



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

**ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ**  
**ΜΙΚΡΟΤΟΥΡΜΠΙΝΕΣ ΚΑΙ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

**ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ Α. ΓΙΩΤΑ**

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2003





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

## ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΜΙΚΡΟΤΟΥΡΜΠΙΝΕΣ ΚΑΙ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Δ Ι Π Λ Ω Μ Α Τ Ι Κ Η Ε Ρ Γ Α Σ Ι Α

ΤΟΥ

**ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ Α. ΓΙΩΤΑ**

Επιβλέποντες: Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 4<sup>η</sup> Απριλίου 2003.

.....  
Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Κωνσταντίνος Βουρνάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Σταύρος Παπαθανασίου  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2003

.....

**ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Α. ΓΙΩΤΑΣ**

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

© 2003 – All rights reserved

## Περίληψη

Οι ραγδαία αναπτυσσόμενες εφαρμογές υδρογόνου μπορούν να χαρακτηριστούν γενικά ως οι τεχνολογίες του μέλλοντος. Η δυνατότητα για την παραγωγή υδρογόνου με πολλές μεθόδους (αναμόρφωση υδρογονανθράκων – κυρίως φυσικού αερίου – με ατμό, μερική οξείδωση – αεριοποίηση βαρέων υδρογονανθράκων (πετρέλαιο), ηλεκτρόλυση νερού), η εύκολη αποθήκευση του σε δεξαμενές αλλά και οι πλείστες εφαρμογές του, κάνουν το υδρογόνο όλο και πιο δημοφιλές ως καύσιμο.

Η ανάπτυξη εφαρμογών όλο και πιο αποδοτικών, που να μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια σε μικρή κλίμακα, κοντά στην κατανάλωση της, ουσιαστικά οδηγεί και σε μια νέα αντιμετώπιση της παραγωγής, της μεταφοράς και της διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Στην πραγματικότητα εισάγει νέα δεδομένα και νέες δυνατότητες, σε έναν χώρο που κερδίζεται όλο και περισσότερο από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ιδιαίτερα οι νέες, καινοτόμες εφαρμογές υβριδικών πηγών που συνδυάζουν ανεμογεννήτριες, μικροτουρμπίνες, κυψέλες καυσίμων, φωτοβολταϊκά κλπ. κερδίζουν όλο και περισσότερο έδαφος, αφού καταφέρνουν να συνδυάσουν τα πλεονεκτήματα κάθε μιας εκ των τεχνολογιών, αυξάνοντας συνολικά την αποδοτικότητα των συστημάτων.

Πλέον ο καταναλωτής έχει τη δυνατότητα να παράγει την ισχύ που χρειάζεται στον χώρο που την καταναλώνει, αλλά και ταυτόχρονα να χρησιμοποιεί τα μεγάλα ποσά θερμότητας που παράγονται παράλληλα με την ηλεκτρική ενέργεια, από τις εφαρμογές που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το υδρογόνο. Αυτό έχει ως συνέπεια την αλλαγή των συσχετισμών και των μεγεθών στην ισχύ, που καλείται να διαχειριστεί το υπάρχον δίκτυο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία καταπιάνεται με τη μελέτη του συνόλου της παραπάνω νέας κατάστασης, προσπαθώντας να προσεγγίσει το θέμα οικονομικά, περιβαλλοντικά, αλλά πάνω απ' όλα από την οπτική του μηχανικού.

Το 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο ασχολείται με την τεχνολογία των μικροτουρμπινών. Γίνεται μια γενική ανάλυση των εφαρμογών τους, της κατάστασης της αγοράς, του τρόπου λειτουργίας τους και τέλος μια προσπάθεια μοντελοποίησης μιας τυπικής μικροτουρμπίνας, με συμπεράσματα για τον τρόπο που αποκρίνεται στη ζήτηση φορτίων.

Το 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο ασχολείται με την τεχνολογία των κυψελών καυσίμων. Στο ίδιο μοτίβο με το κεφάλαιο των μικροτουρμπινών, γίνεται μια γενική ανάλυση της, πολύ νέας για τις κυψέλες καυσίμων, αγοράς, του τρόπου λειτουργίας τους, τους διαφορετικούς τύπους κυψελών καυσίμων, τις αντίστοιχες εφαρμογές τους και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα καθενός εκ των τύπων. Σε κάποια σημεία γίνονται και συγκριτικές αναφορές με τις μικροτουρμπίνες. Επίσης παρουσιάζονται κάποιες υπάρχουσες εφαρμογές τους. Στο τέλος επιχειρείται και πάλι η μοντελοποίηση μιας τυπικής κυψέλης καυσίμων, για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Το 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο ασχολείται με τη διανεμημένη παραγωγή. Διερευνά τους τρόπους με τους οποίους μπορεί να γίνει η μοντελοποίηση της, για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς της στη διαδικασία της παραγωγής, αλλά και για τον τρόπο με τον οποίο συμβάλλει στην αξιοπιστία των συστημάτων. Δημιουργούμε και πάλι ένα μοντέλο που αφορά μια γραμμή μεταφοράς και στηρίζεται στις μεθόδους που αναπτύχθηκαν, για την χρησιμοποίησή της με την παρουσία διανεμημένης παραγωγής. Στην πορεία του κεφαλαίου καταδεικνύονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της διανεμημένης παραγωγής.

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο δημιουργείται ένα μικρό δίκτυο διανεμημένης παραγωγής με την

παρουσία άπειρου ζυγού. Βάσει κάποιων σεναρίων προσπαθούμε να διερευνήσουμε τον τρόπο με τον οποίο οι μικροπηγές μπορούν να συμβάλλουν στο δίκτυο παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ενέργειας.

Το 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο είναι παράρτημα.

Σε όλες τις προσπάθειες μοντελοποίησης χρησιμοποιήθηκε το Simulink, Matlab™.

## Abstract

The rapidly developing applications of hydrogen can be characterized generally as the technologies of future. The production of hydrogen with lots of methods (reforming of hydrocarbons -mainly natural gas- with steam, partial oxidation - gasification of heavy hydrocarbons (oil), electrolyse of water), its easy storage in reservoirs and its multiple applications, make hydrogen more popular as a fuel.

The development of applications which are more efficient, that they can produce electrical energy in a small scale, near its consumption, actually leads to a new confrontation of production, transport and distribution of the electrical energy. Actually it imports new data and new possibilities, in a space that is progressively dominated from renewable energy resources. Particularly the new, innovative applications of hybrid power resources that combine wind generators, microturbines, fuel cells, photovoltaics etc. develop rapidly, since they combine the advantages of each one of these technologies, increasing globally the efficiency of systems.

The consumer has from now on the possibility of producing the power that he needs in the place that he consumes it, but can also use the big amount of heat that is produced at the same time with the electric energy, from the applications that use hydrogen as a fuel. This has as a consequence the change of correlations and sizes in the electrical power, that the existing transportation and distribution grid needs to manage.

This thesis develops the whole situation described above, and approaches the issue in an economical and environmental scope, but above all, with the optics of an engineer.

The 1<sup>st</sup> chapter deals with the technology of microturbines. There is a general analysis of their applications, the situation of the market, their operation and finally an effort of modelling a typical microturbine, with conclusions on the way that the microturbine responds to changes in the load demand.

The 2<sup>nd</sup> chapter deals with the fuel cells. As in the previous chapter, there is a general analysis of the very young for the fuel cells market, of their operation, of the different types of fuel cells, their corresponding applications and the advantages and disadvantages of each one of the types. In several points there are also comparative comments with the microturbines. Some existing applications are also demonstrated. Finally, once again, there is an attempt of modelling a typical fuel cell.

The 3<sup>rd</sup> chapter deals with the distributed generation. It examines the ways in which it can be modelled for investigating its contribution in the process of production, and in the reliability of systems. We create once again a model that concerns an electrical transport line, and which lies on the methods that were developed, for its utilisation in the presence of distributed production. During the chapter, the particular characteristics of the distributed generation are demonstrated.

In the 4<sup>th</sup> chapter a small electrical grid of distributed generation is created in the presence of a feeder. Lying on certain scenarios we try to investigate the way in which the micro-sources contribute in the electrical grid.

The 5<sup>th</sup> chapter is an annex.

The Simulink, Matlab™ was used in all the efforts of modelling.





# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## 1. Μικροτουρμπίνες (microturbines)

- 1.1 Εισαγωγή
- 1.2 Αγορά μικροτουρμπίνων
- 1.3 Εφαρμογές
  - 1.3.1 Θερμότητα και ισχύς: συνδυασμός (συμπαραγωγή)
  - 1.3.2 Διανεμημένη ηλεκτρική παραγωγή
  - 1.3.3 Εφαρμογές σε οχήματα
- 1.4 Προοπτικές
- 1.5 Λειτουργία
- 1.6 Μοντελοποίηση

## 2. Κυψέλες καυσίμων (fuel cells)

- 2.1 Εισαγωγή
- 2.2 Αγορά κυψελών καυσίμων
- 2.3 Αναλυτική περιγραφή κυψελών καυσίμων
  - 2.3.1 Αρχές λειτουργίας
  - 2.3.2 Τύποι κυψελών καυσίμων
  - 2.3.3 Σημαντικές διεργασίες
  - 2.3.4 Στοιβες κυψελών
  - 2.3.5 Περιγραφή εγκαταστάσεων κυψελών καυσίμων
  - 2.3.6 Χαρακτηριστικά
- 2.4 Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα
- 2.5 Εφαρμογές
  - 2.5.1 Σταθερή εγκατάσταση ηλεκτρικής ενέργειας
  - 2.5.2 Κινητήρια ισχύ οχημάτων
  - 2.5.3 Ισχύς στο διάστημα και σε άλλα κλειστά περιβάλλοντα
  - 2.5.4 Παράγωγες εφαρμογές
- 2.6 Κυψέλες καυσίμων στερεών οξειδίων (SOFC)
- 2.7 Μοντελοποίηση μίας στοιβάς κυψελών καυσίμων τύπου SOFC

## 3. Διανεμημένη παραγωγή (distributed generation)

- 3.1 Εισαγωγή
- 3.2 Ανάλυση της αξιοπιστίας της διανεμημένης παραγωγής
  - 3.2.1 Γενικά
  - 3.2.2 Διανεμημένη παραγωγή
  - 3.2.3 Αξιολόγηση της πρόβλεψης αξιοπιστίας
  - 3.2.4 Εφεδρεία εκτός λειτουργίας για ακτινωτά συστήματα
  - 3.2.5 Διαρκής λειτουργία με τη μέθοδο "net metering" για ακτινωτά συστήματα
  - 3.2.6 Δίκτυα
  - 3.2.7 Συμπεράσματα
- 3.3 Μοντελοποίηση

## 4. Ένταξη μονάδων διανεμημένης παραγωγής ενέργειας σε δίκτυο

- 4.1 Περιγραφή δικτύου & παραδοχές
- 4.2 Μοντελοποίηση
- 4.3 Προσομοίωση
  - 4.3.α Ωμικό φορτίο (παροχή ενεργού μόνο ισχύος από μικροπηγές)  $\Sigma.I.=1$   
(υποπεριπτώσεις i-v)
  - 4.3.β Επαγωγικό φορτίο (παροχή και άεργου ισχύος από μικροπηγές)  $\Sigma.I.=0.8$   
(υποπεριπτώσεις i-v)

4.4 Συμπεράσματα

## **5. Παράρτημα**

5.1 Ρουλεμάν airfoil

5.2 Lower Heating Value (LHV)

## **Βιβλιογραφία**

## 1. Μικροτουρμπίνες (microturbines)

Οι μικροτουρμπίνες είναι μικροί στρόβιλοι αερίου που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των μικροτουρμπίνων είναι:

- Σχεδόν αθόρυβη λειτουργία με λίγες δονήσεις
- Χαμηλά επίπεδα εκπομπής καυσαερίων
- Θερμικές αποδοτικότητες 5-30%
- Υψηλές ταχύτητες της τάξης των 60,000 rpm
- Μικρές ανάγκες συντήρησης και υψηλή αξιοπιστία

Οι μικροτουρμπίνες είναι μικροσκοπικές αεριοθούμενες μηχανές που συνδέονται με μικρές ηλεκτρικές γεννήτριες. Έχουν περίπλοκα ηλεκτρονικά συστήματα, τα οποία τους επιτρέπουν να παρέχουν ασφαλή και αποδοτική λειτουργία με διαρκή έλεγχο της κατάστασης τους.

Αντίθετα από τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας, οι μικροτουρμπίνες μπορούν να χρησιμοποιούνται από ιδιώτες, εγκαθίστανται εύκολα, έχουν χαμηλές εκπομπές ρύπων και βρίσκονται ακριβώς δίπλα στη ζήτηση της ενέργειας – οικία ή επιχείρηση. Σε περιπτώσεις όπου τα τιμολόγια του αερίου είναι χαμηλά – που είναι και το σύνηθες – ενώ η ηλεκτρική ενέργεια σχετικά ακριβή, καθίσταται πιο οικονομική η χρησιμοποίηση μονάδων μικροτουρμπίνων αντί της ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου.

Καταλαμβάνουν όγκο όχι μεγαλύτερο από έναν τηλεφωνικό θάλαμο και παράγουν ισχύ εύρους συνήθως από 25 ως 300kW. Έχοντας ως μέτρο σύγκρισης τους μεγάλους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που είναι ολόκληρα κτίρια με παραγόμενη ισχύ από 600MW ως 1000MW, το μικρό μέγεθος των μικροτουρμπίνων είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα, που επιτρέπει την τοποθέτησή τους ακριβώς δίπλα στο φορτίο. Αυτό αποβάλλει τις ενεργειακές απώλειες που εμφανίζονται συνήθως κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στα σημεία της ζήτησης. Αυτές οι απώλειες μεταφοράς είναι αρκετά σημαντικές και ανέρχονται συχνά στο 7% της παραγόμενης ισχύος.

