338V$



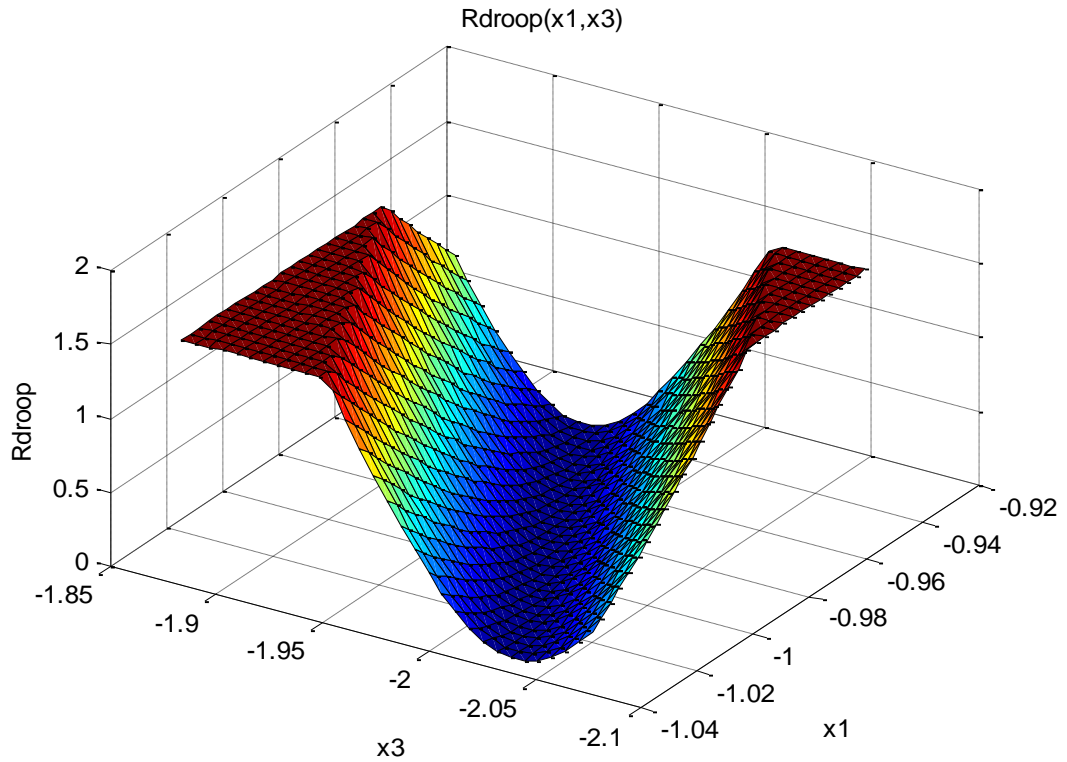
Εικόνα 4.15 Η επιφάνεια $R_{droop}(x_1, x_3)$ για τάση εξόδου $V_{dc2} = -338V$.

- $V_{dc2} = -334V$



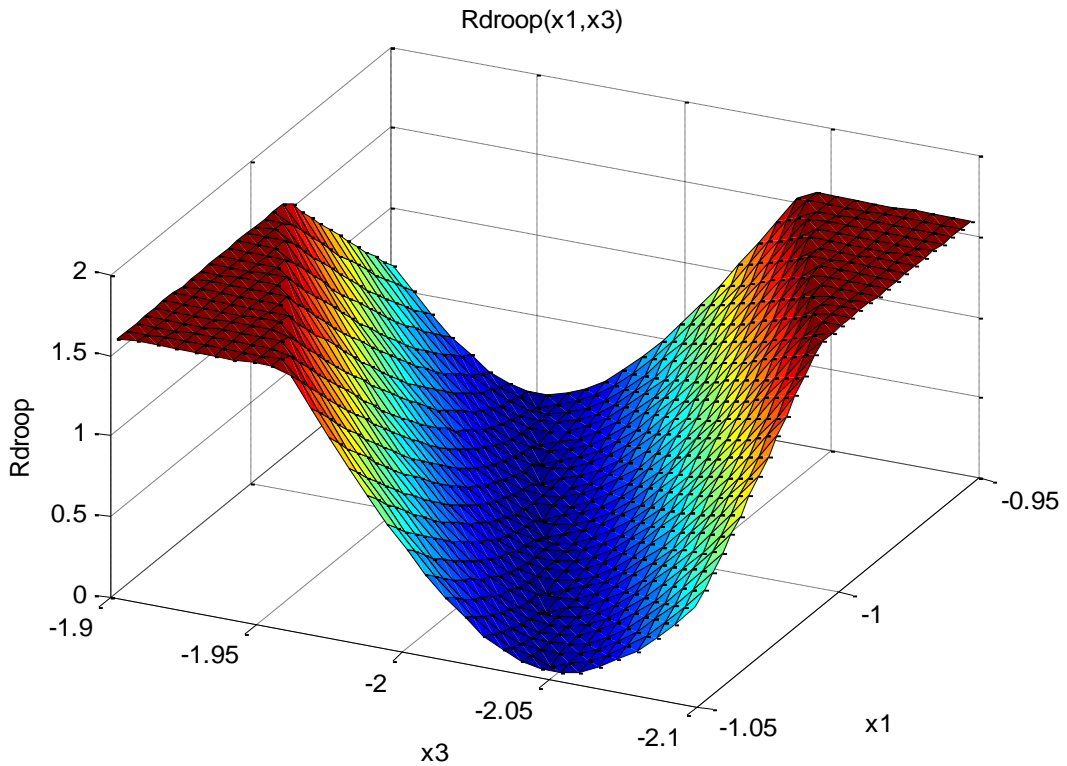
Εικόνα 4.16 Η επιφάνεια $R_{droop}(x_1, x_3)$ για τάση εξόδου $V_{dc2} = -334V$.

- $V_{dc2} = -330V$



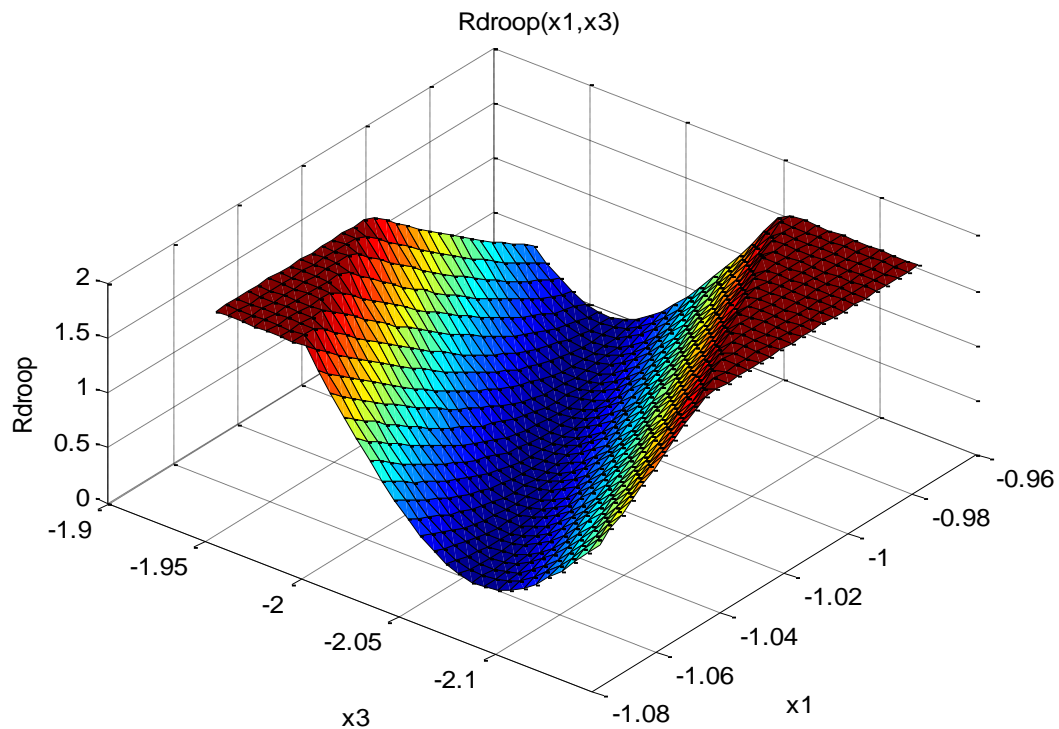
Εικόνα 4.17 Η επιφάνεια $R_{droop}(x_1, x_3)$ για τάση εξόδου $V_{dc2} = -330V$.

- $V_{dc2} = -326V$



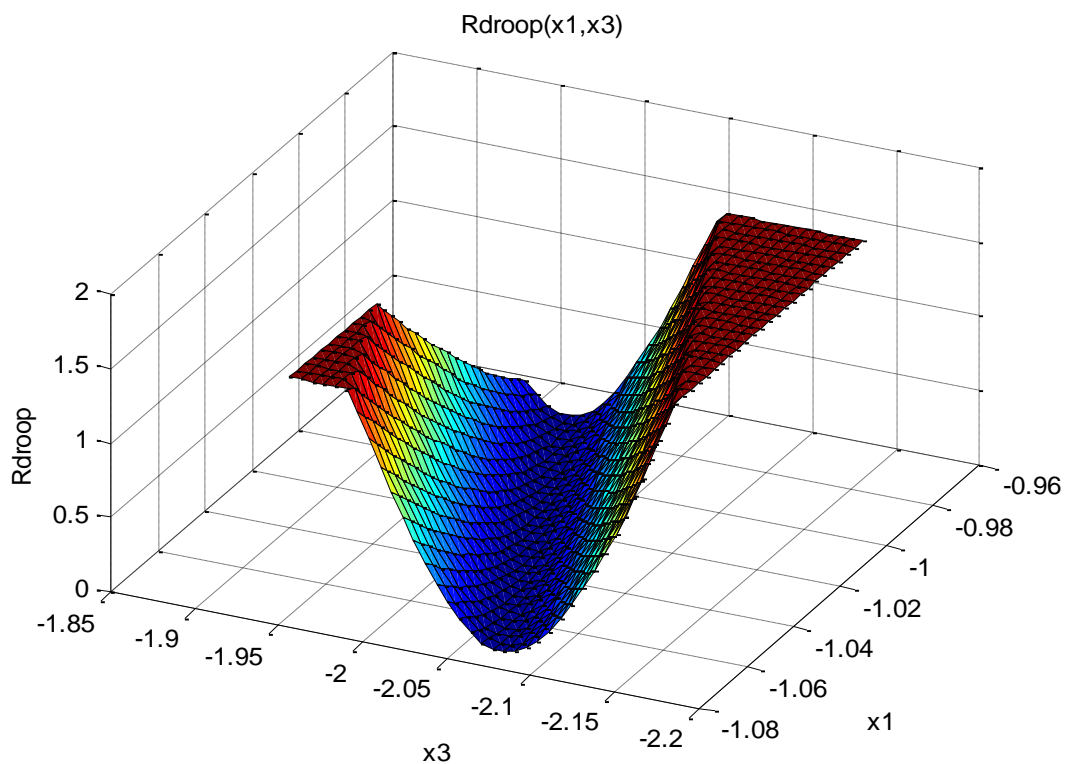
Εικόνα 4.18 Η επιφάνεια $R_{droop}(x_1, x_3)$ για τάση εξόδου $V_{dc2} = -326V$.

- $V_{dc2} = -322V$



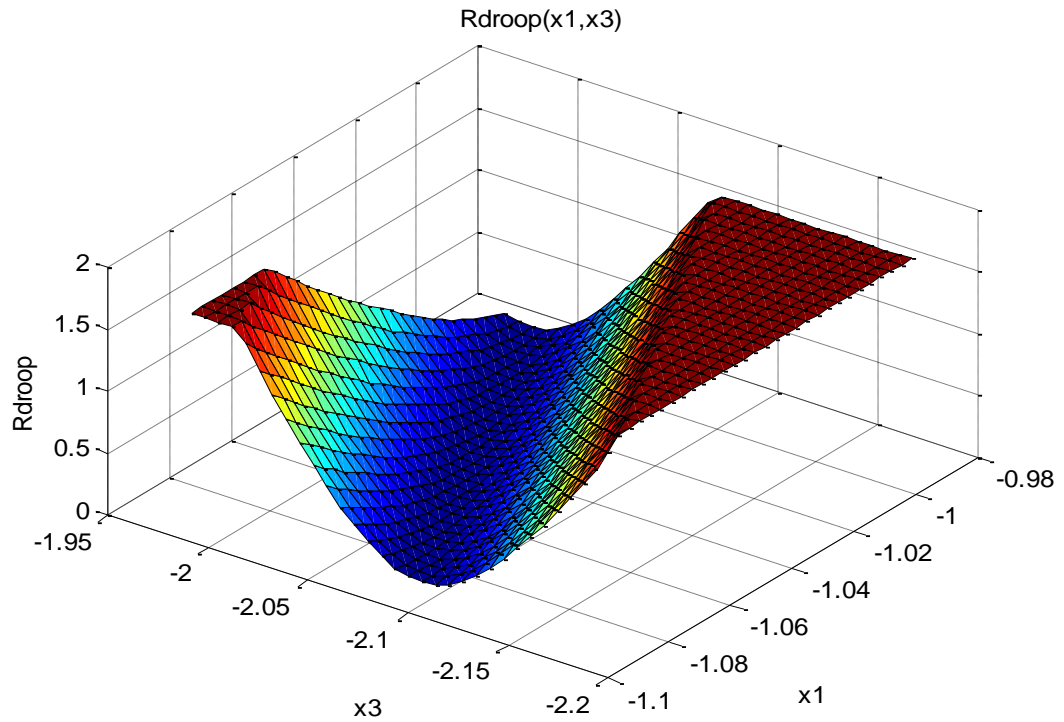
Εικόνα 4.19 Η επιφάνεια $R_{droop}(x_1, x_3)$ για τάση εξόδου $V_{dc2} = -322V$.

- $V_{dc2} = -318V$



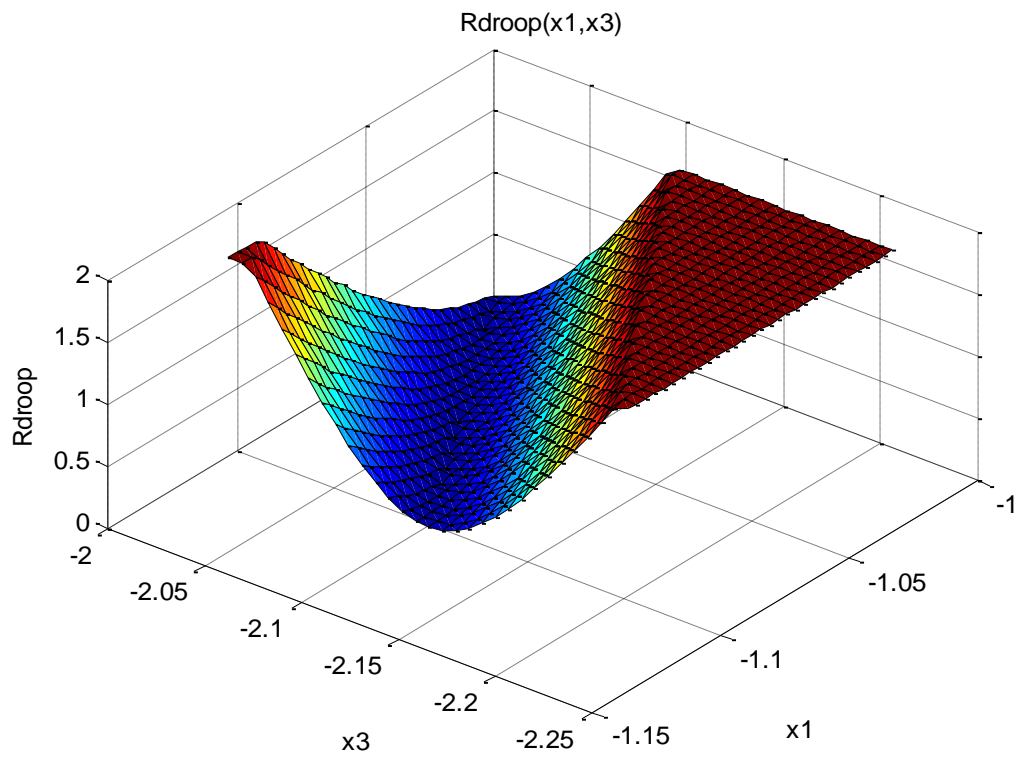
Εικόνα 4.20 Η επιφάνεια $R_{droop}(x_1, x_3)$ για τάση εξόδου $V_{dc2} = -318V$.

- $V_{dc2} = -314V$



Εικόνα 4.21 Η επιφάνεια $R_{droop}(x_1, x_3)$ για τάση εξόδου $V_{dc2} = -314V$.

- $V_{dc2} = -310V$



Εικόνα 4.22 Η επιφάνεια $R_{droop}(x_1, x_3)$ για τάση εξόδου $V_{dc2} = -310V$.

Με βάση τις επιφάνειες που παρατέθηκαν προκύπτει τα εξής συμπεράσματα:

1. Η μεταβολή της αντίστασης R_{droop} σε σχέση με τους λόγους x_3, x_1 είναι μη γραμμική.
2. Η μέγιστη τιμή που παίρνει η αντίσταση R_{droop} είναι ίση με $1,6\Omega$ ενώ η ελάχιστη τιμή της είναι ίση με $0,01\Omega$ πλην της περίπτωσης όπου $x_1 = -1$ και $x_3 = -2$ οπότε η ελάχιστη τιμή της είναι ίση με το μηδέν.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] Μελέτη των κυκλοφορούντων ρευμάτων στα DC μικροδίκτυα με σκοπό την ελαχιστοποίησή τους, Διπλωματική Εργασία, Καλπάκης Θεόδωρος, Επιβλέπων: Χατζηαργυρίου Νικόλαος-Καθηγητής ΕΜΠ, ΕΜΠ, Αθήνα, Οκτώβριος 2016.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΝΕΑΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΟΛΗ ΤΩΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΟΥΝΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗΣ

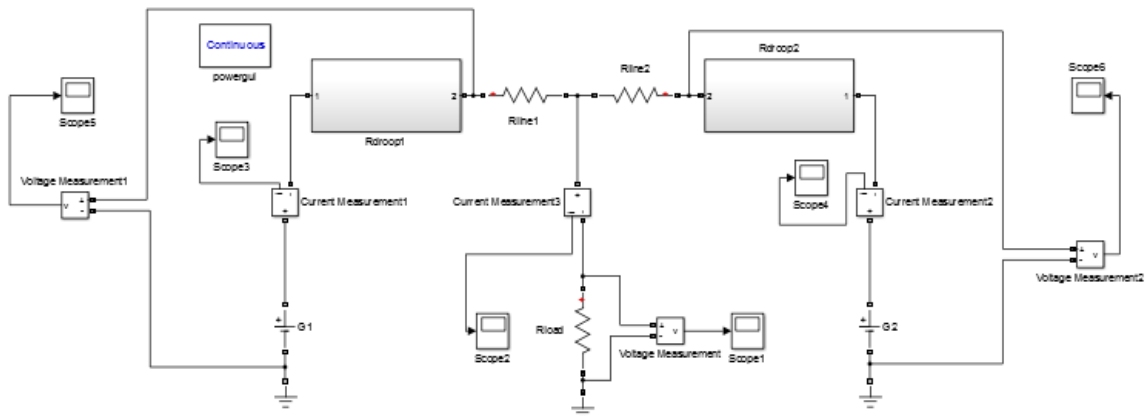
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν για να προσδιορίσουν γραφικά τη σχέση ανάμεσα στην αντίσταση R_{droop2} και στο λόγο ή στους λόγους των τάσεων εξόδου των μετατροπέων ενός μικροδικτύου DC δεν παρέχουν μόνο τη δυνατότητα να αντλούνται κάποια γενικά συμπεράσματα για τη σχέση μεταξύ των εν λόγω μεγεθών. Επιτρέπουν, επιπλέον, να επιλέγεται η αντίσταση R_{droop2} με πολύ καλή προσέγγιση για κάθε τιμή του λόγου ή των λόγων των τάσεων εξόδου των μετατροπέων ενός μικροδικτύου DC, όπως περιγράφεται στο Παράρτημα. Έτσι, προκύπτει μία βελτιωμένη έκδοση της μεθόδου Droop Index που εξασφαλίζει ταχύτερη απόκριση σε περίπτωση που για συγκεκριμένη τιμή της τάσης εξόδου V_{dc2} μεταβληθούν η τάση εξόδου V_{dc1} ή οι τάσεις εξόδου V_{dc1} ή/και V_{dc3} αν πρόκειται για τη διπολική συνδεσμολογία σύνδεσης τριών μετατροπέων μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού πόλου-αρνητικού πόλου.