### 1.1 Εισαγωγή

Οι μικροτουρμπίνες έχουν σχεδιαστεί με σκοπό να συνδυάσουν την αξιοπιστία των γεννητριών των εμπορικών αεροσκαφών, με το χαμηλό κόστος των αυτοκινήτων που χρησιμοποιούν τουρμπίνες (turbochargers). Αυτά τα συστήματα είναι στρόβιλοι υψηλών ταχυτήτων (50.000-90.000 στροφές ανά λεπτό) με ρουλεμάν τύπου airfoil (βλέπε Παράρτημα) τα οποία χρησιμοποιούν αντί για κάποιο λιπαντικό μέσο, τον αέρα. Είναι συστήματα μικρά σε μέγεθος και χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά ισχύς για τη διασύνδεσή τους με το φορτίο.



Κατά κύριο λόγο, η παρούσα τεχνολογία των μικροτουρμπίνων χρησιμοποιείται για την καταπολέμηση των υψηλών τιμών που συνδέονται με τη χρησιμοποίηση της

ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια των περιόδων αιχμής. Οι μικροτουρμπίνες είναι ιδιαίτερα αποδοτικές οικονομικά όταν η θερμότητα που αποβάλλεται μέσω των καυσαερίων χρησιμοποιείται για να θερμάνει ή να δροσίσει ένα κτίριο ή να προθερμάνει έναν λέβητα – είτε χρησιμοποιείται ως η μοναδική πηγή θερμότητας, είτε ως συμπληρωματική της κύριας πηγής. Ο βαθμός στον οποίο παρέχουν την απαιτούμενη για θέρμανση ενέργεια είναι, προφανώς, άμεσα συσχετιζόμενος με το μέγεθος του κτιρίου και τον αριθμό μονάδων μικροτουρμπίνων που χρησιμοποιείται για να ικανοποιεί τις ανάγκες σε ηλεκτρική ισχύ. Η δυνατότητα χρησιμοποίησης της θερμότητας που αποβάλλεται από το σύστημα, φτάνει την αποδοτικότητα των μικροτουρμπίνων σε τιμές μεγαλύτερες από 80%.

Οι μονάδες μικροτουρμπίνων προσφέρουν πολλά περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα, παραδείγματος χάριν, όπως και οι περισσότεροι στρόβιλοι που καίνε φυσικό αέριο, οι μικροτουρμπίνες έχουν ελάχιστες τοξικές εκπομπές (3-50 ppm NO<sub>x</sub>, CO – μέχρι 600 φορές λιγότερο συγκρινόμενες με τα εργοστάσια ηλεκτρικής ενέργειας που καίνε άνθρακα). Επιπλέον, η τοποθέτηση της πηγής ηλεκτρικής ενέργειας πιο κοντά στους τελικούς χρήστες αποβάλλει τις ηλεκτρικές απώλειες, που συνδέονται με τη μεταφορά της ισχύος, κατά μήκος του δικτύου μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Επιτρέπει επίσης στους τελικούς χρήστες να ελέγξουν τις ανάγκες τους για ηλεκτρική ενέργεια, μειώνοντας σημαντικά την αποκλειστική εξάρτησή τους από μία πηγή ενέργειας και ειδικότερα το δίκτυο. Συνεπώς, οι τελικοί χρήστες μπορούν να χρησιμοποιήσουν είτε το δίκτυο είτε τη μονάδα μικροτουρμπίνων ως αρχική πηγή τους και την άλλη ως εφεδρεία ή ως συμπληρωματική πηγή, γεγονός που επιτρέπει πολύ μεγαλύτερη αξιοπιστία στην παροχή ενέργειας, όποτε αυτή ζητείται. Μπορεί επίσης να μειώσει στο ελάχιστο - ουσιαστικά να καταργήσει - τις δαπάνες για την οικοδόμηση μεγάλων κεντρικών παραγωγικών σταθμών καθώς επίσης και για την ενίσχυση του δικτύου με περισσότερες γραμμές μεταφοράς για την κάλυψη του διαρκώς αυξανόμενου φορτίου.

Οι μικροτουρμπίνες προσφέρουν τέλος κάποια επιπλέον πλεονεκτήματα έναντι άλλων τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για μικρής κλίμακας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτά τα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν: μικρό αριθμό κινούμενων μερών, μικρό μέγεθος, μικρό βάρος, μεγαλύτερη αποδοτικότητα, χαμηλότερα κόστη ηλεκτρικής ενέργειας και δυνατότητες χρησιμοποίησης των καυσίμων που προέρχονται από απόβλητα (waste fuels). Παρέχουν επίσης τη δυνατότητα να εγκατασταθούν σε περιορισμένο χώρο.

Αυτήν τη στιγμή το κύριο μειονέκτημα των μικροτουρμπίνων είναι το όριο στον αριθμό των φορών που μπορούν να εκκινηθούν και να τεθούν εκτός λειτουργίας. Κατά συνέπεια, είναι κοινή η πρακτική να κρατούνται διαρκώς σε λειτουργία μόλις εκκινηθούν. Εντούτοις, αυτό το πρόβλημα εξετάζεται και προβλέπεται να αντιμετωπιστεί άμεσα στο μέλλον. (βλέπε Παράρτημα)

## **1.2 Αγορά μικροτουρμπίνων**

Η άρση των περιορισμών στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ιδιώτες διευκολύνει όλο και περισσότερους να εισέλθουν στην αγορά ενέργειας είτε δημιουργώντας μικρές μονάδες παραγωγής ισχύος μερικών MW είτε μερικών εκατοντάδων kW απλά και μόνο για προσωπική (ιδιωτική) χρήση στην επιχείρησή ή στην οικία τους. Οι περισσότεροι ανεξάρτητοι παραγωγοί ισχύος καθυστερούν την οικοδόμηση νέων εγκαταστάσεων λόγω των μεγάλων επικείμενων επενδύσεων και της αβεβαιότητας για το πώς θα εξελιχθεί τελικά το νέο περιβάλλον της αγοράς ενέργειας. Αυτό έχει δημιουργήσει μια έλλειψη παραγωγής στην ελεύθερη αγορά.

Έτσι ανοίγεται μια οδός για τη χρήση μικρότερων και φτηνότερων μορφών παραγωγής ενέργειας, που λογικά θα επιτρέψει στους μικρότερους πελάτες περισσότερο έλεγχο στον τρόπο και τους όρους με τους οποίους θα καλύπτονται οι ενεργειακές τους ανάγκες.

Πολλές χώρες ερευνούν τις χρήσεις των μικροτουρμπίνων. Στην πραγματικότητα, ο τρόπος που διαχειρίζεται κάθε χώρα τις διάφορες διαθέσιμες μορφές ενέργειας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο πόσο γρήγορα ή πόσο εύκολα θα αφομοιώσουν τέτοιου είδους νέες τεχνολογίες. Το ηλεκτρικό δίκτυο των Ηνωμένων Πολιτειών, για παράδειγμα, έχει χτιστεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να παρέχει ενέργεια από τις κεντρικές παραγωγικές εγκαταστάσεις σε όλη την έκταση της χώρας. Άλλες λιγότερο αναπτυγμένες χώρες που δεν έχουν αυτήν την υποδομή, αποτελούν πιο πρόσφορο έδαφος για τέτοιου είδους τεχνολογία. Για παράδειγμα, πολλές χώρες στην Αφρική έχουν αρκετά έτοιμα συστήματα διανομής φυσικού αερίου, αλλά πολύ λίγες εγκαταστάσεις – περιορισμένης έκτασης δίκτυο – για τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτές τις χώρες η τεχνολογία των μικροτουρμπίνων θα είχε μια τέλεια εφαρμογή.



### 1.3 Εφαρμογές

Στη σημερινή ενεργειακή οικονομία, η περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια παράγεται χρησιμοποιώντας γεννήτριες που καίνε φυσικά καύσιμα (fossil fuels). Για να μεταφερθεί η απαιτούμενη ισχύς σε ένα σπίτι ή ένα εργοστάσιο απαιτείται η διασύνδεση αυτών των γεννητριών με την εκάστοτε περιοχή με ένα βαρύ χάλκινο καλώδιο. Όταν όμως η περιοχή που απαιτεί την ενέργεια βρίσκεται σε μια απομακρυσμένη θέση βουνών ή νήσων, ή είναι μια παράκτια εγκατάσταση γεώτρησης πετρελαίου, όπου η ηλεκτρική ενέργεια είναι λιγοστή και η δυνατότητα διασύνδεσης με σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μη υπαρκτή, τότε πρέπει να αναζητηθεί μια άλλη λύση για την τροφοδότηση του φορτίου με ηλεκτρική ενέργεια.

Μια όλο και περισσότερο δημοφιλής δυνατότητα είναι να συσταθούν τοπικές εγκαταστάσεις παραγωγής ισχύος, χρησιμοποιώντας μία μικροτουρμπίνα, που μπορεί μερικές φορές να είναι ένα σύστημα φορητό, και μπορεί να παρέχει αρκετή ηλεκτρική ενέργεια ικανή να τροφοδοτήσει από 10 έως 5.000 σπίτια, οπουδήποτε κι αν βρίσκονται αυτά.

Οι εφαρμογές για τις μικροτουρμπίνες ποικίλλουν. Τα μεγάλα μοντέλα μπορούν να παράγουν ισχύ αρκετών MW - αρκετά να τροφοδοτήσουν μερικές χιλιάδες σπίτια ή μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις. (Για να γίνει πιο κατανοητό το μέγεθος της ισχύος αυτής, να αναφέρουμε ενδεικτικά ότι 1 MW μπορεί να καλύψει τις ανάγκες 1.000 περίπου σπιτιών.) Οι μικρότερες μικροτουρμπίνες δεν είναι βέβαια τόσο αποδοτικές όσο οι συμβατικές πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, όπως η υδροηλεκτρική ή οι μεγάλες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας. Σε ένα συμβατικό δίκτυο διανομής, οι μικροτουρμπίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εφεδρικές παροχές ηλεκτρικού ρεύματος για τα νοσοκομεία, τους αερολιμένες, τις στρατιωτικές βάσεις, εμπορικά κέντρα ή άλλες εγκαταστάσεις. Επειδή οι μηχανισμοί είναι σχετικά απλοί, οι μικροτουρμπίνες που παράγουν ισχύ από 100 kW ως 1 MW μπορούν να αναρτηθούν σε ημιρυμουλκούμενα οχήματα για τη μεταφορά σε κάποια περιοχή εργασίας ή για άμεση παροχή ενέργειας σε περίπτωση φυσικής

καταστροφής. Οι μικροτουρμπίνες έχουν χρησιμοποιηθεί από καιρό για την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος σε ηλεκτρικές ατμομηχανές μεγάλων αποστάσεων, αλλά είναι εξίσου κατάλληλες για τη χρήση σε θωρακισμένα μεγάλα οχήματα ή σε λεωφορεία. Οι ακόμα μικρότερες μικροτουρμπίνες χρησιμοποιούνται στις υβριδικές μηχανές φυσικού αερίου, που συνδυάζουν το αέριο και την ηλεκτρική ενέργεια. Το σημαντικό πλεονέκτημα – εφόσον υπάρχει εκεί μια σταθερή πηγή καυσίμων – είναι ότι εκεί αποκλείεται οποιαδήποτε περίπτωση ηλεκτρικής συσκότισης.

Οι στρόβιλοι αερίου προτιμούνται όλο και περισσότερο από τις εμβολοφόρες μηχανές σε πολλές εφαρμογές. Αυτές περιλαμβάνουν:

### **1.3.1 Θερμότητα και ισχύς: συνδυασμός (συμπαγωγή)**

Η θερμότητα που αποβάλλεται από τη μικροτουρμπίνα μπορεί να μεταφερθεί μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας για την παραγωγή ατμού ή την παροχή καυτού νερού στην τοπική περιοχή. Αυτό το νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε θερμοκήπια ή να διοχετευθεί για να παρέχει κεντρική θέρμανση σε κτίρια κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Τρόποι να χρησιμοποιηθεί γενικά αυτή η θερμότητα μπορούν να βρεθούν ευκολότερα, επειδή η θερμότητα που παράγεται από κάθε μονάδα μικροτουρμπίνας είναι πολύ μικρότερη από αυτή σε έναν μεγάλο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

### **1.3.2 Διανεμημένη ηλεκτρική παραγωγή**

Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται τοπικά για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις στην εκάστοτε περιοχή, π.χ. την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε μια μικρή πόλη. Αυτό μπορεί να μειώσει την ισχύ που ζητείται από το δίκτυο διανομής ισχύος. Τα νοσοκομεία, τα ξενοδοχεία, τα εργοστάσια και τα θέρετρα διακοπών μπορούν να εγκαταστήσουν τα διανεμημένα συστήματα ισχύος στην περιοχή για να συμπληρώσουν την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο. Προφανώς η ύπαρξη του δικτύου δεν είναι προαπαιτούμενο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από διανεμημένα συστήματα ισχύος, αφού αυτά μπορούν να λειτουργήσουν κι ως η μοναδική πηγή ισχύος για μια περιοχή που δεν έχει καν πρόσβαση στο δίκτυο. Η διανεμημένη παραγωγή παρέχει ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών στους καταναλωτές, συμπεριλαμβανομένης της εφεδρικής παραγωγής, της ικανότητας περιορισμού των υπερτάσεων, της παραγωγής ενός φορτίου βάσης και της συμπαγωγής ισχύος από πολλές πηγές.

Οι λεπτομερείς εφαρμογές στο διανεμημένο σύστημα ισχύος εμφανίζονται παρακάτω:

#### *Παράκτιες εγκαταστάσεις γεωτρήσεων*

Η υπάρχουσα τεχνολογία που χρησιμοποιείται στις παράκτιες εγκαταστάσεις γεωτρήσεων είναι αυτή των μηχανών diesel, οι οποίες ως είναι ογκώδεις και βαριές και μπορούν να μεταφερθούν μόνο με σκάφος. Υπάρχει επίσης το κόστος των μεγάλων ποσών καυσίμων diesel που απαιτούνται από τις μηχανές. Η μικροτουρμπίνα, όμως, είναι ελαφριά και μπορεί να μεταφερθεί με τη χρήση ενός ελικοπτερου. Επιπλέον μπορεί να χρησιμοποιήσει τα απόβλητα αέρια (waste fuels) που διαφεύγουν από την εξαγωγή πετρελαίου, και τα οποία δεν αξιοποιούνται διαφορετικά.