Σε αυτό το κεφάλαιο, με τη βοήθεια του Simulink, μοντελοποιούνται οι συνδεσμολογίες που μελετήθηκαν στο κεφάλαιο 4. Αρχικά, μηδενίζοντας τις αντιστάσεις R_{droop} , μετρώνται και καταγράφονται τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς και το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα για συγκεκριμένη τιμή της τάσης εξόδου V_{dc2} και για διάφορες τιμές της τάσης εξόδου V_{dc1} ή των τάσεων εξόδου V_{dc1} ή/και V_{dc3} αν πρόκειται για τη διπολική συνδεσμολογία σύνδεσης τριών μετατροπέων μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού πόλου-αρνητικού πόλου. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι αντιστάσεις R_{droop} , όπως επίσης τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς και το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα, με βάση τους αλγόριθμους που υλοποιούν τη μέθοδο Droop Index και παρατίθενται στο Παράρτημα. Τέλος, επιλέγονται οι αντιστάσεις R_{droop2} με βάση τις οικογένειες καμπυλών και την οικογένεια επιφανειών που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4, υπολογίζονται όλες οι αντιστάσεις R_{droop} και μετρώνται τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς και το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα. Στόχος αποτελεί να συγκριθούν οι δύο μέθοδοι μεταξύ τους και να αντληθούν συμπεράσματα.

5.2 ΣΥΝΔΕΣΗ ΔΥΟ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΣΕ ΜΟΝΟΠΟΛΙΚΗ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ

Το ισοδύναμο κύκλωμα της συνδεσμολογίας που μελετάται σε αυτό το υποκεφάλαιο απεικονίζεται με τη βοήθεια του Simulink στη συνέχεια.



Εικόνα 5.1 Η μοντελοποίηση της συνδεσμολογίας που μελετάται με τη βοήθεια του Simulink.

Τα μεγέθη που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση εικονίζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1

V_{dc2}	326V
R_1	1.4Ω
R_2	0.8Ω
R_L	25Ω

Αρχικά, μηδενίζοντας τις αντιστάσεις R_{droop} και μεταβάλλοντας την τάση εξόδου V_{dc1} , μετρώνται και καταγράφονται τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς και το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα που παρατίθεται στη συνέχεια.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2

V_{dc1}	I_1	I_2	$ I_c $
313V	-1.33A	13.92A	5.91A
319V	1.43A	11.25A	3.18A
326V	4.65A	8.13A	0.00A
331V	6.95A	5.91A	2.27A
336V	9.24A	3.68A	4.54A

Στη συνέχεια, υπολογίζονται και καταγράφονται οι αντιστάσεις R_{droop} , τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς και το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα με βάση τη μέθοδο Droop Index.

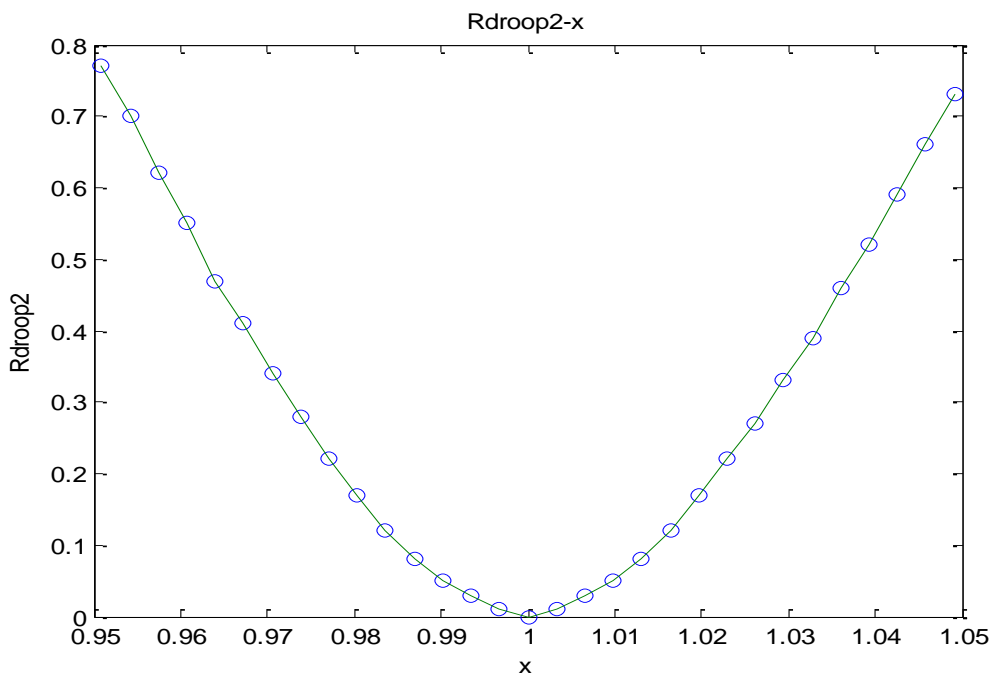
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3

V_{dc1}	I_1	I_2	$ I_c $	R_{dr1}	R_{dr2}
313V	1.04A	11.38A	3.48A	0.98Ω	0.56Ω
319V	2.04A	10.58A	2.55A	0.35Ω	0.20Ω
326V	4.65A	8.13A	0.00A	0.00Ω	0.00Ω
331V	6.66A	6.16A	2.00A	0.1925Ω	0.11Ω
336V	7.81A	4.99A	3.16A	0.6125Ω	0.35Ω

Τέλος, επιλέγεται η αντίσταση R_{droop2} με βάση την καμπύλη $R_{droop2} - x_1$ για τάση εξόδου $V_{dc2} = 326V$ και υπολογίζεται η αντίσταση R_{droop1} από τη σχέση $R_{droop1} = \frac{R_1}{R_2} * R_{droop2} = y * R_{droop2}$. Η καμπύλη $R_{droop2} - x_1$ που χρησιμοποιήθηκε και οι τιμές των ηλεκτρικών ρευμάτων μεταφοράς και του κυκλοφορούντος ηλεκτρικού ρεύματος απεικονίζονται στη συνέχεια.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4

V_{dc1}	x_1	I_1	I_2	$ I_c $	R_{dr1}	R_{dr2}
313V	0.960	1.06A	11.36A	3.46A	0.9905Ω	0.566Ω
319V	0.979	2.02A	10.60A	2.57A	0.3325Ω	0.190Ω
326V	1.000	4.65A	8.13A	0.00A	0.00Ω	0.000Ω
331V	1.015	6.68A	6.14A	2.02A	0.1785Ω	0.102Ω
336V	1.031	7.79A	5.01A	3.14A	0.6265Ω	0.358Ω



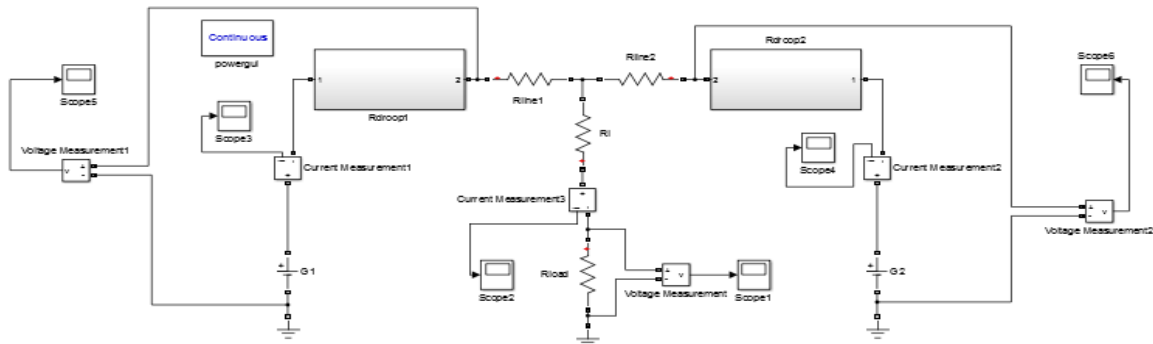
Εικόνα 5.2 Η καμπύλη $R_{droop2} - x_1$ για τάση εξόδου $V_{dc2} = 326V$.

Από τα αποτελέσματα εύκολα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

1. Η μέθοδος DI περιορίζει σημαντικά αλλά δεν καταστέλλει πλήρως το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα.
2. Η αντίσταση R_{droop2} ακολουθεί την καμπύλη $R_{droop2} - x_1$ που παρατέθηκε, αφού η επιλογή της αντίστασης R_{droop2} από την καμπύλη οδηγεί στα ίδια περίπου αποτελέσματα με την εφαρμογή της κλασσικής μεθόδου Droop Index. Οι μικρές διαφορές που υπάρχουν οφείλονται στο γεγονός ότι ο υπολογισμός της αντίστασης R_{droop2} μέσω της καμπύλης γίνεται με προσέγγιση τριών δεκαδικών ψηφίων έναντι δύο προσφέροντας μεγαλύτερη ακρίβεια. Παρόλα αυτά, οι τιμές των αντιστάσεων R_{droop} του Πίνακα 5.3 προέκυψαν μετά από πέντε διαδοχικές εκτελέσεις του αλγορίθμου που υλοποιεί την κλασσική μέθοδο Droop Index ενώ οι τιμές των αντιστάσεων R_{droop} του Πίνακα 5.4 προέκυψαν από τη μία και μοναδική εκτέλεση του αλγορίθμου που σχεδιάζει την καμπύλη $R_{droop2} - x_1$ για τάση εξόδου $V_{dc2} = 326V$.

5.3 ΚΟΙΝΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΔΥΟ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΣΕ ΜΟΝΟΠΟΛΙΚΗ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ

Το ισοδύναμο κύκλωμα της συνδεσμολογίας που μελετάται σε αυτό το υποκεφάλαιο απεικονίζεται με τη βοήθεια του Simulink στη συνέχεια.



Εικόνα 5.3 Η μοντελοποίηση της συνδεσμολογίας που μελετάται με τη βοήθεια του Simulink.

Τα μεγέθη που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση εικονίζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5

V_{dc2}	326V
R_1	1.4Ω
R_2	0.8Ω
R_L	25Ω
R_i	2.5Ω

Αρχικά, μηδενίζοντας τις αντιστάσεις R_{droop} και μεταβάλλοντας την τάση εξόδου V_{dc1} , μετρώνται και καταγράφονται τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς και το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα που παρατίθεται στη συνέχεια.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.6

V_{dc1}	I_1	I_2	$ I_c $
313V	-1.74A	13.21A	5.91A
319V	1.02A	10.53A	3.18A
326V	4.23A	7.41A	0.00A
331V	6.53A	5.18A	2.27A
336V	8.82A	2.95A	4.54A

Στη συνέχεια, υπολογίζονται και καταγράφονται οι αντιστάσεις R_{dr1} , τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς και το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα με βάση τη μέθοδο Droop Index.

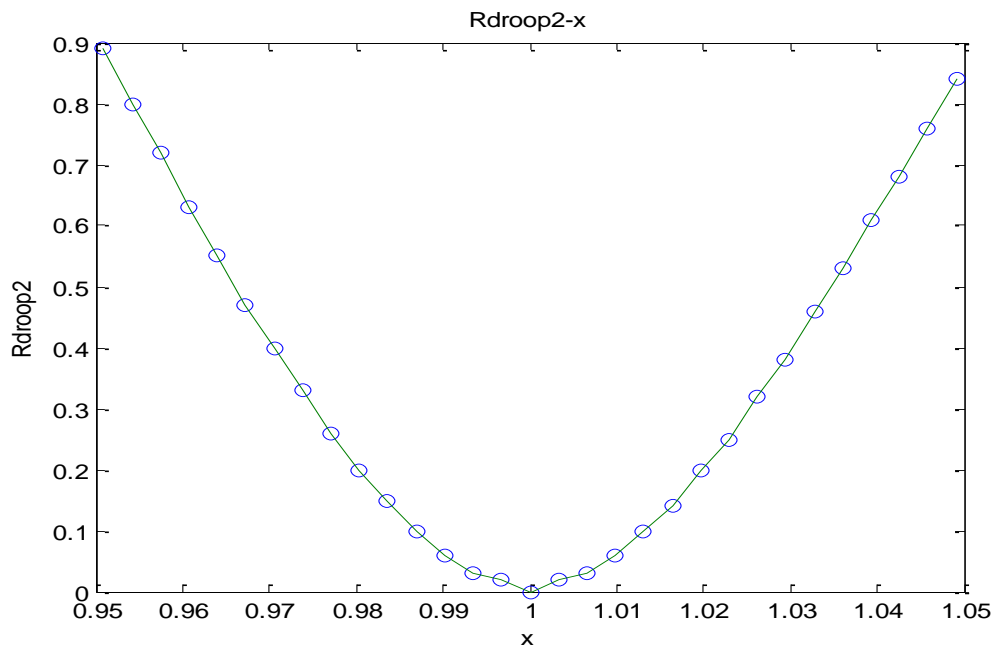
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.7

V_{dc1}	I_1	I_2	$ I_c $	R_{dr1}	R_{dr2}
313V	0.85A	10.45A	3.26A	1.1375Ω	0.65Ω
319V	1.71A	9.78A	2.47A	0.4025Ω	0.23Ω
326V	4.23A	7.41A	0.00A	0.00Ω	0.00Ω
331V	6.20A	5.47A	1.96A	0.2275Ω	0.13Ω
336V	7.24A	4.41A	3.00A	0.7175Ω	0.41Ω

Τέλος, επιλέγεται η αντίσταση R_{droop2} με βάση την καμπύλη $R_{droop2} - x_1$ για τάση εξόδου $V_{dc2} = 326V$ και υπολογίζεται η αντίσταση R_{droop1} από τη σχέση $R_{droop1} = \frac{R_1}{R_2} * R_{droop2} = y * R_{droop2}$. Η καμπύλη $R_{droop2} - x_1$ που χρησιμοποιήθηκε και οι τιμές των ηλεκτρικών ρευμάτων μεταφοράς και του κυκλοφορούντος ηλεκτρικού ρεύματος απεικονίζονται στη συνέχεια.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.8

V_{dc1}	x_1	I_1	I_2	$ I_c $	R_{dr1}	R_{dr2}
313V	0.960	0.85A	10.45A	3.26A	1.1375Ω	0.650Ω
319V	0.979	1.69A	9.80A	2.49A	0.3920Ω	0.224Ω
326V	1.000	4.23A	7.41A	0.00A	0.00Ω	0.000Ω
331V	1.015	6.21A	5.46A	1.97A	0.2135Ω	0.122Ω
336V	1.031	7.23A	4.42A	2.99A	0.7298Ω	0.417Ω



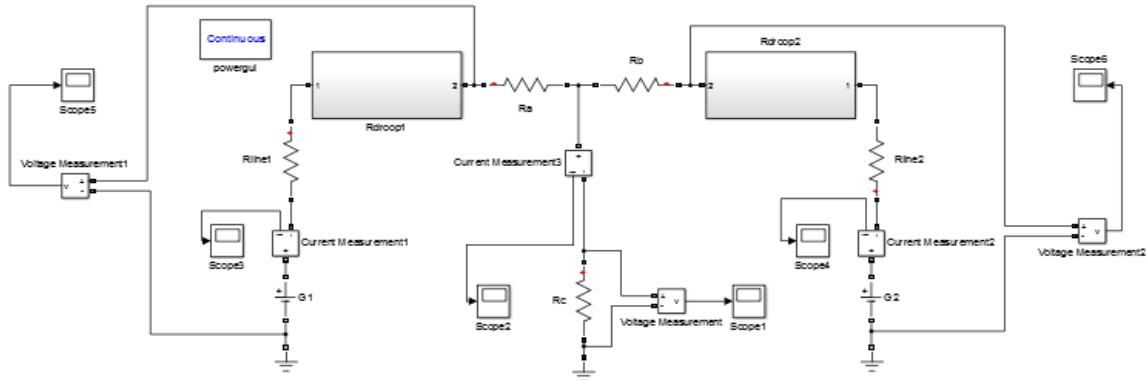
Εικόνα 5.4 Η καμπύλη $R_{droop2} - x_1$ για τάση εξόδου $V_{dc2} = 326V$.

Από τα αποτελέσματα εύκολα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

1. Η μέθοδος DI περιορίζει σημαντικά αλλά δεν καταστέλλει πλήρως το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα.
2. Η αντίσταση R_{droop2} ακολουθεί την καμπύλη $R_{droop2} - x_1$ που παρατέθηκε, αφού η επιλογή της αντίστασης R_{droop2} από την καμπύλη οδηγεί στα ίδια περίπου αποτελέσματα με την εφαρμογή της κλασικής μεθόδου Droop Index. Οι μικρές διαφορές που υπάρχουν οφείλονται στο γεγονός ότι ο υπολογισμός της αντίστασης R_{droop2} μέσω της καμπύλης γίνεται με προσέγγιση τριών δεκαδικών ψηφίων έναντι δύο προσφέροντας μεγαλύτερη ακρίβεια. Παρόλα αυτά, οι τιμές των αντιστάσεων R_{droop} του Πίνακα 5.7 προέκυψαν μετά από πέντε διαδοχικές εκτελέσεις του αλγορίθμου που υλοποιεί την κλασική μέθοδο Droop Index ενώ οι τιμές των αντιστάσεων R_{droop} του Πίνακα 5.8 προέκυψαν από τη μία και μοναδική εκτέλεση του αλγορίθμου που σχεδιάζει την καμπύλη $R_{droop2} - x_1$ για τάση εξόδου $V_{dc2} = 326V$.

5.4 ΔΙΠΟΛΙΚΗ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΔΥΟ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΘΕΤΙΚΟΥ ΠΟΛΟΥ-ΟΥΔΕΤΕΡΟΥ ΚΑΙ ΑΡΝΗΤΙΚΟΥ ΠΟΛΟΥ-ΟΥΔΕΤΕΡΟΥ

Το ισοδύναμο κύκλωμα της συνδεσμολογίας που μελετάται σε αυτό το υποκεφάλαιο απεικονίζεται με τη βοήθεια του Simulink στη συνέχεια.



Εικόνα 5.5 Η μοντελοποίηση της συνδεσμολογίας που μελετάται με τη βοήθεια του Simulink.

Τα μεγέθη που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση εικονίζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.9

V_{dc2}	-326V
R_1	1.4Ω
R_2	0.8Ω
R_a	20Ω
R_b	20Ω
R_c	40Ω

Αρχικά, μηδενίζοντας τις αντιστάσεις R_{diode} και μεταβάλλοντας την τάση εξόδου V_{dc1} , μετρώνται και καταγράφονται τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς και το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα που παρατίθεται στη συνέχεια.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.10

V_{dc1}	I_1	I_2	$ I_c $
313V	15.04A	-15.25A	0.24A
319V	15.21A	-15.37A	0.13A
326V	15.41A	-15.50A	0.00A
331V	15.55A	-15.59A	0.09A
336V	15.69A	-15.68A	0.19A

Στη συνέχεια, υπολογίζονται και καταγράφονται οι αντιστάσεις R_{droop} , τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς και το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα με βάση τη μέθοδο Droop Index.