#### *Νοσοκομεία*

Η θερμότητα που αποβάλλεται από τη γεννήτρια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία ατμού για την αποστείρωση του ιατρικού εξοπλισμού καθώς επίσης και για τον καθαρισμό των κλινοσκεπασμάτων. Μπορεί επίσης να ενεργήσει ως εφεδρική παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, για την απρόσκοπτη λειτουργία

ηλεκτρονικού ή ηλεκτρολογικού εξοπλισμού που είναι απαραίτητος για τη ζωή και την υγεία των ασθενών.

#### *Εφεδρικές γεννήτριες*

Οι μικροτουρμπίνες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στις απομακρυσμένες περιοχές όπου δεν υπάρχει καμία πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια που παρέχει το δίκτυο. Θα μπορούσε να παρέχει την ηλεκτρική ενέργεια για τους ερευνητικούς σταθμούς στη μέση μιας ζούγκλας ή μιας ερήμου, όπου δεν υπάρχει πρόσβαση σε πετρέλαιο diesel αλλά βρίσκεται κοντά σε πηγές φυσικού αερίου.

### **1.3.3 Εφαρμογές σε οχήματα**

#### *Υβριδικό όχημα (μικροτουρμπίνα που συνδέεται με εναλλάκτη υψηλής ταχύτητας)*

Σε εφαρμογές υβριδικών οχημάτων η ισχύς που παράγεται από την μικροτουρμπίνα μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια από έναν εναλλάκτη υψηλής ταχύτητας. Η ηλεκτρική ισχύς χρησιμοποιείται για να οδηγήσει τις ηλεκτρικές μηχανές που συνδέονται με τους τροχούς. Οποιαδήποτε περισσευούμενη ενέργεια κατευθύνεται σε ένα σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης (μπαταρίες). Ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να καταμεριστούν οι ρόλοι σε ένα υβριδικό όχημα κυμαίνεται από τη θεώρηση των μπαταριών ως το κυρίαρχο σύστημα για την τροφοδότηση του υβριδικού οχήματος με ενέργεια, όπου η μικροτουρμπίνα μπορεί να αντιμετωπιστεί ως "φορτιστής μπαταριών", ως τη θεώρηση ότι οι μπαταρίες χρησιμοποιούνται ως εφεδρεία της μικροτουρμπίνας για να ικανοποιήσει τις μέγιστες ανάγκες ισχύος, π.χ. κατά τη διάρκεια της επιτάχυνσης.

#### *Υβριδικό όχημα (μικροτουρμπίνα και fuel cells)*

Ένας υβριδικός συνδυασμός μικροτουρμπίνας με κυψέλες υδρογόνου μπορεί να αυξήσει τη συνολική αποδοτικότητα του συστήματος. Τα υβριδικά συστήματα εκμεταλλεύονται την αύξηση στην αποδοτικότητα των κυψελών υδρογόνου με μια αύξηση στη λειτουργούσα πίεση. Ο θάλαμος συμπίεσης της μικροτουρμπίνας χρησιμοποιείται για να παρέχει αυτήν την πίεση. Το fuel cell παράγει θερμότητα παράλληλα με ισχύ, και αυτή η θερμότητα χρησιμοποιείται για να οδηγήσει τους στρόβιλους της μικροτουρμπίνας. Εάν η κυψέλη καυσίμων παράγει αρκετή θερμότητα, η μικροτουρμπίνα μπορεί να παράγει επιπρόσθετη ισχύ. Για τον υβριδικό συνδυασμό, η αποδοτικότητα αναμένεται να είναι τουλάχιστον 60% και οι εκπομπές λιγότερες από 1,0 PPM NOx και αμελητέο SOx ή άλλους ρύπους.

### **1.4 Προοπτικές**

Οι τάσεις στην τεχνολογία κατευθύνουν γενικότερα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μονάδες ισχύος κάτω από το επίπεδο των 500kW. Ένα εξαιρετικό παράδειγμα είναι οι μικροτουρμπίνες που αποδίδουν ισχύ από 25 ως 100kW και οι οποίες μπορούν να παραχθούν μαζί με χαμηλό κόστος. Παραδείγματα τέτοιων συστημάτων είναι: η στροβιλογεννήτρια AlliedSignal's 75kW, η γεννήτρια Allison Co's 50kW και το σύστημα Capstone 30kW. Συνεπώς και μόνο η ύπαρξη αυτής της τάσης στην παραγωγή ενέργειας θέτει σε πλεονεκτική θέση την τεχνολογία των μικροτουρμπίνων.



Εξάλλου, η εξέλιξη των μικροτουρμπίνων μπορεί σύντομα να φτάσει σε τέτοιο επίπεδο ώστε να μπορούν να αποτελέσουν μια σημαντική νέα δυνατότητα – εναλλακτική λύση – για εφεδρεία στις περιπτώσεις που το δίκτυο βρίσκεται εκτός λειτουργίας ή για ικανοποίηση της ανάγκης για περισσότερη ενέργεια στις ώρες αιχμής.

Προηγμένα υλικά, όπως κεραμικά και θερμομονωτικά επιστρώματα, είναι κάποια από τα στοιχεία που επιτρέπουν – και υπόσχονται – την περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας των μικροτουρμπίνων, αυξάνοντας σημαντικά τη θερμοκρασία στην οποία δύνανται να λειτουργήσουν. (βλέπε Παράρτημα)

Λόγω του συμπαγούς μεγέθους, των σχετικά χαμηλών απαιτούμενων δαπανών σε κεφάλαια, του αναμενόμενου χαμηλού κόστους συντήρησης και λειτουργίας και του αυτόματου ηλεκτρονικού ελέγχου, οι μικροτουρμπίνες αναμένεται να αναλάβουν την κάλυψη ενός σημαντικού μεριδίου της διανεμημένης αγοράς παραγωγής ενέργειας.

Η τεχνολογία μικροτουρμπίνων άλλωστε είναι τόσο νέα που μόνο ένας κατασκευαστής, η εταιρία στροβίλων Capstone, πωλεί αυτήν την περίοδο μικροτουρμπίνες. Αρκετοί άλλοι κατασκευαστές είναι την παρούσα στιγμή σε πειραματικό στάδιο. Μέχρι το 2003, περισσότερες – και πιο οικονομικές – μονάδες μικροτουρμπίνων θα πρέπει να είναι διαθέσιμες. Οι μονάδες αναμένεται επίσης να αυξήσουν την ισχύ που θα μπορούν να αποδώσουν – μέχρι 200 kW ή 300 kW. Η τεχνολογία έχει δώσει στους κατασκευαστές τη δυνατότητα να δημιουργήσει τους πιο αποδοτικούς και πιο οικονομικούς τρόπους για την παραγωγή ισχύος με τη χρήση όλο και μικρότερων σε όγκο μηχανών. Στο παρελθόν, οι μικρές γεννήτριες δεν θα μπορούσαν να αντεπεξέλθουν στην αποδοτικότητα και το χαμηλό κόστος που εξασφάλιζαν οι μεγάλες, κεντρικές, παραγωγικές μονάδες.

## **1.5 Λειτουργία**

Σε μια τυπική εγκατάσταση παραγωγής ισχύος, ο άξονας της γεννήτριας περιστρέφεται μέσω ενός μαγνητικού πεδίου, το οποίο προτρέπει τα ηλεκτρόνια στα καλώδια χαλκού να κινηθούν. Έτσι παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Το ποσό αυτό της ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από τους μαγνήτες, την ποσότητα και τη διάταξη του τυλίγματος χαλκού, και την ταχύτητα του περιστρεφόμενου άξονα. Το τέχνασμα για την παραγωγή φτηνής ηλεκτρικής ενέργειας είναι στην εύρεση ενός αποδοτικού τρόπου για να περιστραφεί ο άξονας της γεννήτριας. Οι ανεμόμυλοι – και κατ' επέκταση και οι ανεμογεννήτριες – χρησιμοποιούν την ισχύ των ανέμων για να γυρίσουν τον άξονα, τα υδροηλεκτρικά φράγματα χρησιμοποιούν την πτώση του νερού. Οι μεγάλοι στρόβιλοι ατμού, η συνήθης τεχνολογία των μεγάλων εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας, καίει φυσικά καύσιμα όπως άνθρακα, φυσικό αέριο, ή πετρέλαιο, και χρησιμοποιούν τη θερμότητα για να παράγουν υδρατμούς. Η ισχύς του δραπετεύοντα ατμού γυρίζει τον άξονα. Οι πυρηνικές εγκαταστάσεις λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο, αλλά χρησιμοποιούν τη θερμότητα που παράγεται από την πυρηνική διάσπαση.

Οι μικροτουρμπίνες καίει επίσης φυσικά καύσιμα αλλά αντίθετα από την παραπάνω διαδικασία, χρησιμοποιούν την πίεση που παράγεται από τα καυσαέρια για να στρέψουν τον άξονα. Επειδή εκεί δεν υφίσταται καμία ανάγκη για παροχή νερού ή κάποιο σύστημα για να απελευθερωθεί με πίεση ατμός σε υψηλή θερμοκρασία, οι μικροτουρμπίνες είναι μικρές και αυτόνομες.

Η πηγή της ενέργειας μπορεί να είναι, όπως προαναφέραμε, είτε ένα αέριο (π.χ. προπάνιο, φυσικό αέριο ή αέριο αποβλήτων) είτε καύσιμα diesel. Κατά την καύση



αυτή θερμαίνεται ο εισερχόμενος αέρας με αποτέλεσμα να διαστέλλεται. Ο αέρας αυτός διαρρέει έναν στρόβιλο με πτερύγια, αναγκάζοντάς τα να περιστραφούν καθώς ο αέρας διαφεύγει προς την εξάτμιση. Η ροπή που δημιουργεί αυτή η κίνηση του αέρα περιστρέφει τον άξονα μιας γεννήτριας, η οποία και μετατρέπει τη μηχανική ροπή σε ηλεκτρική ισχύ. Αυτή η ηλεκτρική έξοδος μετατρέπεται με τη βοήθεια ηλεκτρονικών ισχύος σε τάση και συχνότητα. Συχνά η θερμότητα των καυσαερίων στην εξάτμιση, περίπου 600 βαθμοί Fahrenheit, εκμεταλλεύεται, χρησιμοποιούμενη για τη θέρμανση νερού ή αέρα για HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning, δηλ. θέρμανση, εξαερισμός και κλιματισμός), για το θερμοσίφωνα, είτε για την προθέρμανση διαφόρων εφαρμογών λεβητών. Επειδή σε αυτήν την περίπτωση διάφορες μορφές ενέργειας, δηλ. ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα (που μεταφέρεται από τον καυτό αέρα και τον ατμό) παράγονται από την ίδια πηγή και χρησιμοποιούνται αμφότερες για να παρέχουν την ενέργεια σε κάποιες εφαρμογές, το παρόν σύστημα αναφέρεται ως σύστημα συμπαραγωγής.

Μερικές μικροτουρμπίνες περιλαμβάνουν ακόμη τη δυνατότητα να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια από τη θερμότητα των αερίων εξάτμισης. Η θερμότητα χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδρατμών που διαφεύγουν μέσω ενός δεύτερου συνόλου λεπίδων στροβίλου, που περιστρέφουν μια δεύτερη ηλεκτρική γεννήτρια. Αυτά τα συστήματα είναι πολύ μεγαλύτερα και ακριβότερα, αλλά λειτουργούν αποτελεσματικότερα.

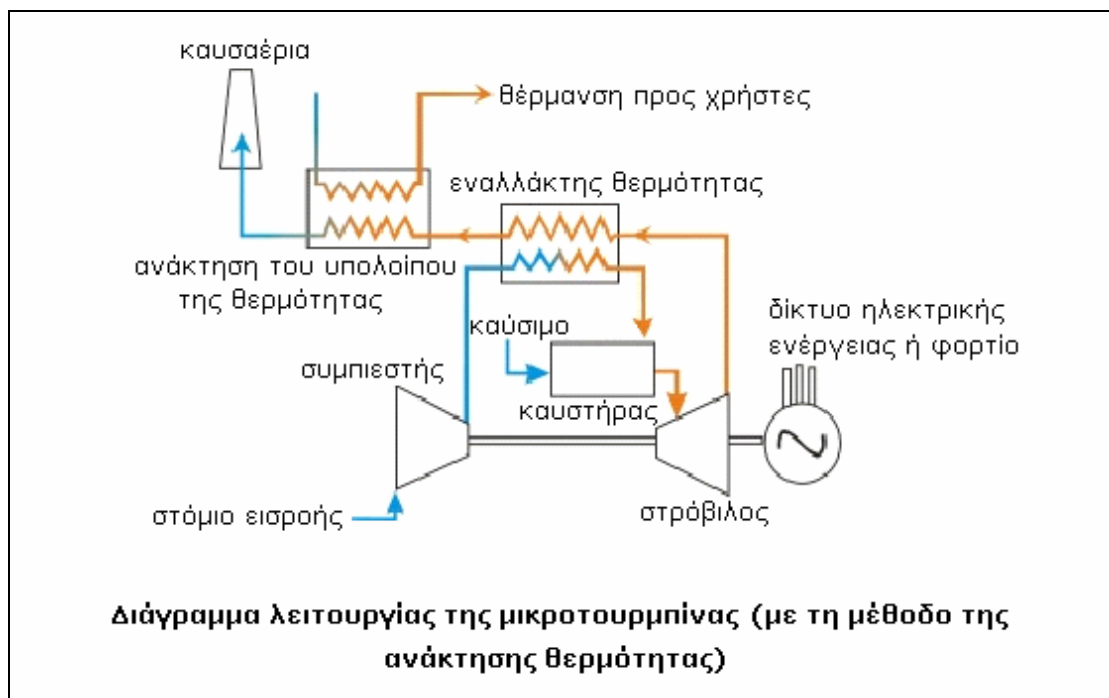
Οι μικροτουρμπίνες αποτελούνται από τέσσερα βασικά συστατικά. Εξωτερικός αέρας τροφοδοτεί έναν συμπιεστή, ο οποίος αυξάνει την πυκνότητα και την πίεση του αέρα. Ο συμπιεσμένος αέρας και το καύσιμο προωθούνται στον θάλαμο καύσης, απ' όπου και εκπέμπεται ένα τεράστιο ποσό θερμότητας και πίεσης που προέρχεται από τα καυσαέρια. Τα καυσαέρια που έχουν δημιουργηθεί ωθούνται σε μια σειρά λεπίδων ενός στροβίλου που συνδέεται με έναν μακρύ άξονα, με αποτέλεσμα ο τελευταίος να περιστρέφεται με εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες. Ο άξονας αυτός, στη συνέχεια, περιστρέφει ισχυρούς μαγνήτες στο εσωτερικό σταθερών πηνίων χαλκού, απ' όπου και δημιουργείται το ηλεκτρικό ρεύμα. Ανάλογα με το πώς τα πηνία του καλωδίου είναι τυλιγμένα και τοποθετημένα, η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να παράγεται με τη μορφή εναλλασσόμενου ή συνεχούς ρεύματος, και σε διάφορες τάσεις ή εντάσεις ρεύματος. Πολλές από τις μικρότερες μικροτουρμπίνες τροφοδοτούνται με πετρέλαιο diesel ή βενζίνη, αντί για φυσικό αέριο. Σε αυτές, δεν υπάρχει ανάγκη για συμπιεστή, μια και τα καύσιμα εγχέονται απευθείας στον θάλαμο συμπίεσης.