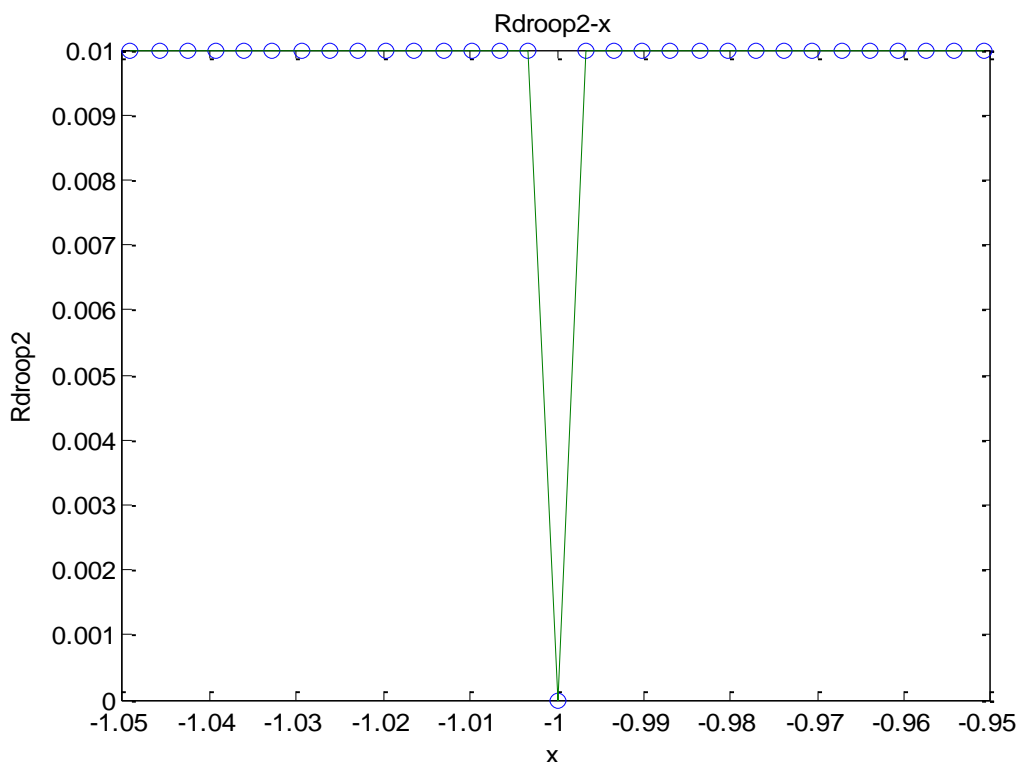
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.11

V_{dc1}	I_1	I_2	$ I_c $	R_{dr1}	R_{dr2}
313V	14.78A	-15.08A	0.24A	0.61Ω	0.01Ω
319V	14.94A	-15.19A	0.13A	0.61Ω	0.01Ω
326V	15.41A	-15.50A	0.00A	0.00Ω	0.00Ω
331V	15.28A	-15.41A	0.09A	0.61Ω	0.01Ω
336V	15.42A	-15.50A	0.19A	0.61Ω	0.01Ω

Τέλος, επιλέγεται η αντίσταση R_{droop2} με βάση την καμπύλη $R_{droop2} - x_1$ για τάση εξόδου $V_{dc2} = -326V$ και υπολογίζεται η αντίσταση R_{droop1} από τη σχέση $y = \frac{R_{droop1} + R_a + 2 * R_c}{R_{droop2} + R_b + 2 * R_c} = \frac{R_1 + R_a + 2 * R_c}{R_2 + R_b + 2 * R_c}$. Η καμπύλη $R_{droop2} - x_1$ που χρησιμοποιήθηκε και οι τιμές των ηλεκτρικών ρευμάτων μεταφοράς και του κυκλοφορούντος ηλεκτρικού ρεύματος απεικονίζονται στη συνέχεια.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.12

V_{dc1}	x_1	I_1	I_2	$ I_c $	R_{dr1}	R_{dr2}
313V	-0.960	14.78A	-15.08A	0.24A	0.61Ω	0.01Ω
319V	-0.979	14.94A	-15.19A	0.13A	0.61Ω	0.01Ω
326V	-1.000	15.41A	-15.50A	0.00A	0.00Ω	0.00Ω
331V	-1.015	15.28A	-15.41A	0.09A	0.61Ω	0.01Ω
336V	-1.031	15.42A	-15.50A	0.19A	0.61Ω	0.01Ω



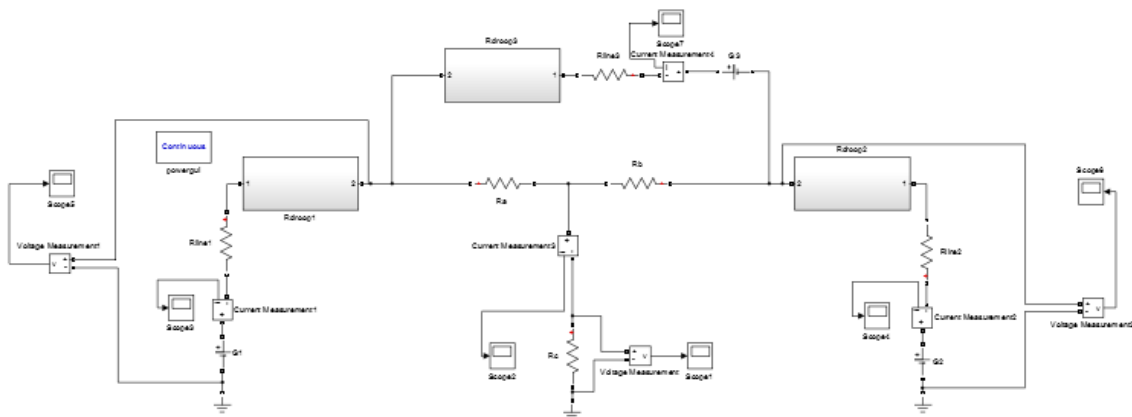
Εικόνα 5.6 Η καμπύλη $R_{droop2} - x_1$ για τάση εξόδου $V_{dc2} = -326V$.

Από τα αποτελέσματα εύκολα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

1. Η μέθοδος DI δεν περιορίζει το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα, αφού, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, είναι ήδη πάρα πολύ χαμηλό και η αντίσταση R_{droop2} υπολογίζεται ίση με την ελάχιστη τιμή ($0,01\Omega$) που παίρνει κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου που υλοποιεί τη μέθοδο Droop Index.
2. Η αντίσταση R_{droop2} ακολουθεί την καμπύλη $R_{droop2} - x_1$ που παρατέθηκε, αφού η επιλογή της αντίστασης R_{droop2} από την καμπύλη οδηγεί στα ίδια περίπου αποτελέσματα με την εφαρμογή της κλασσικής μεθόδου Droop Index. Οι μικρές διαφορές που υπάρχουν οφείλονται σε απλοποιήσεις κατά τη διαδικασία προσδιορισμού των ηλεκτρικών ρευμάτων των γραμμών μεταφοράς μετά από την προσθήκη των αντιστάσεων R_{droop} .

5.5 ΔΙΠΟΛΙΚΗ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΡΙΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΘΕΤΙΚΟΥ ΠΟΛΟΥ-ΟΥΔΕΤΕΡΟΥ, ΑΡΝΗΤΙΚΟΥ ΠΟΛΟΥ-ΟΥΔΕΤΕΡΟΥ ΚΑΙ ΘΕΤΙΚΟΥ ΠΟΛΟΥ-ΑΡΝΗΤΙΚΟΥ ΠΟΛΟΥ

Το ισοδύναμο κύκλωμα της συνδεσμολογίας που μελετάται σε αυτό το υποκεφάλαιο απεικονίζεται με τη βοήθεια του Simulink στη συνέχεια.



Εικόνα 5.7 Η μοντελοποίηση της συνδεσμολογίας που μελετάται με τη βοήθεια του Simulink.

Τα μεγέθη που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση εικονίζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.13

V_{dc2}	-326V
R_1	1.1Ω
R_2	1.1Ω
R_3	1.1Ω
R_a	25Ω
R_b	25Ω
R_c	25Ω

Αρχικά, μηδενίζοντας τις αντιστάσεις R_{droop} και μεταβάλλοντας την τάση εξόδου V_{dc1} , μετρώνται και καταγράφονται τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς και το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα που παρατίθεται στη συνέχεια.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.14

V_{dc1}	V_{dc3}	I_1	I_2	I_3	$ I_C $
313V	626V	8.00A	-8.17A	4.34A	3.88A
319V	638V	6.28A	-6.37A	6.29A	2.09A
326V	652V	4.28A	-4.28A	8.57A	0.00A
331V	662V	2.86A	-2.79A	10.19A	1.49A
336V	672V	1.43A	-1.30A	11.82A	2.99A

Στη συνέχεια, υπολογίζονται και καταγράφονται οι αντιστάσεις R_{droop} , τα ηλεκτρικά ρεύματα των γραμμών μεταφοράς και το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα με βάση τη μέθοδο Droop Index.

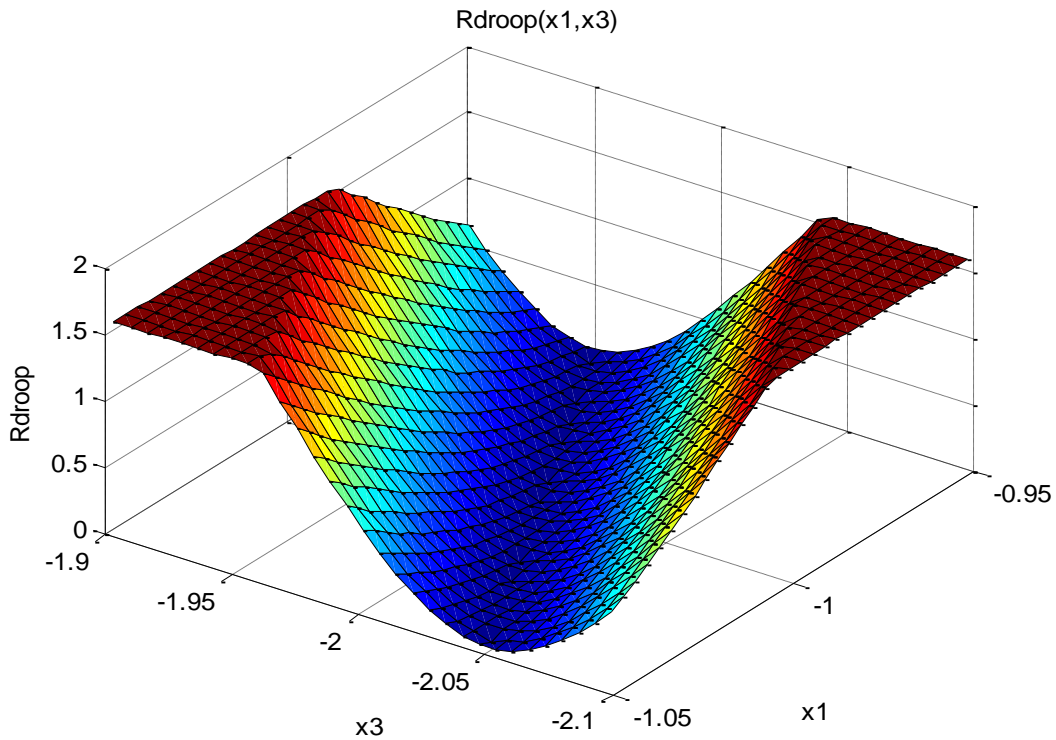
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.15

V_{dc1}	V_{dc3}	I_1	I_2	I_3	$ I_C $	R_{dr}
313V	626V	6.77A	-6.94A	5.49A	2.69A	0.48Ω
319V	638V	5.99A	-6.08A	6.56A	1.81A	0.17Ω
326V	652V	4.28A	-4.28A	8.57A	0.00A	0.00Ω
331V	662V	2.98A	-2.91A	10.05A	1.37A	0.10Ω
336V	672V	2.03A	-1.90A	11.17A	2.37A	0.28Ω

Τέλος, επιλέγεται η αντίσταση R_{droop} με βάση την επιφάνεια $R_{droop}(x_1, x_3)$ για τάση εξόδου $V_{dc2} = -326V$. Η επιφάνεια $R_{droop}(x_1, x_3)$ που χρησιμοποιήθηκε και οι τιμές των ηλεκτρικών ρευμάτων μεταφοράς και του κυκλοφορούντος ηλεκτρικού ρεύματος απεικονίζονται στη συνέχεια.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.16

V_{dc1}	x_1	V_{dc3}	x_3	I_1	I_2	I_3	$ I_C $	R_{dr}
313V	-0.960	626V	-1.920	6.78A	-6.95A	5.48A	2.69A	0.475Ω
319V	-0.979	638V	-1.957	5.97A	-6.06A	6.57A	1.79A	0.182Ω
326V	-1.000	652V	-2.000	4.28A	-4.28A	8.57A	0.00A	0.000Ω
331V	-1.015	662V	-2.031	2.98A	-2.92A	10.05A	1.36A	0.105Ω
336V	-1.031	672V	-2.061	2.02A	-1.89A	11.18A	2.38A	0.276Ω



Εικόνα 5.8 Η επιφάνεια $R_{droop}(x_1, x_3)$ για τάση εξόδου $V_{dc2} = -326V$.

Από τα αποτελέσματα εύκολα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

1. Η μέθοδος DI περιορίζει σημαντικά αλλά δεν καταστέλλει πλήρως το κυκλοφορούν ηλεκτρικό ρεύμα.
2. Η αντίσταση R_{droop} ακολουθεί την επιφάνεια $R_{droop}(x_1, x_3)$ που παρατέθηκε, αφού η επιλογή της αντίστασης R_{droop} από την επιφάνεια οδηγεί στα ίδια περίπου αποτελέσματα με την εφαρμογή της κλασσικής μεθόδου Droop Index. Οι μικρές διαφορές που υπάρχουν οφείλονται στο γεγονός ότι ο υπολογισμός της αντίστασης R_{droop} μέσω της επιφάνειας γίνεται με προσέγγιση τριών δεκαδικών ψηφίων έναντι δύο προσφέροντας μεγαλύτερη ακρίβεια. Παρόλα αυτά, οι τιμές των αντιστάσεων R_{droop} του Πίνακα 5.15 προέκυψαν μετά από πέντε διαδοχικές εκτελέσεις του αλγορίθμου που υλοποιεί την κλασσική μέθοδο Droop Index ενώ οι τιμές των αντιστάσεων R_{droop} του Πίνακα 5.16 προέκυψαν από τη μία και μοναδική εκτέλεση του αλγορίθμου που σχεδιάζει την επιφάνεια $R_{droop}(x_1, x_3)$ για τάση εξόδου $V_{dc2} = -326V$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ

6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάπτυξη των μικροδικτύων DC και κατ' επέκταση η ώθηση που μπορεί να δώσουν στην ανάπτυξη της Διεσπαρμένης Παραγωγής εξαρτώνται άμεσα από τα δύο πολύ σημαντικά προβλήματα που καλείται να επιλύσει ο πρωτογενής ή πρωταρχικός έλεγχος, τον κακό διαμοιρασμό του φορτίου και το φαινόμενο των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων.

Από τις μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί μέχρι και σήμερα για την καταστολή των κυκλοφορούντων ηλεκτρικών ρευμάτων διακρίνεται η μέθοδος Droop Index που επιχειρεί να βρει τη βέλτιστη λύση για το σύστημα λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα κυκλοφορούντα όσο και τις απώλειες στις γραμμές μεταφοράς που αυξάνονται με την αύξηση των αντιστάσεων R_{droop} .

Η γραφική αποτύπωση της σχέσης ανάμεσα στην αντίσταση R_{droop2} και στο λόγο ή στους λόγους των τάσεων εξόδου των μετατροπέων ενός μικροδικτύου DC εξασφαλίζει ταχύτερη απόκριση της μεθόδου και μεγαλύτερη ακρίβεια. Παρόλα αυτά, δεν επιλύει τα προβλήματα που αυτή αντιμετωπίζει:

- Το γεγονός ότι δεν καταστέλλει πλήρως τα κυκλοφορούντα ηλεκτρικά ρεύματα και άρα δεν επιτυγχάνει τον καλύτερο δυνατό διαμοιρασμό του φορτίου.
- Το γεγονός ότι δεν ικανοποιεί το σενάριο «plug-and-play» από την άποψη ότι για κάθε αλλαγή της τοπολογίας χρειάζεται εκ νέου υπολογισμός των ηλεκτρικών ρευμάτων των γραμμών μεταφοράς, των απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας, του δείκτη DI και των αντιστάσεων R_{droop} .
- Το γεγονός ότι κατά τους υπολογισμούς απαιτείται η γνώση χαρακτηριστικών του δικτύου που δεν είναι εύκολα γνωστά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι αντιστάσεις των γραμμών μεταφοράς που συνήθως δε μπορούν να προσδιοριστούν με ακρίβεια.

6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ

Με βάση το γεγονός ότι η μεταβολή της αντίστασης R_{droop2} σε σχέση με το λόγο ή τους λόγους των τάσεων εξόδου των μετατροπέων ενός μικροδικτύου DC είναι μη γραμμική σε όλες τις συνδεσμολογίες που μελετήθηκαν θα μπορούσε στο μέλλον ως συνέχεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας να διερευνηθεί το ενδεχόμενο της χρήσης ασαφών ελεγκτών με είσοδο το λόγο ή τους λόγους των τάσεων εξόδου και έξοδο την αντίσταση R_{droop2} .

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1. Αλγόριθμος για τη γραφική αναπαράσταση της σχέσης μεταξύ R_{droop2} και $x_1 = \frac{V_{dc1}}{V_{dc2}}$ για τη σύνδεση δύο μετατροπέων σε μονοπολική συνδεσμολογία.

```
Vdc2=326;
R1=1.4;
R2=0.8;
RL=25;
a=310/Vdc2;
b=342/Vdc2;
c=(b-a)/30;
y=R1/R2;
d=1.6/y;
x=a;
X=zeros(31,1);
Rd2=zeros(31,1);
k=1;
for x=a:c:b
    X(k)=x;
    if x~=1
        j=0.01;
        m=(R2+j);
        q=m*RL*(y+1);
        I1a=((m+RL)*x*Vdc2)-(RL*Vdc2)/q;
        I2a(((y*m)+RL)*Vdc2)-(x*RL*Vdc2)/q;
        Ploss_max(((I1a^2)*y*m)+((I2a^2)*m));
        Np=(1/(Ploss_max));
        Ic_max(((abs(x-1))*Vdc2)/((y+1)*m));
        Ni=(1/(Ic_max));
        min=10;
        i=0.01;
        p=1;
        I1=zeros(160,1);
        I2=zeros(160,1);
        Ploss=zeros(160,1);
        Ic=zeros(160,1);
        DI=zeros(160,1);
        Rd=zeros(160,1);
        for i=0.01:0.01:1.6
            m=(R2+i);
            q=m*RL*(y+1);
            I1(p)=((m+RL)*x*Vdc2)-(RL*Vdc2)/q;
            I2(p)=(((y*m)+RL)*Vdc2)-(x*RL*Vdc2)/q;
            Ploss(p)=(((I1(p)^2)*y*m)+((I2(p)^2)*m));
            Ic(p)=(((x-1)*Vdc2)/((y+1)*m));
            DI(p)=(((1/2)*(abs(Ic(p)))*Ni)+((1/2)*(Ploss(p)*Np)));
            p=p+1;
        end
        l=1;
        for l=1:1:160
            Rd(l)=1*0.01;
            if DI(l)<min
                min=DI(l);
                Rd2a=1*0.01;
            end
        end
        else
            Rd2a=0;
        end
        if Rd2a>d
            Rd2(k)=d;
        else
            Rd2(k)=Rd2a;
        end
        k=k+1;
    end
end
x=a:c:b;
rd2=interp1(X,Rd2,x,'spline');
plot(X,Rd2,'o',x,rd2)
title('Rdroop2-x')
ylabel('Rdroop2')
xlabel('x')
```

Η εκτίμηση της αντίστασης R_{droop2} για οποιαδήποτε τιμή του λόγου $x_1 = \frac{V_{dc1}}{V_{dc2}}$ μπορεί να πραγματοποιηθεί πατώντας στη γραμμή εργαλείων του παραθύρου που προβάλλει την καμπύλη $R_{droop2} - x_1$ την επιλογή “Tools” και στη συνέχεια την επιλογή “Basic Fitting”.