Οι στρόβιλοι ταξινομούνται από τη φυσική ρύθμιση των συστατικών μερών: ένας ενιαίος άξονας ή δύο άξονες, απλός κύκλος ή ανάκτηση θερμότητας, εσωτερική ψύξη και επαναθέρμανση. Οι μηχανές περιστρέφονται γενικά με πάνω από 40.000 ΣΑΛ. Η χρησιμοποίηση λαδιού ή αέρα ως λιπαντικό μέσο εξαρτάται από τη χρήση.

Η χρησιμοποίηση ενός ενιαίου άξονα για την οδήγηση του συμπιεστή, του στροβίλου και της γεννήτριας είναι ο πιο διαδεδομένος σχεδιασμός μικροτουρμπίνας, δεδομένου ότι είναι απλούστερος και λιγότερο ακριβός στην κατασκευή. Αυτός είναι και ένας τρόπος με τον οποίο οι μικροτουρμπίνες διακρίνονται από τους μεγαλύτερους στρόβιλους. Στις μεγαλύτερες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, οι στρόβιλοι και οι γεννήτριες είναι σε χωριστούς άξονες και συνδέονται με κιβώτιο ταχυτήτων που επιβραδύνει την ταχύτερη περιστροφή των στρόβιλων αερίου, αυξάνοντας ταυτόχρονα τη ροπή του άξονα για να γυρίσουν τις σαφώς πολύ μεγαλύτερες ηλεκτρικές γεννήτριες. Γενικά ο χωριστός άξονας χρησιμοποιείται σε εκείνες τις εφαρμογές μηχανών κίνησης, οι οποίες δε χρησιμοποιούν αντιστροφείς (inverters) για να αλλάξουν τη συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος που δημιουργείται.

Οι μικροτουρμπίνες μπορούν να λειτουργήσουν με τη μέθοδο του απλού κύκλου ή της ανάκτησης θερμότητας. Σε έναν στρόβιλο απλού κύκλου, χωρίς ανάκτηση, ο συμπιεσμένος αέρας αναμιγνύεται με καύσιμο και καίγεται κάτω από σταθερές συνθήκες πίεσης. Το καυτό αέριο που προκύπτει, επιτρέπεται να διασταλθεί δια μέσω ενός στροβίλου και να εκτελέσει έτσι τη ζητούμενη εργασία. Οι μικροτουρμπίνες απλού κύκλου έχουν χαμηλότερο κόστος, υψηλότερη αξιοπιστία και περισσότερη θερμότητα διαθέσιμη για τις εφαρμογές συμπαραγωγής, από ότι οι μονάδες ανάκτησης θερμότητας. Οι μονάδες ανάκτησης θερμότητας χρησιμοποιούν έναν εναλλάκτη θερμότητας από φύλλα μετάλλου, που ανακτεί τμήμα της θερμότητας από το ρεύμα αέρα που κατευθύνεται προς την εξάτμιση και το μεταβιβάζει στο εισερχόμενο κρύο ρεύμα αέρα. Ο προθερμασμένος αέρας χρησιμοποιείται έπειτα στη διαδικασία καύσης. Η προθέρμανση του αέρα, μειώνει την ποσότητα των απαιτούμενων καυσίμων για την αύξηση της θερμοκρασίας του στο απαραίτητο επίπεδο στην είσοδο του στροβίλου. Ο λόγος της ηλεκτρικής προς τη θερμική ενέργεια στις μονάδες ανάκτησης θερμότητας έχει υψηλότερη τιμή από τις μονάδες χωρίς ανάκτηση και, επιπλέον, οι πρώτες μπορούν να κάνουν εξοικονόμηση καυσίμων σε ποσοστό 30 με 40%, από τη διαδικασία της προθέρμανσης.

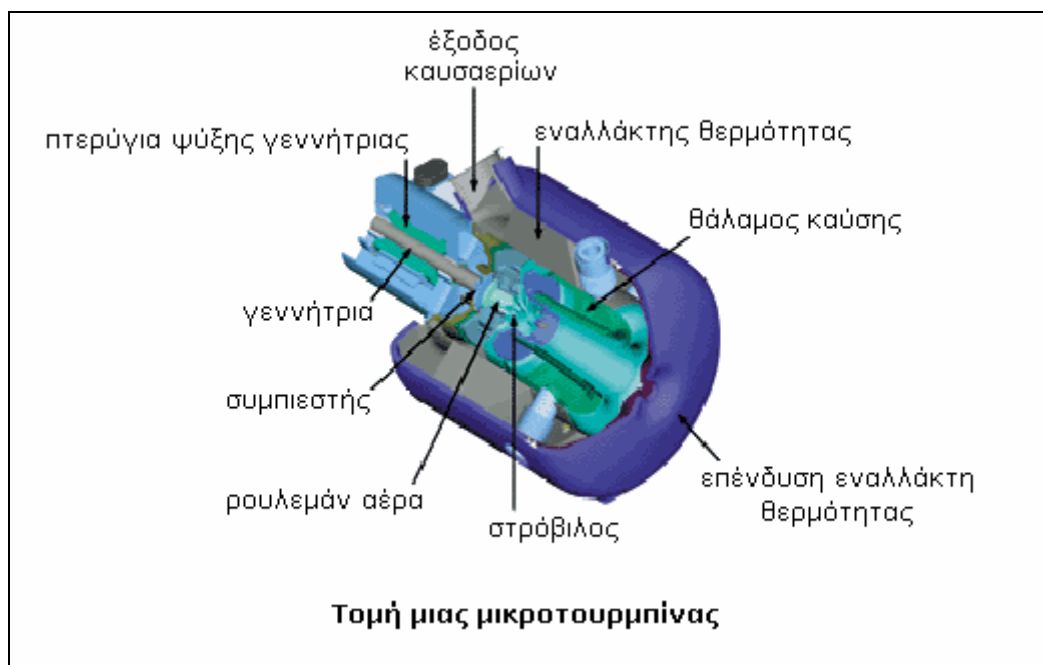
Το παρακάτω διάγραμμα επεξηγεί τη λειτουργία μιας μικροτουρμπίνας που λειτουργεί με τη μέθοδο της ανάκτησης θερμότητας.



Ο αέρας που εισάγεται στο στόμιο εισροής (air inlet) περνά από τον συμπιεστή (compressor) και στη συνέχεια αναμιγνύεται με καύσιμο και καίγεται στον καυστήρα (combustor) κάτω από σταθερές συνθήκες πίεσης. Το καυτό αέριο που προκύπτει διαστέλλεται δια μέσω ενός στροβίλου και θέτει σε κίνηση τα πτερύγιά του. Ο εναλλάκτης θερμότητας (recuperator) χρησιμοποιείται για να ανακτήσει τμήμα της θερμότητας από το ρεύμα καυτού αέρα που κινείται προς την εξάτμιση και να το μεταφέρει στο εισερχόμενο κρύο ρεύμα αέρα. Ο προθερμασμένος αέρας χρησιμοποιείται έπειτα στη διαδικασία της καύσης. Με την προθέρμανση του αέρα, απαιτούνται λιγότερα καύσιμα για την αύξηση της θερμοκρασίας του στο απαραίτητο επίπεδο στο στόμιο εισόδου του στροβίλου. Το ρεύμα καυτού αέρα που κινείται προς την εξάτμιση στη συνέχεια οδηγείται δια μέσω ενός ακόμη εναλλάκτη θερμότητας (potential waste-heat recovery) που συλλαμβάνει εκ νέου ένα ακόμη

τμήμα της θερμότητας, με σκοπό τη χρήση της σε διάφορες βιομηχανικές διαδικασίες, για τη θέρμανση χώρων και νερού.

Παρακάτω παρουσιάζεται η τομή μιας μικροτουρμπίνας, όπου φαίνεται η φυσική διάταξη των μερών που αναφέραμε.



Οι μικροτουρμπίνες απαιτούν ηλεκτρονικά ισχύος για τη διασύνδεση τους με το δίκτυο ισχύος και τα φορτία του. Σε όλες τις περιπτώσεις υπάρχει μια πηγή συνεχούς τάσης (DC) που πρέπει να μετατραπεί σε εναλλασσόμενη πηγή τάσης ή ρεύματος στην απαιτούμενη συχνότητα, πλάτος και φάση. Στις περισσότερες περιπτώσεις η μετατροπή πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας έναν μετατροπέα τάσης με δυνατότητα διαμόρφωσης πλάτους και φάσης με στόχο την παροχή γρήγορου ελέγχου του πλάτους της τάσης.

Η διασύνδεση συστημάτων δια μέσω ηλεκτρονικών ισχύος εισάγει νέα ζητήματα ελέγχου όπως και νέες δυνατότητες. Ένα σύστημα από συστάδες μικρογεννητριών και μέσων αποθήκευσης ενέργειας θα μπορούσε να σχεδιαστεί για να λειτουργήσει και ως αυτόνομο σύστημα αλλά και διασυνδεδεμένο στο δίκτυο. Μια μεγάλη σειρά από προβλήματα σχετίζονται με το γεγονός ότι οι μικροτουρμπίνες – και τα fuel cells, όπως θα διαπιστώσουμε στη συνέχεια – έχουν αργές αποκρίσεις και στερούνται αδράνειας. Πρέπει να αναφερθεί ότι τα υπάρχοντα συστήματα ισχύος έχουν δυνατότητες αποθήκευσης, που έγκεινται στην αδράνεια που παρουσιάζουν οι γεννήτριες. Όταν ένα νέο φορτίο προκύπτει, η αρχική ενεργειακή ισορροπία διατηρείται από την αδράνεια του συστήματος. Αυτό οδηγεί σε μια μικρή μείωση της συχνότητας του συστήματος. Ένα σύστημα από συστάδες μικρογεννητριών θα μπορούσε να σχεδιαστεί έτσι ώστε να παρέχει κάποια μορφή αποθήκευσης με σκοπό τη διατήρηση της αρχικής ενεργειακής ισορροπίας.

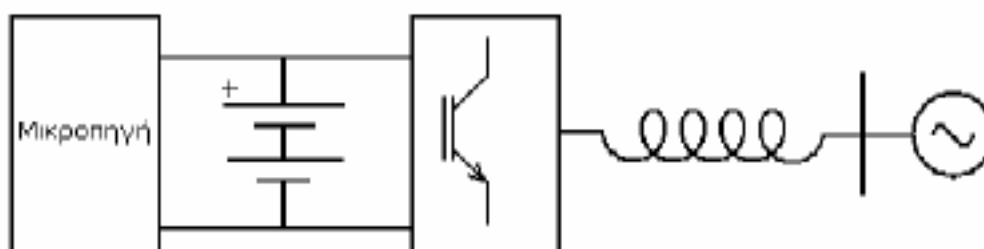
Ο έλεγχος των αντιστροφών που χρησιμοποιούνται για να παρέχουν την ισχύ ενός συστήματος εναλλασσόμενου ρεύματος σε ένα περιβάλλον διανεμημένης παραγωγής ενέργειας πρέπει να βασίζεται στις πληροφορίες που είναι διαθέσιμες τοπικά στον αντιστροφέα. Η επικοινωνία μεταξύ των συστημάτων με ανταλλαγή πληροφοριών σε ένα σύστημα με πολλές μικρές πηγές ισχύος, δεν είναι πρακτική. Η επικοινωνία αυτή μπορεί σαφώς να χρησιμοποιηθεί για να ενισχύσει την απόδοση των συστημάτων, αλλά δεν πρέπει να είναι καθοριστική για τη λειτουργία

τους. Ουσιαστικά αυτό σημαίνει ότι ο έλεγχος των αντιστροφών πρέπει να βασίζεται στα μεγέθη που «βλέπει» από το διασυνδεδεμένο δίκτυο κάθε πηγή.

Είναι ουσιαστικό να υπάρξει καλός έλεγχος της γωνίας ισχύος και το επίπεδο τάσης με τη βοήθεια του αντιστροφέα. Ο έλεγχος της συχνότητας του αντιστροφέα ελέγχει ουσιαστικά τη γωνία ισχύος και τη ροή της πραγματικής ισχύος. Για την αποτροπή της υπερφόρτωσης του αντιστροφέα και των πηγών μικρής ισχύος, είναι σημαντικό να εξασφαλιστεί ότι οι αλλαγές των φορτίων λαμβάνονται από τον αντιστροφέα με έναν σαφώς προκαθορισμένο τρόπο, χωρίς την ύπαρξη επικοινωνίας με τις υπόλοιπες πηγές ενέργειας.

## 1.6 Μοντελοποίηση

Οι χρονικές σταθερές για τις αλλαγές στην παραγωγή ισχύος για τις μικροτουρμπίνες κυμαίνονται από 5 χιλιοστά του δευτερολέπτου ως 50 δευτερόλεπτα. Αυτή η αργή απόκριση απαιτεί ότι είτε το τμήμα της συνεχούς τάσης είτε της εναλλασσόμενης έχει δυνατότητες αποθήκευσης για να εξασφαλίσει τη διαρκή κάλυψη των φορτίων. Το γενικό πρότυπο για τη διασύνδεση μιας μικροπηγής με το σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος μέσω ενός αντιστροφέα παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Διασύνδεση μικροπηγής με σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος με τη χρήση αντιστροφέα

Το λιγότερο που ο αντιστροφέας καλείται να πράξει, είναι να ελέγξει τη ροή της ενεργούς και της άεργος ισχύος ( $P$  &  $Q$ ) μεταξύ της μικροπηγής και του συστήματος ισχύος. Η ενεργός ισχύς εξαρτάται από τη γωνία ισχύος  $\delta$  ενώ η άεργος από το πλάτος της τάσης εξόδου  $V$  του μετατροπέα. Είναι επίσης δυνατός ο ανεξάρτητος έλεγχος της ενεργού ισχύος και της τάσης  $E$ . Οι εξισώσεις που ακολουθούν δείχνουν ότι για μικρές τιμές της γωνίας  $\delta$  και μικρή πτώση τάσης ( $V-E$ ), η πραγματική ισχύς είναι ανάλογη προς το ημίτονο της γωνίας  $\delta$  και η άεργος ισχύς εξαρτάται από τη διαφορά τάσης.

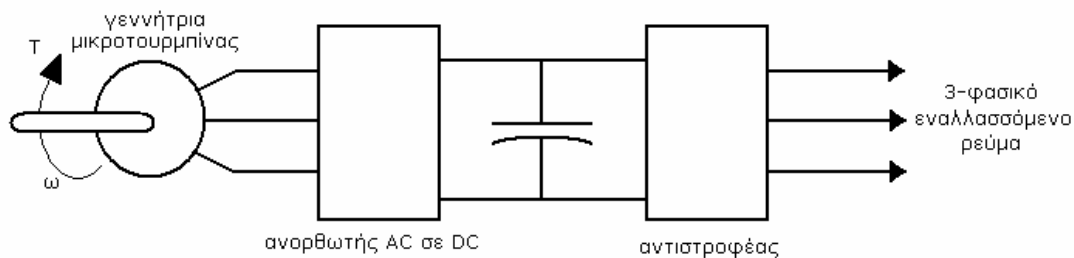
$$P = \frac{VE}{\omega L} \sin\delta \quad (1.1)$$

$$Q = \frac{V}{\omega L} (V - E \cos\delta)$$

Οι μικροτουρμπίνα που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία ενός μοντέλου προσομοίωσης έχει έναν ενιαίο περιστρεφόμενο άξονα με τη γεννήτρια, τον αεροσυμπιεστή και το στρόβιλο, που τοποθετείται σε ρουλεμάν αέρα. Ο άξονας λειτουργεί σε υψηλές ταχύτητες χωρίς οποιαδήποτε λίπανση. Οι εγκαταστάσεις

παραγωγής ενέργειας είναι αερόψυκτες, με γεννήτρια μόνιμων μαγνητών 2 πόλων. Ο αέρας που διοχετεύεται δια μέσω της γεννήτριας, έχει συμπιεστεί πριν φτάσει δια μέσω του δοχείου αέρα (recuperator) στον καυστήρα και ξανά πίσω στο δοχείο αέρα. Αυτό επιτρέπει στα αέρια της εξάτμισης να προθερμάνουν τα εισερχόμενα αέρια, λειτουργία που αυξάνει την αποδοτικότητα του συστήματος. Ο άξονας γυρίζει μεταξύ 10.000 και 90.000 ΣΑΛ. Η γεννήτρια παρέχει μια πηγή τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής συχνότητας (γωνιακές συχνότητες μέχρι 10.000 rad/s). Αυτό απαιτεί τη διασύνδεση μεταξύ της μικροτουρμπίνας και του φορτίου εναλλασσόμενου ρεύματος δια μέσω ηλεκτρονικών ισχύος. Αυτή η διασύνδεση αποτελείται από έναν ανορθωτή εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές, μια γραμμή συνεχούς ρεύματος με έναν πυκνωτή και έναν αντιστροφέα για τη μετατροπή σε εναλλασσόμενο ρεύμα.

Η γεννήτρια και ο ανορθωτής μπορούν να μοντελοποιηθούν ως ένας τριφασικός πλήρης ανορθωτής από διόδους σε σχηματισμό γέφυρας, έχοντας ως εναλλασσόμενη πηγή τη γεννήτρια της μικροτουρμπίνας. Η αυτεπαγωγή είναι η ισοδύναμη αυτεπαγωγή για κάθε φάση της γεννήτριας. Θεωρούμε επίσης ότι οι απώλειες είναι αμελητέες.



**Μετατροπή εναλλασσόμενου ρεύματος μικροτουρμπίνας σε 3-φασικό εναλλασσόμενο ρεύμα**

Για μια ιδανική γεννήτρια, η τάση γραμμής με γραμμή,  $V_{LL}$  μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$V_{LL} = K_V \omega \sin(\omega t) \tag{1.2}$$

όπου  $K_V$  είναι η σταθερά τάσης και  $\omega$  η ηλεκτρική γωνιακή συχνότητα.

Επειδή οι περισσότερες μικροτουρμπίνες χρησιμοποιούν γεννήτριες δύο πόλων οι ηλεκτρικές και μηχανικές γωνιακές συχνότητες είναι ίσες. Για τη λειτουργία σε 90.000 ΣΑΛ η γωνιακή συχνότητα είναι 9425 rad/s. Η συνεχής τάση της γραμμής για πλήρη ανόρθωση με συνεχές ρεύμα εξόδου εκφράζεται ως εξής:

$$V_{dc} = \frac{3}{\pi} |V_{LL}| - \frac{3\omega L}{\pi} I_{dc} \tag{1.3}$$

Οι εξισώσεις (1.2) και (1.3) επιτρέπουν στη συνεχή τάση να εκφραστεί συναρτήσει της γωνιακής συχνότητας και του ρεύματος:

$$E_g = V_{dc} + K_x \omega I_{dc} \tag{1.4}$$

Όπου η τάση ανοιχτού κυκλώματος  $E_g$  είναι:

$$E_g = K_e \omega \tag{1.5}$$

Οι σταθερές  $K$  ορίζονται ως εξής:

$$K_e = \frac{3K_v}{\pi} \{V / (rad / sec)\} \quad (1.6)$$

$$K_x = \frac{3L}{\pi} \{\Omega / (rad / sec)\}$$

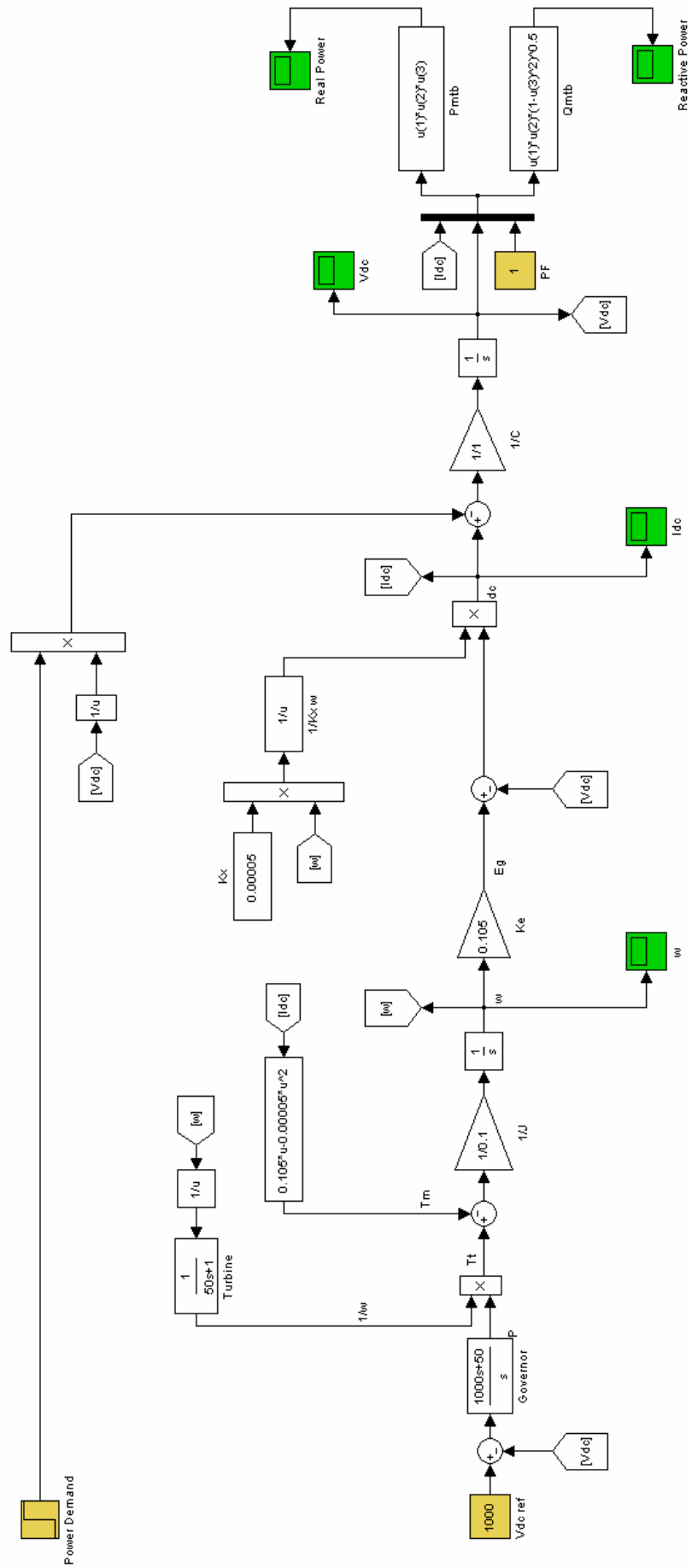
Η εξίσωση (1.4) αποτελεί τη βάση για την περιγραφή της ηλεκτρομηχανικής φύσης του συστήματος. Για ένα σύστημα χωρίς απώλειες η ισχύς εισαγωγής μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση του  $I_{dc}$ :

$$P_m = V_{dc} I_{dc} = K_e \omega I_{dc} - K_x \omega I_{dc}^2 \quad (1.7)$$

Από την εξίσωση (1.7) η μηχανική ροπή του άξονα για σύστημα χωρίς απώλειες εκφράζεται:

$$T_m = \frac{P_m}{\omega} = K_e I_{dc} - K_x I_{dc}^2 \quad (1.8)$$

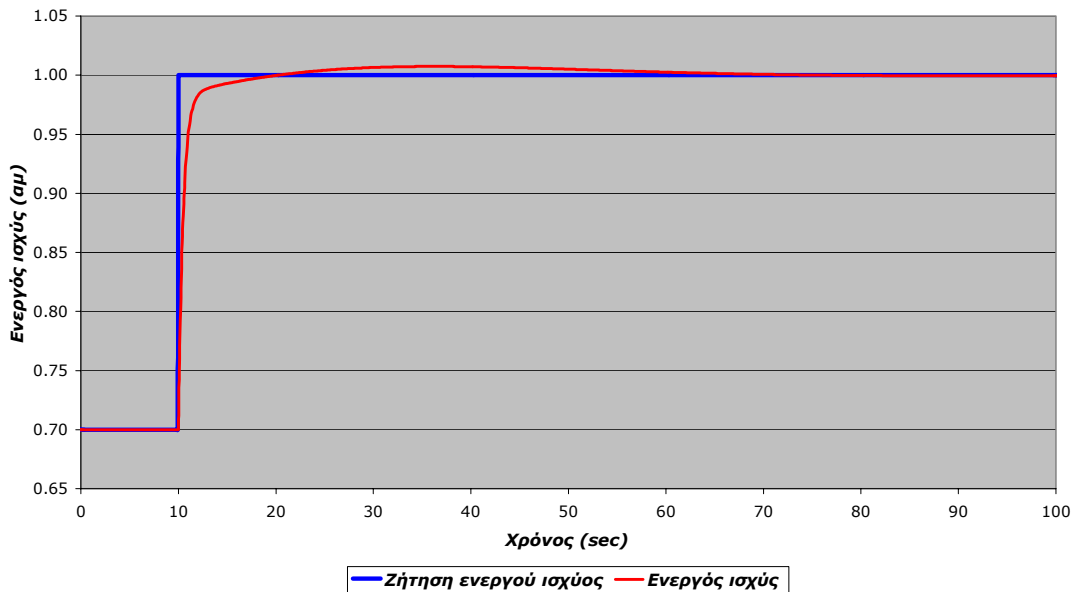
Τα μηχανικά τμήματα συστημάτων μπορούν επίσης να περιληφθούν μέσω της αδράνειας του άξονα ( $J$ ) της απόκρισης του στροβίλου και του ελεγκτή (governor). Σε αυτήν την περίπτωση η συνεχής τάση χρησιμοποιείται ως η είσοδος για τον governor. Η απόκριση του στροβίλου είναι συνάρτηση 1<sup>ου</sup> βαθμού με σταθερές χρόνου της τάξης των 5 ως 20 δευτερολέπτων. Το συνδυασμένο ηλεκτρομηχανικό πρότυπο για το σύστημα της μικροτουρμπίνας παρουσιάζεται στη συνέχεια. Η απόσβεση της γεννήτριας τουρμπίνας δεν παρουσιάζεται, αλλά θα μπορούσε να περιληφθεί σε μια συνάρτηση της ταχύτητας του άξονα. Ο συνδυασμός αυτού του μοντέλου με τη συμπεριφορά και τους ελέγχους των αντιστροφών δημιουργεί ένα σύνθετο, μη γραμμικό σύστημα.