2. Αλγόριθμος για τον υπολογισμό των αντιστάσεων R_{droop} με βάση τη μέθοδο Droop Index για τη σύνδεση δύο μετατροπέων σε μονοπολική συνδεσμολογία.

```

Vdc1=326;
Vdc2=326;
R1=1.4;
R2=0.8;
RL=25;
x=Vdc1/Vdc2;
y=R1/R2;
d=1.6/y;
if x~=1
j=0.01;
m=(R2+j);
q=(m*RL*(y+1));
I1a=((m+RL)*x*Vdc2)-(RL*Vdc2)/q;
I2a((((y*m)+RL)*Vdc2)-(x*RL*Vdc2))/q;
Ploss_max=((I1a^2)*y*m)+((I2a^2)*m);
Np=(17*(Ploss_max));
Ic_max(((abs(x-1))*Vdc2)/((y+1)*m));
Ni=(1/(Ic_max));
min=10;
i=0.01;
p=1;
I1=zeros(160,1);
I2=zeros(160,1);
Ploss=zeros(160,1);
Ic=zeros(160,1);
DI=zeros(160,1);
Rd=zeros(160,1);
for i=0.01:0.01:1.6
m=(R2+i);
q=(m*RL*(y+1));
I1(p)=((m+RL)*x*Vdc2)-(RL*Vdc2)/q;
I2(p)=((((y*m)+RL)*Vdc2)-(x*RL*Vdc2))/q;
Ploss(p)=((I1(p)^2)*y*m)+((I2(p)^2)*m);
Ic(p)=(((x-1)*Vdc2)/((y+1)*m));
DI(p)=((1/2)*(abs(Ic(p)))*Ni)+((1/2)*(Ploss(p)*Np));
p=p+1;
end
l=1;
for l=1:1:160
Rd(l)=1*0.01;
if DI(l)<min
min=DI(l);
Rd2=l*0.01;
end
end
Rd1=y*Rd2;
else
Rd1=0;
Rd2=0;
end
if Rd2>d
Rd2=d;
Rd1=1.6;
end

```


3. Αλγόριθμος για τη γραφική αναπαράσταση της σχέσης μεταξύ R_{droop2} και $x_1 = \frac{V_{dc1}}{V_{dc2}}$ για την κοινή σύνδεση δύο παράλληλων μετατροπέων σε μονοπολική συνδεσμολογία.

```

Vdc2=326;
R1=1.4;
R2=0.8;
RL=25;
RI=2.5;
RL=RL+RI;
a=310/Vdc2;
b=342/Vdc2;
c=(b-a)/30;
y=R1/R2;
d=1.6/y;
x=a;
X=zeros(31,1);
Rd2=zeros(31,1);
k=1;
for x=a:c:b
    X(k)=x;
    if x~=1
        j=0.01;
        m=(R2+j);
        q=m*RL*(y+1);
        I1a=((m+RL)*x*Vdc2)-(RL*Vdc2)/q;
        I2a=((y*m)+RL)*Vdc2-(x*RL*Vdc2)/q;
        Ploss_max=((I1a^2)*y*m)+((I2a^2)*m);
        Np=(1/(Ploss_max));
        Ic_max=((abs(x-1))*Vdc2)/((y+1)*m);
        Ni=(1/(Ic_max));
        min=10;
        i=0.01;
        p=1;
        I1=zeros(160,1);
        I2=zeros(160,1);
        Ploss=zeros(160,1);
        Ic=zeros(160,1);
        DI=zeros(160,1);
        Rd=zeros(160,1);
        for i=0.01:0.01:1.6
            m=(R2+i);
            q=m*RL*(y+1);
            I1(p)=((m+RL)*x*Vdc2)-(RL*Vdc2)/q;
            I2(p)=(((y*m)+RL)*Vdc2)-(x*RL*Vdc2)/q;
            Ploss(p)=(((I1(p)^2)*y*m)+((I2(p)^2)*m));
            Ic(p)=(((x-1)*Vdc2)/((y+1)*m));
            DI(p)=(((1/2)*(abs(Ic(p)))*Ni)+((1/2)*(Ploss(p)*Np)));
            p=p+1;
        end
        l=1;
        for l=1:1:160
            Rd(l)=1*0.01;
            if DI(l)<min
                min=DI(l);
                Rd2a=1*0.01;
            end
        end
        Rd2a=0;
    else
        Rd2a>d
        Rd2(k)=d;
    else
        Rd2(k)=Rd2a;
    end
    k=k+1;
end
x=a:c:b;
rd2=interp1(X,Rd2,x,'spline');
plot(X,Rd2,'o',x,rd2)
title('Rdroop2-x')
ylabel('Rdroop2')
xlabel('x')

```

Η εκτίμηση της αντίστασης R_{droop2} για οποιαδήποτε τιμή του λόγου $x_1 = \frac{V_{dc1}}{V_{dc2}}$ μπορεί να πραγματοποιηθεί πατώντας στη γραμμή εργαλείων του παραθύρου που προβάλλει την καμπύλη $R_{droop2} - x_1$ την επιλογή “Tools” και στη συνέχεια την επιλογή “Basic Fitting”.

4. Αλγόριθμος για το υπολογισμό των αντιστάσεων R_{droop} με βάση τη μέθοδο Droop Index για την κοινή σύνδεση δύο παράλληλων μετατροπέων σε μονοπολική συνδεσμολογία.

```

Vdc1=326;
Vdc2=326;
R1=1.4;
R2=0.8;
RL=25;
RI=2.5;
RL=RL+RI;
x=Vdc1/Vdc2;
y=R1/R2;
d=1.6/y;
if x~=1
j=0.01;
m=(R2+j);
q=(m*RL*(y+1));
I1a=((m+RL)*x*Vdc2)-(RL*Vdc2)/q;
I2a=((y*m)+RL)*Vdc2-(x*RL*Vdc2)/q;
Ploss_max=((I1a^2)*y*m)+((I2a^2)*m);
Np=(1/(Ploss_max));
Ic_max=((abs(x-1))*Vdc2)/((y+1)*m);
Ni=(1/(Ic_max));
min=10;
i=0.01;
p=1;
I1=zeros(160,1);
I2=zeros(160,1);
Ploss=zeros(160,1);
Ic=zeros(160,1);
DI=zeros(160,1);
Rd=zeros(160,1);
for i=0.01:0.01:1.6
m=(R2+i);
q=(m*RL*(y+1));
I1(p)=((m+RL)*x*Vdc2)-(RL*Vdc2)/q;
I2(p)=(((y*m)+RL)*Vdc2)-(x*RL*Vdc2)/q;
Ploss(p)=((I1(p)^2)*y*m)+((I2(p)^2)*m);
Ic(p)=((x-1)*Vdc2)/((y+1)*m);
DI(p)=(((1/2)*(abs(Ic(p)))*Ni)+((1/2)*(Ploss(p)*Np)));
p=p+1;
end
l=1;
for l=1:1:160
Rd(l)=1*0.01;
if DI(l)<min
min=DI(l);
Rd2=1*0.01;
end
end
Rd1=y*Rd2;
else
Rd1=0;
Rd2=0;
end
if Rd2>d
Rd2=d;
Rd1=1.6;
end
end

```

5. Αλγόριθμος για τη γραφική αναπαράσταση της σχέσης μεταξύ R_{droop2} και $x_1 = \frac{V_{dc1}}{V_{dc2}}$ για τη διπολική συνδεσμολογία σύνδεσης δύο μετατροπέων μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου.

```

Vdc2=-326;
R1=1.4;
R2=0.8;
Ra=20;
Rb=20;
Rc=40;
a=342/Vdc2;
b=310/Vdc2;
c=(b-a)/30;
x=a;
y=(R1+Ra+(2*Rc))/(R2+Rb+(2*Rc));
d=1.6/y;
X=zeros(31,1);
Rd2=zeros(31,1);
k=1;
for x=a:c:b
    X(k)=x;
    if x~-1
        j=0.01;
        m=(R2+j);
        q=((m*y)+(y*Rb)+(2*y*Rc)-Ra-2*Rc)*(Rb+Rc)+(m*(Ra+Rc)+(Ra*Rb)+(Ra*Rc)+(Rb*Rc));
        I1a=((R2+Rb)*x*Vdc2+(2*Rc*x*Vdc2)-(Rc*Vdc2*(x+1)))/q;
        I2a=((R1+Ra)*Vdc2+(2*Rc*Vdc2)-(Rc*Vdc2*(1+x)))/q;
        Ploss_max=((I1a^2)*((m*y)+(y*Rb)+(2*y*Rc)-Ra-2*Rc))+((I2a^2)*m);
        Np=(1/Ploss_max);
        Ic_max=(abs(Vdc2*(x+1))*Rc)/q;
        Ni=(1/(Ic_max));
        min=10;
        i=0.01;
        p=1;
        I1=zeros(160,1);
        I2=zeros(160,1);
        Ploss=zeros(160,1);
        Ic=zeros(160,1);
        DI=zeros(160,1);
        Rd=zeros(160,1);
        for i=0.01:0.01:1.6
            m=(R2+i);
            q=((m*y)+(y*Rb)+(2*y*Rc)-Ra-2*Rc)*(Rb+Rc)+(m*(Ra+Rc)+(Ra*Rb)+(Ra*Rc)+(Rb*Rc));
            I1(p)=((R2+Rb)*x*Vdc2+(2*Rc*x*Vdc2)-(Rc*Vdc2*(x+1)))/q;
            I2(p)=((R1+Ra)*Vdc2+(2*Rc*Vdc2)-(Rc*Vdc2*(1+x)))/q;
            Ploss(p)=((I1(p)^2)*((m*y)+(y*Rb)+(2*y*Rc)-Ra-2*Rc))+((I2(p)^2)*m);
            Ic(p)=((-Vdc2*(x+1))*Rc)/q;
            DI(p)=((1/2)*(abs(Ic(p)*Ni)))+(1/2)*(Ploss(p)*Np);
            p=p+1;
        end
        l=1;
        for l=1:1:160
            Rd(l)=1*0.01;
            if DI(l)<min
                min=DI(l);
                Rd2a=1*0.01;
            end
        end
        Rd2a=0;
    end
    if Rd2a>d
        Rd2(k)=d;
    else
        Rd2(k)=Rd2a;
    end
    k=k+1;
end
x=a:c:b;
rd2=interp1(X,Rd2,x,'spline');
plot(X,Rd2,'o',x,rd2)
title('Rdroop2-x')
ylabel('Rdroop2')
xlabel('x')

```

Η εκτίμηση της αντίστασης R_{droop2} για οποιαδήποτε τιμή του λόγου $x_1 = \frac{V_{dc1}}{V_{dc2}}$ μπορεί να πραγματοποιηθεί πατώντας στη γραμμή εργαλείων του παραθύρου που προβάλλει την καμπύλη $R_{droop2} - x_1$ την επιλογή “Tools” και στη συνέχεια την επιλογή “Basic Fitting”.