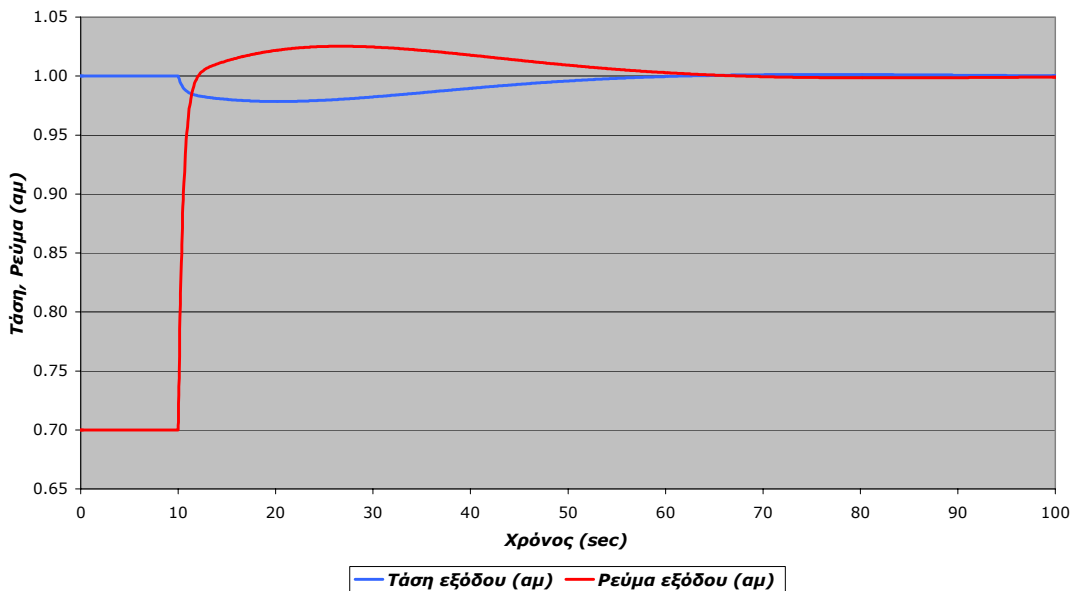
ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΙΚΡΟΤΟΥΡΜΠΙΝΑΣ

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των κυριότερων μεγεθών του μοντέλου. Σημειώνεται ότι θεωρήσαμε πως παράγεται μόνο ενεργός ισχύς  $\Sigma.I.=1$  (εξάλλου η παραγωγή και άεργου ισχύος είναι αποκλειστικά δουλειά ενός ρυθμιστή ισχύος και όχι της ίδιας της μικροτουρμπίνας) κι ότι για τα ηλεκτρικά μεγέθη χρησιμοποιήσαμε μοναδιαίες τιμές με βάση ισχύος τα 100 kW (ονομαστική ισχύς για το σύστημα μας) και βάση τάσεως την ονομαστική, 1000 Volts.

### Ενεργός ισχύς

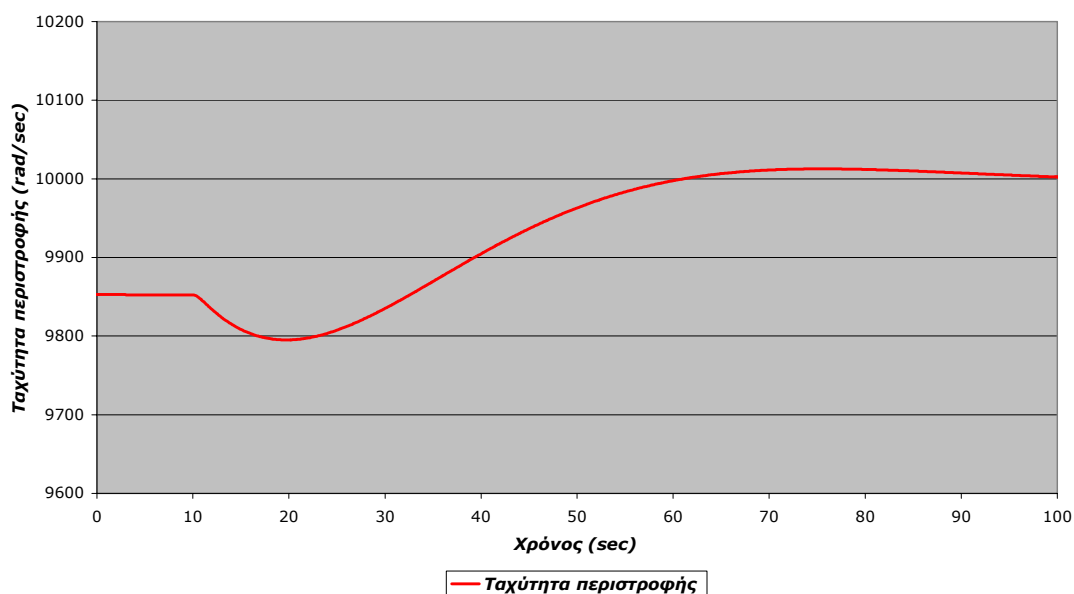


### Τάση, Ρεύμα εξόδου





### Ταχύτητα περιστροφής άξονα



### Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Σε μια βηματική αλλαγή της ζήτησης ισχύος από τη μικροτουρμπίνα από 0.7 α.μ. σε 1 α.μ. η απόκρισή της είναι ιδιαίτερα ομαλή και διαρκεί περί τα 10 sec. Για τα πρώτα 5 περίπου sec η αύξηση της ενεργού ισχύος είναι σχετικά γρήγορη, γεγονός που οφείλεται στη συνάρτηση μεταφοράς που χαρακτηρίζει τον ελεγκτή «governor» ενώ στη συνέχεια η πιο ομαλή προσέγγιση της οφείλεται στην πιο αργή απόκριση της τουρμπίνας, όσον αφορά την προσέγγιση των ονομαστικών στρωφών της.

Η dc τάση και το ρεύμα καθυστερούν λίγο παραπάνω να προσεγγίσουν τις ονομαστικές τιμές τους (περί τα 30 sec) και να σταθεροποιηθούν σε αυτές και η συμπεριφορά του ρεύματος είναι αντίστοιχη με αυτή της ισχύος. Η διακύμανση της τάσεως είναι ιδιαίτερα μικρή (μέγιστη 0.02 α.μ.) και προσεγγίζει και πάλι, μετά τη μεταβολή, την αρχική τιμή της.

Η ταχύτητα περιστροφής του άξονα έχει επίσης πολύ μικρή διακύμανση (2%), αντίστοιχη της τάσης, αλλά η νέα ταχύτητα περιστροφής είναι περί το 1.5% μεγαλύτερη από την αρχική (1500 rad/sec μεγαλύτερη). Εδώ παρατηρούμε το πόσο αργά αποκρίνεται η ταχύτητα περιστροφής της τουρμπίνας, αφού χρειάζεται σχεδόν 50 sec για να προσεγγίσει τις ονομαστικές τις τιμές. Σημειώνεται ότι η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής του άξονα (10000 rad/sec) αντιστοιχεί σε περίπου 95500 ΣΑΛ.



## 2. Κυψέλες καυσίμων (fuel cells)

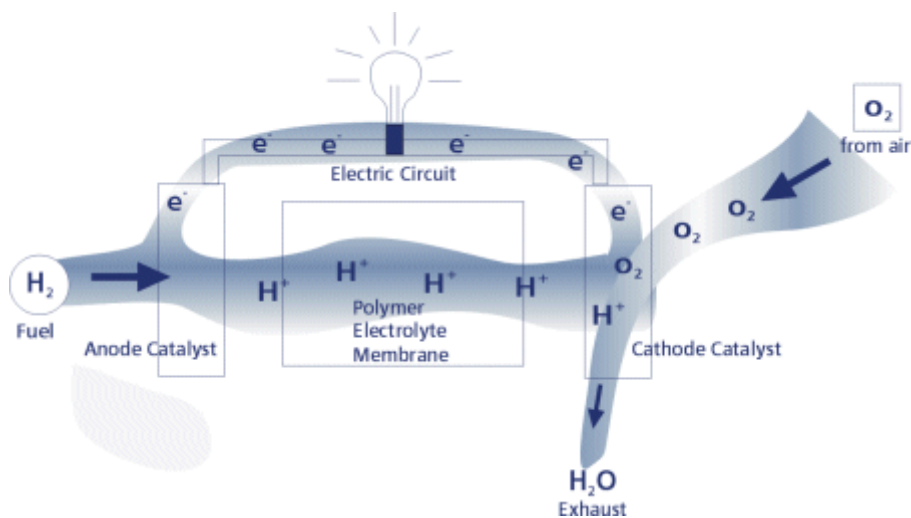
Η πρώτη εφαρμογή κυψέλης καυσίμων παρουσιάστηκε από τον Sir William Grove το 1842. Η τεχνολογία εξελίχθηκε με αργούς ρυθμούς κατά τη διάρκεια των ετών αλλά έκανε ένα γιγαντιαίο άλμα στη δεκαετία του '60 όταν η General Electric παρήγαγε την πρώτη πρακτική εφαρμογή κυψελών καυσίμων, όταν τροφοδότησε με ηλεκτρική ισχύ τις διαστημικές εφαρμογές Gemini και Apollo.

### 2.1 Εισαγωγή

Μία κυψέλη καυσίμων είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή ενεργειακής μετατροπής που μετατρέπει το υδρογόνο και το οξυγόνο σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα. Είναι παρόμοιο με μια μπαταρία που μπορεί να επαναφορτιστεί ενώ απορροφάται από αυτήν ισχύς. Αντί της επαναφόρτισής της χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια μία κυψέλη καυσίμων χρησιμοποιεί το υδρογόνο και το οξυγόνο.



Μία κυψέλη καυσίμων αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια, μια άνοδο και μια κάθοδο, που διαχωρίζονται από έναν ηλεκτρολύτη. Η ισχύς παράγεται ηλεκτροχημικά με τη διάβαση των ιόντων (φορτισμένα σωματίδια), που διαμορφώνονται από τη μία πλευρά των ηλεκτροδίων με τη βοήθεια ενός καταλύτη, δια μέσου του ηλεκτρολύτη. Το ρεύμα που παράγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Παρακάτω παρουσιάζεται σχηματικά η ηλεκτροχημική αντίδραση που πραγματοποιείται π.χ. στην κυψέλη καυσίμων με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM):



Η μεμβράνη μπορεί να διασχιστεί μόνο από τα ιόντα που είναι φορτισμένα με ένα πρόσημο, ενώ είναι πλήρως αδιαπέραστη στα φορτία του άλλου προσήμου. Σαν αποτέλεσμα, οι πλευρές της μεμβράνης φορτίζονται όπως οι πλάκες ενός πυκνωτή. Τα φορτία μπορούν να φθάσουν στην άλλη πλευρά της μεμβράνης μέσω του εξωτερικού κυκλώματος, το οποίο είναι το ηλεκτρικό φορτίο που έχουμε θέσει στην κυψέλη. Μόλις φθάσουν τα φορτία μέσω του εξωτερικού κυκλώματος στην άλλη πλευρά της μεμβράνης, εξουδετερώνουν αυτά που υπάρχουν ήδη εκεί.

Το προφανές αυτής της διαδικασίας είναι ότι πρέπει να δημιουργούνται διαρκώς φορτία αντίθετου προσήμου σε κάθε μία από τις πλευρές της μεμβράνης. Η συσσώρευση των φορτίων προέρχεται από μια διαδικασία ιονισμού που προκαλείται από μια χημική αντίδραση. Αυτή η αντίδραση είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη σε παραμέτρους όπως η συγκέντρωση των αντιδρώντων και των προϊόντων των αντιδράσεων, της θερμοκρασίας και της πίεσης.

Κάθε μεμβράνη έχει μια καθορισμένη μέγιστη τάση που μπορεί να παράγει από τα φορτία που είναι παρόντα, ανά μονάδα επιφάνειας, ενώ το ρεύμα καθορίζεται από το συνολικό ποσό των φορτίων, το οποίο καθορίζεται από τη συνολική επιφάνεια της μεμβράνης. Χαρακτηριστικά, μια μεμβράνη μπορεί να παράγει λιγότερο από 1 Volt μεταξύ των πλευρών της. Πρέπει λοιπόν να συσσωρευτούν εκατοντάδες αυτών των μεμβρανών για να αποκτήσει η παραγόμενη τάση ένα επίπεδο που να μπορεί να ταιριάζει για τη διασύνδεση με συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος.

## **2.2 Αγορά κυψελών καυσίμων**

Παρά τις υψηλότερες δαπάνες, οι αναλυτές είναι αισιόδοξοι για το μέλλον των κυψελών καυσίμων. Η τράπεζα επενδύσεων Goldman Sachs αναμένει την αγορά κυψελών καυσίμων να αυξηθεί σε \$95 δισεκατομμύρια στα επόμενα δέκα έτη, εν μέρει επειδή τα σχέδια γίνονται για να τα τοποθετήσουν σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών: από κινητά τηλέφωνα έως αναπηρικές καρέκλες. Ξοδεύοντας ήδη περίπου \$2 δισεκατομμύρια στην τεχνολογία, προωθούνται στην αγορά αυτοκίνητα κυψελών καυσίμων μέχρι το 2004. Μια πρόσφατη μελέτη από το MIT (Massachusetts Institute of Technology) καταγράφει ότι τα αυτοκίνητα με κυψέλες καυσίμων θα είναι σε θέση να ταξιδέψουν 5.000 μίλια πριν χρειαστούν ανεφοδιασμό. Παρ' όλα αυτά, είναι πολύ πιθανό να εμπορευματοποιηθούν φορητές μονάδες κυψελών καυσίμων πριν από τα αυτοκίνητα κυψελών καυσίμων, γεγονός που κατά ένα μεγάλο μέρος οφείλεται στα προβλήματα που συνδέονται με τη μεταφορά και την αποθήκευση των μεγάλων ποσοτήτων του ιδιαίτερα εύφλεκτου υδρογόνου, σε ένα αναγκαίο δίκτυο ανεφοδιασμού υδρογόνου.

Οι κυψέλες καυσίμων δεν αναμένονται να αποκτήσουν ουσιαστικό μερίδιο της αγοράς για τουλάχιστον μια ακόμη δεκαετία. Προς το παρόν, οι κύριοι καταναλωτές αυτής της τεχνολογίας είναι μεγάλες ισχυρές οικονομικά εταιρίες με έντονη οικολογική συνείδηση. Μερικές επιχειρήσεις κυψελών καυσίμων ενώνουν όμως τις δυνάμεις τους με τις επιχειρήσεις μικροτουρμπίνων για τη δημιουργία υβριδικών εφαρμογών που συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα καθεμιάς των δύο τεχνολογιών και χαμηλώνουν το γενικό κόστος ανά μονάδα ενέργειας. Η εταιρία Capstone Turbine συνεργάζεται αυτήν την περίοδο με την FuelCell Energy σε μια υβριδική γεννήτρια που λαμβάνει τα αέρια της εξάτμισης μιας κυψέλης καυσίμων λιωμένου ανθρακικού άλατος (MCFC) και τροφοδοτεί με αυτά μια μικροτουρμπίνα. Τέτοιου είδους υβρίδια μπορούν να αυξήσουν την αποδοτικότητα των κυψελών καυσίμων σε ποσοστά 40 έως 45%, και 30% στις μικροτουρμπίνες.

Αν και οι κυψέλες καυσίμων αντιμετωπίζονται σήμερα ως μια καινοτόμος διέξοδος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, στην πραγματικότητα χρησιμοποιήθηκαν

για πρώτη φορά στη δεκαετία του '60, από τη NASA (Αμερικάνικη εθνική αεροναυτική και διαστημική διοίκηση) για την τροφοδότηση με ενέργεια των διαστημόπλοιων, από όπου και έγινε γνωστή η τεχνολογία αυτή στο ευρύ κοινό. Κερδίζοντας την εμπιστοσύνη των καταναλωτών μετά από δεκαετίες πολλών αθετημένων υποσχέσεων, υπάρχει σαφής ένδειξη ότι ανοίγεται ο δρόμος για τη γενικότερη χρήση των κυψελών καυσίμων σε διάφορες εφαρμογές.

Με αυτήν την τεχνολογία, η ισχύς παράγεται με τη χρησιμοποίηση του υδρογόνου ως καυσίμου και του οξυγόνου ως οξειδωτικού σε μια ηλεκτροχημική αντίδραση. Τα μόνα υποπροϊόντα είναι θερμότητα, νερό, και διοξείδιο του άνθρακα - κανένα επιβλαβές καυσαέριο. Επιπλέον οι κυψέλες καυσίμων μπορούν να λειτουργούν για εβδομάδες, είναι δύο φορές πιο αποδοτικές από τις μηχανές που καίνε φυσικά καύσιμα, και έχουν μεγαλύτερη διάρκεια από τις μπαταρίες. Γι' αυτούς τους λόγους δεν είναι έκπληξη που οι κυψέλες καυσίμων είναι μια ιδιαίτερα ελκυστική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας.

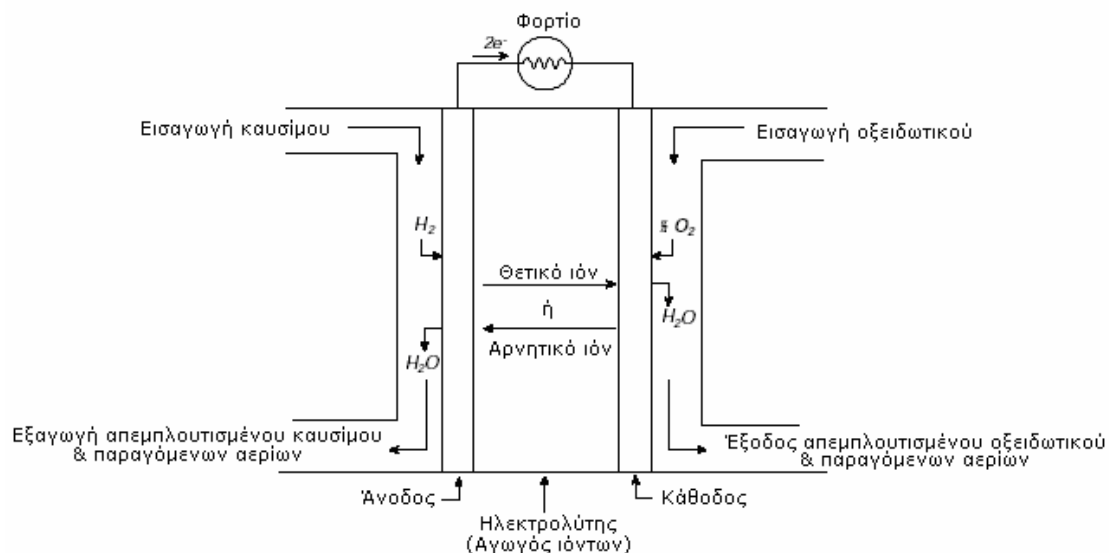
Το βασικότερο πρόβλημα των κυψελών καυσίμων είναι ότι το κόστος τους είναι δέκα φορές μεγαλύτερο άλλων πηγών ενέργειας (κατά προσέγγιση \$5.000 έως \$7.000 ανά kW, έναντι \$400 για τις μικροτουρμπίνες), συνεπώς η ηλεκτρική παραγωγή κυψελών καυσίμων είναι ακόμα ακριβότερη από τις εναλλακτικές μεθόδους. Επιπλέον οι περισσότερες καθυστερήσεις στην παραγωγή των κυψελών καυσίμων αποδίδονται στο γεγονός ότι είναι ιδιαίτερα σύνθετες στην κατασκευή. Βέβαια η τεχνολογία των κυψελών καυσίμων είναι ακόμα σχετικά νέα στις εμπορικές εφαρμογές. Και η αγορά είναι πολύ μικρή ακόμα για τη δοκιμή της.

Οι κυψέλες καυσίμων προσφέρονται επίσης για τις διανεμημένες εφαρμογές παραγωγής ενέργειας. Προσφέρουν υψηλή αποδοτικότητα και χαμηλές εκπομπές ρύπων (αν και, όπως προαναφέραμε, προς το παρόν το κόστος τους είναι υψηλό). Η κυψέλη καυσίμων φωσφορικού οξέος (PAFC) είναι εμπορικά διαθέσιμη στην ισχύ των 200kW, ενώ έχουν τεθεί σε εφαρμογή η κυψέλη καυσίμων στερεού οξειδίου (SOFC) και λιωμένου ανθρακικού άλατος (MCFC).

## **2.3 Αναλυτική περιγραφή κυψελών καυσίμων**

### **2.3.1 Αρχές λειτουργίας**

Οι κυψέλες καυσίμων είναι ηλεκτροχημικές συσκευές που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια μιας αντίδρασης απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η βασική φυσική δομή ή δομική μονάδα μιας κυψέλης καυσίμων αποτελείται από ένα στρώμα ηλεκτρολύτη σε επαφή με μια πορώδη άνοδο και μια κάθοδο σε κάθε πλευρά. Μια σχηματική αναπαράσταση μιας μεμονωμένης κυψέλης καυσίμων με τα αέρια αντιδρώντων και προϊόντων και τις κατευθύνσεις ροής των ιόντων αγωγής μέσω της κυψέλης, παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σε μία κυψέλη καυσίμων, το διαμέρισμα ανόδων (αρνητικό ηλεκτρόδιο) τροφοδοτείται διαρκώς με αέρια καύσιμα (π.χ. υδρογόνο) ενώ το διαμέρισμα καθόδων (θετικό ηλεκτρόδιο) με ένα οξειδωτικό (δηλαδή οξυγόνο προερχόμενο από τον ατμοσφαιρικό αέρα). Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις πραγματοποιούνται στα ηλεκτρόδια και παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Μία κυψέλη καυσίμων, αν και έχει τα συστατικά και τα χαρακτηριστικά στοιχεία μιας κοινής μπαταρίας, διαφέρει σε αρκετά σημεία. Η μπαταρία είναι μια συσκευή ενεργειακής αποθήκευσης. Η μέγιστη διαθέσιμη ενέργεια καθορίζεται από το ποσό του χημικού αντιδρώντος που είναι αποθηκευμένο μέσα στην ίδια την μπαταρία. Η μπαταρία παύει συνεπώς να παράγει ηλεκτρική ενέργεια όταν καταναλωθούν τα υπάρχοντα αντιδρώντα (όταν δηλ. αποφορτιστεί η μπαταρία). Σε μια δευτερεύουσα μπαταρία, τα αντιδρώντα στοιχεία αναπαράγονται με επαναφόρτιση, η οποία αφορά την τοποθέτηση ενέργειας στην μπαταρία από μια εξωτερική πηγή. Οι κυψέλες καυσίμων, αφ' ετέρου, είναι μια συσκευή ενεργειακής μετατροπής που έχει θεωρητικά την ικανότητα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για όσο παρέχονται καύσιμα και οξειδωτικό στα ηλεκτρόδια. Στην πραγματικότητα, η ενεργειακή υποβάθμιση, πρώτιστα η διάβρωση, ή η δυσλειτουργία των συστατικών περιορίζουν την πρακτική ζωή των κυψελών καυσίμων.

Σημειώστε ότι το είδος του ιόντος και η κατεύθυνση μεταφοράς του μπορούν να διαφέρουν, επηρεάζοντας την περιοχή της παραγωγής και της αποβολής νερού – επηρεάζοντας συνεπώς και ολόκληρο το σύστημα. Το ιόν μπορεί να είναι είτε θετικό είτε αρνητικό, που σημαίνει ότι το ιόν φέρει είτε θετικό είτε αρνητικό φορτίο (πλεόνασμα ή έλλειμμα των ηλεκτρονίων). Τα αέρια καύσιμα ή τα οξειδωτικά ρέουν δίπλα στην επιφάνεια της ανόδου ή της καθόδου στην αντίθετη πλευρά από αυτή του ηλεκτρολύτη και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από την οξείδωση των καυσίμων (συνήθως υδρογόνο) και την αναγωγή του οξειδωτικού, (συνήθως οξυγόνο). Οι Appleby και Foulkes έχουν σημειώσει ότι θεωρητικά, οποιαδήποτε ουσία, ικανή για χημική οξείδωση, που μπορεί να παρασχεθεί συνεχώς (ως ρευστό) μπορεί να καεί με γαλβανισμό ως καύσιμο στην άνοδο μιας κυψέλης καυσίμων. Ομοίως, το οξειδωτικό μπορεί να είναι οποιοδήποτε ρευστό που μπορεί να αναχθεί σε ένα ικανοποιητικό ποσοστό. Το αεριώδες υδρογόνο έχει γίνει το καύσιμο της επιλογής για τις περισσότερες εφαρμογές, λόγω της υψηλής ικανότητας άμεσης αντίδρασης του όταν χρησιμοποιούνται οι κατάλληλοι καταλύτες, της δυνατότητάς του να παράγεται από τους υδρογονάνθρακες για επίγειες εφαρμογές και της υψηλής ενεργειακής πυκνότητάς του όταν αποθηκεύεται κατά τρόπο κρυστατικό (σημειώνεται ότι η θερμοκρασία βρασμού του υδρογόνου είναι  $T=20,4 \text{ }^\circ\text{K}$ ) για τις εφαρμογές κλειστού χώρου, όπως στο διάστημα. Με ανάλογο

τρόπο, το πιο κοινό οξειδωτικό είναι το αεριώδες οξυγόνο, που είναι διαθέσιμο εύκολα και οικονομικά από τον αέρα για τις επίγειες εφαρμογές, και επίσης αποθηκεύεται εύκολα σε ένα κλειστό περιβάλλον. Μεταξύ των αντιδρώντων, του ηλεκτρολύτη και του καταλύτη δημιουργείται μια τριφασική διασύνδεση - στην περιοχή του πορώδους ηλεκτροδίου. Η φύση αυτής της διασύνδεσης διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο κατά την ηλεκτροχημική δράση μιας κυψέλης καυσίμων, ιδιαίτερα σε εκείνες τις κυψέλες καυσίμων που χρησιμοποιούν υγρούς ηλεκτρολύτες. Σε τέτοιες κυψέλες καυσίμων, τα αέρια του αντιδρώντος διαχέονται μέσω ενός λεπτού στρώματος ηλεκτρολύτη - που έχει εφυγράνει τμήματα του πορώδους ηλεκτροδίου - και αντιδρούν ηλεκτροχημικά πάνω στην αντίστοιχη επιφάνεια ηλεκτροδίων τους. Εάν το πορώδες ηλεκτρόδιο περιέχει υπερβολικό ποσό ηλεκτρολύτη, το ηλεκτρόδιο μπορεί να "πλημμυρίσει" και να περιορίσει τη μεταφορά των αεριωδών ειδών που βρίσκονται στη φάση του ηλεκτρολύτη προς τις περιοχές αντίδρασης. Η συνέπεια είναι μια μείωση στην ηλεκτροχημική απόδοση του πορώδους ηλεκτροδίου. Κατά συνέπεια, πρέπει να διατηρηθεί μεταξύ του ηλεκτροδίου, του ηλεκτρολύτη, και των αεριωδών φάσεων στην πορώδη δομή ηλεκτροδίων μια λεπτή ισορροπία. Ένα μεγάλο μέρος των πρόσφατων προσπαθειών στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμων έχει αφιερωθεί στη μείωση του πάχους των διαφόρων τμημάτων των κυψελών και στη βελτίωση της δομής των ηλεκτροδίων και της φάσης των ηλεκτρολυτών, με στόχο μια υψηλότερη και σταθερότερη ηλεκτροχημική απόδοση με παράλληλη μείωση του κόστους.