6. Αλγόριθμος για το υπολογισμό των αντιστάσεων R_{droop} με βάση τη μέθοδο Droop Index για τη διπολική συνδεσμολογία σύνδεσης δύο μετατροπέων μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου.

```

Vdc1=326;
Vdc2=-326;
R1=1.4;
R2=0.8;
Ra=20;
Rb=20;
Rc=40;
x=Vdc1/Vdc2;
y=(R1+Ra+(2*Rc))/(R2+Rb+(2*Rc));
d=1.6/y;
if x~-1
j=0.01;
m=(R2+j);
q=(( (m*y)+(y*Rb)+(2*y*Rc)-Ra-2*Rc)*(Rb+Rc)+(m*(Ra+Rc)+(Ra*Rb)+(Ra*Rc)+(Rb*Rc));
I1a=(( (R2+Rb)*x*Vdc2)-(2*Rc*x*Vdc2)+(Rc*Vdc2*(x+1)))/q;
I2a=(( (R1+Ra)*Vdc2)-(2*Rc*Vdc2)+(Rc*Vdc2*(1+x)))/q;
Ploss_max=(( (I1a^2)*((m*y)+(y*Rb)+(2*y*Rc)-Ra-2*Rc))+((I2a^2)*m));
Np=(1/Ploss_max);
Ic_max=(abs(Vdc2*(x+1)*Rc)/q);
Ni=(1/(Ic_max));
min=10;
i=0.01;
p=1;
I1=zeros(160,1);
I2=zeros(160,1);
Ploss=zeros(160,1);
Ic=zeros(160,1);
DI=zeros(160,1);
Rd=zeros(160,1);
for i=0.01:0.01:1.6
m=(R2+i);
q=(( (m*y)+(y*Rb)+(2*y*Rc)-Ra-2*Rc)*(Rb+Rc)+(m*(Ra+Rc)+(Ra*Rb)+(Ra*Rc)+(Rb*Rc));
I1(p)=(( (R2+Rb)*x*Vdc2)-(2*Rc*Vdc2)+(Rc*Vdc2*(x+1)))/q;
I2(p)=(( (R1+Ra)*Vdc2)-(2*x*Rc*Vdc2)+(Rc*Vdc2*(1+x)))/q;
Ploss(p)=(( (I1(p)^2)*((m*y)+(y*Rb)+(2*y*Rc)-Ra-2*Rc))+((I2(p)^2)*m));
Ic(p)=((Vdc2*(x+1)*Rc)/q);
DI(p)=((1/2)*(abs(Ic(p)*Ni)))+(1/2)*(Ploss(p)*Np));
p=p+1;
end
l=1;
for l=1:1:160
Rd(l)=1*0.01;
if DI(l)<min
min=DI(l);
Rd2=1*0.01;
end
end
Rd1=(y*Rd2)+(y*Rb)+(2*y*Rc)-Ra-2*Rc;
else
Rd2=0;
Rd1=0;
end
if Rd2>d
Rd2=d;
Rd1=1.6;
end
end

```

7. Αλγόριθμος για τη γραφική αναπαράσταση της σχέσης μεταξύ R_{droop2} , $x_1 = \frac{V_{dc1}}{V_{dc2}}$ και $x_3 = \frac{V_{dc3}}{V_{dc2}}$ για τη διπολική συνδεσμολογία σύνδεσης τριών μετατροπέων μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού πόλου-αρνητικού πόλου.

```

Vdc2=-326;
r=1.1;
R=25;
a=342/Vdc2;
b=310/Vdc2;
c=(b-a)/30;
x1=a;
d=684/Vdc2;
e=620/Vdc2;
f=(e-d)/30;
x3=d;
X1=zeros(31,1);
X3=zeros(31,1);
Rd2=zeros(31,31);
v=1;
for x3=d:f:e
    X3(v)=x3;
    v=v+1;
end
k=1;
for x1=a:c:b
    X1(k)=x1;
    w=1;
    for x3=d:f:e
        if x1~-=-1 || x3~-=-2
            j=0.01;
            m=(r+j);
            I1a=((m*x1*Vdc2)+(Vdc2*R*(x1-1-x3)))/(m*(m+(3*R)));
            I2a=((m*Vdc2)+(Vdc2*R*(x3+1-x1)))/(m*(m+(3*R)));
            I3a=((m*x3*Vdc2)+(Vdc2*R*(x3+1-x1)))/(m*(m+(3*R)));
            Ic_max=(abs(Vdc2*R*(x3+1-x1)))/(m*(m+(3*R)));
            Ni=(1/(Ic_max));
            Ploss_max=m*((I1a^2)+(I2a^2)+(I3a^2));
            Np=(1/(Ploss_max));
            min=10;
            i=0.01;
            p=1;
            Ic=zeros(160,1);
            I1=zeros(160,1);
            I2=zeros(160,1);
            I3=zeros(160,1);
            Ploss=zeros(160,1);
            DI=zeros(160,1);
            Rd=zeros(160,1);
            for i=0.01:0.01:1.6
                m=(r+i);
                Ic(p)=abs((Vdc2*R*(x3+1-x1)))/(m*(m+(3*R)));
                I1(p)=((m*x1*Vdc2)+(Vdc2*R*(x1-1-x3)))/(m*(m+(3*R)));
                I2(p)=((m*Vdc2)+(Vdc2*R*(x3+1-x1)))/(m*(m+(3*R)));
                I3(p)=((m*x3*Vdc2)+(Vdc2*R*(x3+1-x1)))/(m*(m+(3*R)));
                Ploss(p)=m*((I1(p))^2+((I2(p))^2)+(I3(p))^2);
                DI(p)=(((1/2)*(Ic(p))*Ni)+((1/2)*(Ploss(p))*Np));
                p=p+1;
            end
            l=1;
            for l=1:1:160
                Rd(l)=1*0.01;
                if DI(l)<min
                    min=DI(l);
                    Rd2(w,k)=1*0.01;
                end
            end
            Rd2(w,k)=0;
        end
        w=w+1;
    end
    k=k+1;
end
mesh(X1,X3,Rd2)
surf(X1,X3,Rd2)
title('Rdroop(x1,x3)')
xlabel('x1')
ylabel('x3')
zlabel('Rdroop')

```

Η εκτίμηση της αντίστασης R_{droop} για οποιεσδήποτε τιμές του λόγου $x_1 = \frac{V_{dc1}}{V_{dc2}}$ και $x_3 = \frac{V_{dc3}}{V_{dc2}}$ μπορεί να πραγματοποιηθεί γράφοντας στο παράθυρο εντολών και στη συνέχεια εκτελώντας την εντολή “interp2”. Αν, για παράδειγμα, ζητείται η τιμή της αντίστασης R_{droop} για $V_{dc2} = -310V$, $x_1 = -1,0743$ και $x_3 = -2,1553$, θα πρέπει να εκτελεστεί η εντολή $R_{droop} = \text{interp2}(X1, X3, Rd2, -1.0743, -2.1553, 'spline')$.

8. Αλγόριθμος για το υπολογισμό των αντιστάσεων R_{droop} για τη διπολική συνδεσμολογία σύνδεσης τριών μετατροπέων μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού πόλου-αρνητικού πόλου.

```

Vdc1=313;
Vdc2=-326;
Vdc3=626;
r=1.1;
R=25;
x1=Vdc1/Vdc2;
x3=Vdc3/Vdc2;
if x1~-=-1 || x3~-=-2
    j=0.01;
    m=(r+j);
    I1a=((m*x1*Vdc2)+(Vdc2*R*(x1-1-x3)))/(m*(m+(3*R)));
    I2a=((m*Vdc2)+(Vdc2*R*(x3+1-x1)))/(m*(m+(3*R)));
    I3a=((m*x3*Vdc2)+(Vdc2*R*(x3+1-x1)))/(m*(m+(3*R)));
    Ic_max=(abs(Vdc2*R*(x3+1-x1)))/(m*(m+(3*R)));
    Ni=(1/(Ic_max));
    Ploss_max=m*((I1a^2)+(I2a^2)+(I3a^2));
    Np=(1/(Ploss_max));
    min=10;
    i=0.01;
    p=1;
    I1=zeros(160,1);
    I2=zeros(160,1);
    I3=zeros(160,1);
    Ploss=zeros(160,1);
    Ic=zeros(160,1);
    DI=zeros(160,1);
    Rd=zeros(160,1);
    for i=0.01:0.01:1.6
        m=(r+i);
        Ic(p)=abs((Vdc2*R*(x3+1-x1)))/(m*(m+(3*R)));
        I1(p)=((m*x1*Vdc2)+(Vdc2*R*(x1-1-x3)))/(m*(m+(3*R)));
        I2(p)=((m*Vdc2)+(Vdc2*R*(x3+1-x1)))/(m*(m+(3*R)));
        I3(p)=((m*x3*Vdc2)+(Vdc2*R*(x3+1-x1)))/(m*(m+(3*R)));
        Ploss(p)=m*((I1(p))^2)+((I2(p))^2)+((I3(p))^2);
        DI(p)=(((1/2)*(Ic(p))*Ni)+((1/2)*(Ploss(p))*Np));
        p=p+1;
    end
    l=1;
    for l=1:1:160
        Rd(l)=1*0.01;
        if DI(l)<min
            min=DI(l);
            Rd2=1*0.01;
        end
    end
    Rd1=Rd2;
    Rd3=Rd2;
else
    Rd1=0;
    Rd2=0;
    Rd3=0;
end
end

```