Ο ηλεκτρολύτης όχι μόνο μεταφέρει τα διαλυμένα αντιδρώντα στο ηλεκτρόδιο, αλλά παράλληλα αποτελεί και τον αγωγό για τη μεταφορά των φορτισμένων ιόντων μεταξύ των ηλεκτροδίων και κατ' αυτόν τον τρόπο ολοκληρώνει το ηλεκτρικό κύκλωμα των κυψελών, όπως παρουσιάζεται και στο παραπάνω σχήμα. Παρέχει επίσης ένα φυσικό εμπόδιο για την άμεση ανάμιξη των ρευμάτων αερίων καυσίμων και οξειδωτικών στοιχείων.

Οι λειτουργίες των πορώδων ηλεκτροδίων στις κυψέλες καυσίμων είναι:

- 1) να παρέχουν μια επιφάνεια όπου μπορούν να πραγματοποιηθούν αντιδράσεις ιονισμού και απιονισμού αερίων ή υγρών
- 2) να άγουν τα ιόντα από ή προς το τριφασικό δίκτυο μόλις αυτά σχηματίζονται (συνεπώς ένα ηλεκτρόδιο πρέπει να αποτελείται από υλικό με καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα)
- 3) να παρέχουν ένα φυσικό εμπόδιο που να διαχωρίζει το αέριο από τον ηλεκτρολύτη

Ένα πόρισμα της πρώτης λειτουργίας είναι ότι, προκειμένου να αυξηθούν τα ποσοστά των αντιδράσεων, το υλικό ηλεκτροδίων πρέπει να είναι καταλυτικό καθώς επίσης και αγωγίμο και τέλος, περισσότερο πορώδες παρά συμπαγές. Η καταλυτική λειτουργία των ηλεκτροδίων είναι σημαντικότερη στις κυψέλες καυσίμων χαμηλότερης θερμοκρασίας και λιγότερο στις υψηλής θερμοκρασίας, επειδή τα ποσοστά αντίδρασης ιονισμού αυξάνονται με τη θερμοκρασία. Πρέπει επίσης τα πορώδη ηλεκτρόδια να είναι διαπερατά και στον ηλεκτρολύτη και στα αέρια, αλλά όχι σε τέτοιο ποσοστό ώστε να υπάρχει κίνδυνος το μέσο να "πλημμυρίσει" από τον ηλεκτρολύτη ή να "ξηραθεί" από τα αέρια κατά μονόπλευρο τρόπο.

### **2.3.2 Τύποι κυψελών καυσίμων**

Ποικίλες κυψέλες καυσίμων είναι σε διάφορα στάδια ανάπτυξης. Μπορούν να ταξινομηθούν με τη χρήση αρκετών κατηγοριών, ανάλογα με το συνδυασμό τύπου καυσίμου και οξειδωτικού, με το εάν τα καύσιμα επεξεργάζονται εξωτερικά στην κυψέλη καυσίμων (εξωτερική αναμόρφωση) ή εσωτερικά (εσωτερική

αναμόρφωση), με τον τύπο του ηλεκτρολύτη, τη θερμοκρασία λειτουργίας, με το εάν τα αντιδρώντα τροφοδοτούνται στην κυψέλη από εσωτερικές ή εξωτερικές πολλαπλότητες κλπ. Η σημαντικότερη διαφορά μεταξύ των περισσότερων κυψελών καυσίμων είναι ο τύπος ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται. Η πιο κοινή λοιπόν ταξινόμηση των κυψελών καυσίμων είναι από τον τύπο ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται στις κυψέλες και περιλαμβάνει:

- 1) η κυψέλη καυσίμων μεμβράνης ηλεκτρολύτη (πολυμερές σώμα) ανταλλαγής πρωτονίων (PEFC – Proton Exchange Fuel Cell)
- 2) η αλκαλική κυψέλη καυσίμων (AFC – Alkaline Fuel Cell)
- 3) η κυψέλη καυσίμων φωσφορικού οξέος (PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cell)
- 4) η κυψέλη καυσίμων λιωμένου ανθρακικού άλατος (MCFC – Molten Carbonate Fuel Cell)
- 5) η κυψέλη καυσίμων στερεού οξειδίου (SOFC – Solid Oxide Fuel Cell)

Οι προαναφερθέντες τύποι κυψελών καυσίμων παρατίθενται κατά προσέγγιση της θερμοκρασίας λειτουργίας, που κυμαίνεται:

Τύπος κυψέλης καυσίμων	Θερμοκρασία λειτουργίας (°C)
PEFC	~80
AFC	~100
PAFC	~200
MCFC	~650
SOFC	800 – 1000

Η θερμοκρασία λειτουργίας και η ζωή μιας κυψέλης καυσίμων υπαγορεύουν τις φυσικοχημικές και θερμομηχανικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται στα τμήματα των κυψελών αυτών (δηλ. ηλεκτρόδια, ηλεκτρολύτης, διασύνδεση, συλλέκτης ρεύματος κλπ). Οι υδάτινοι ηλεκτρολύτες περιορίζονται σε θερμοκρασίες των 200 °C περίπου ή ακόμα χαμηλότερες λόγω της υψηλής πίεσης που δημιουργούν οι υδρατμοί τους ή/και τη γρήγορη αποικοδόμηση των χημικών ενώσεων στις υψηλότερες θερμοκρασίες. Η λειτουργούσα θερμοκρασία διαδραματίζει επίσης έναν σημαντικό ρόλο στην υπαγόρευση του τύπου καυσίμων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μία κυψέλη καυσίμων.

Οι χαμηλής θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμων με τους υδάτινους ηλεκτρολύτες περιορίζονται στο υδρογόνο ως καύσιμο, στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές. Στις υψηλής θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμων μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και ακόμη το (CH<sub>4</sub>) λόγω των εγγενώς γρήγορων κινητικά ηλεκτροδίων και της μικρότερης ανάγκης για έντονη καταλυτική δραστηριότητα σε υψηλές θερμοκρασίες. Εντούτοις, περιγραφές αργότερα σε αυτό το τμήμα σημειώνουν ότι οι κυψέλες υψηλότερης θερμοκρασίας μπορούν να ευνοήσουν τη μετατροπή του CO και του CH<sub>4</sub> σε υδρογόνο και κατόπιν χρήση του ισοδύναμου υδρογόνου ως πραγματικό καύσιμο.

**Κυψέλη καυσίμων πολυμερών ηλεκτρολυτών (PEFC):** Αυτές οι κυψέλες λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, έχουν υψηλή πυκνότητα ισχύος, μπορούν να μεταβάλλουν γρήγορα την έξοδό τους για να ικανοποιήσουν τις μετατοπίσεις στη ζήτηση ισχύος και είναι κατάλληλα για εφαρμογές όπου απαιτείται γρήγορη απόκριση στην εκκίνηση (π.χ. παραγωγή και μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας). Η πλευρά της ανόδου της κυψέλης καυσίμων τροφοδοτείται με υδρογόνο. Η παρουσία του καταλύτη διευκολύνει τα άτομα υδρογόνου να απελευθερώσουν ηλεκτρόνια και να δημιουργηθούν έτσι ιόντα υδρογόνου (δηλ. πρωτόνια). Τα ηλεκτρόνια μετακινούνται υπό τη μορφή ηλεκτρικού ρεύματος, το



οποίο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί προτού φτάσει στην πλευρά της καθόδου της κυψέλης καυσίμων που έχει τροφοδοτηθεί με οξυγόνο. Συγχρόνως, τα πρωτόνια διαχέονται δια μέσω της μεμβράνης στην κάθοδο, όπου το άτομο υδρογόνου αντιδρά με το οξυγόνο προς σχηματισμό νερού.

Ο ηλεκτρολύτης σε αυτήν την κυψέλη καυσίμων είναι μια μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων (φθοριωμένο πολυμερές σώμα σουλφονικού οξέος ή άλλα παρόμοια πολυμερή σώματα), που είναι ένας άριστος αγωγός πρωτονίων. Η μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων είναι ουσιαστικά ένα λεπτό πλαστικό φύλλο που επιτρέπει στα ιόντα υδρογόνου να το διαπεράσουν. Η μεμβράνη είναι επενδυμένη και στις δύο πλευρές με πυκνά διασκορπισμένα σωματίδια κραμάτων μετάλλων (συνήθως λευκόχρυσου) που είναι ενεργοί καταλύτες. Το μόνο υγρό σε αυτήν την κυψέλη καυσίμων είναι το νερό, κατά συνέπεια, υπάρχουν ελάχιστα προβλήματα διάβρωσης. Η διαχείριση του νερού στη μεμβράνη είναι κρίσιμη για την καλή απόδοση της κυψέλης καυσίμων· η κυψέλη καυσίμων πρέπει να λειτουργεί κάτω από συνθήκες στις οποίες το νερό των υποπροϊόντων δεν εξατμίζεται γρηγορότερα από ότι παράγεται, επειδή η μεμβράνη πρέπει να ενυδατώνεται.

Λόγω του περιορισμού στη λειτουργούσα θερμοκρασία που επιβάλλεται από το πολυμερές - συνήθως λιγότερο από 120 °C - και εξαιτίας προβλημάτων στην ισορροπία του νερού, χρησιμοποιείται αέριο πλούσιο σε H<sub>2</sub> με ελάχιστο ή καθόλου CO (δηλητήριο σε χαμηλές θερμοκρασίες). Καταλύτες υψηλότερων αποδόσεων (λευκόχρυσος (Pt) στις περισσότερες περιπτώσεις), από εκείνους που χρησιμοποιούνται στα PAFC, απαιτούνται και στην άνοδο και στην κάθοδο.

### **Αλκαλική κυψέλη καυσίμων (AFC)**

Ο ηλεκτρολύτης σε αυτήν την κυψέλη καυσίμων είναι συγκεντρωμένο KOH (85 % κ.β.) στις κυψέλες καυσίμων που χρησιμοποιούνται σε υψηλές θερμοκρασίες (~250 °C), ή λιγότερο συγκεντρωμένο (35-50% κ.β.) KOH στις κυψέλες που χρησιμοποιούνται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (<120 °C). Ο ηλεκτρολύτης διατηρείται σε μια μήτρα (συνήθως αμίαντος), και ένα ευρύ φάσμα ηλεκτροκαταλυτών μπορεί να χρησιμοποιηθεί (π.χ., Ni, άργυρος, μεταλλικά οξειδία, σπινέλλιοι (ορυκτό υλικό), και ευγενή μέταλλα). Τα καύσιμα με τα οποία ανεφοδιάζεται η κυψέλη περιορίζονται σε συστατικά που δεν αντιδρούν, εκτός του υδρογόνου. Το CO είναι δηλητήριο, και το CO<sub>2</sub> θα αντιδράσει με το καυστικό κάλιο (KOH) προς σχηματισμό K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, αλλάζοντας κατά συνέπεια τον ηλεκτρολύτη. Ακόμη και ένα μικρό ποσό CO<sub>2</sub> στον αέρα θα πρέπει να υπολογίζεται στην αλκαλική κυψέλη.

### **Κυψέλη καυσίμων φωσφορικού οξέος (PAFC)**

Οι κυψέλες καυσίμων φωσφορικού οξέος θεωρούνται γενικά τεχνολογία "1ης γενιάς". Αυτές οι κυψέλες καυσίμων λειτουργούν σε θερμοκρασία 150 με 220 °C και επιτυγχάνουν αποδοτικότητα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς καύσιμο 40 έως 45%, με υπολογισμούς στη χαμηλότερη βάση θέρμανσης LHV (Lower Heating Value - βλέπε παράρτημα).

Σε αυτήν την κυψέλη καυσίμων, χρησιμοποιείται για ηλεκτρολύτης φωσφορικό οξύ, συγκεντρωμένο σε ποσοστό 100%. Στις χαμηλότερες θερμοκρασίες, το φωσφορικό οξύ είναι ένας «φτωχός» αγωγός ιόντων, και η δηλητηρίαση του ηλεκτροκαταλύτη Pt με CO στην άνοδο γίνεται σοβαρή.

Η σχετική σταθερότητα του συγκεντρωμένου φωσφορικού οξέος είναι υψηλή έναντι άλλων κοινών οξέων συνεπώς το PAFC είναι σε θέση να λειτουργεί στο άνω άκρο των θερμοκρασιών για ηλεκτρολύτες οξέων (100 με 220 °C). Επιπλέον, η χρήση του συγκεντρωμένου οξέος (100%) ελαχιστοποιεί την πίεση των υδρατμών

και έτσι η διαχείριση του νερού στην κυψέλη δεν είναι δύσκολη. Η μήτρα που χρησιμοποιείται παγκοσμίως για να διατηρήσει το οξύ είναι το καρβίδιο του πυριτίου, και ο ηλεκτροκαταλύτης (και στην άνοδο και στην κάθοδο) είναι Pt.

### **Κυψέλη καυσίμων λιωμένου ανθρακικού άλατος (MCFC)**

Η τεχνολογία λιωμένου ανθρακικού άλατος έχει τη δυνατότητα να φθάσει σε αποδοτικότητα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς καύσιμο 50 έως 60% LHV και επιτρέπει στο συνολικό σύστημα να φθάνει θερμική αποδοτικότητα μέχρι 85% LHV στις εφαρμογές με σύστημα ανάκτησης θερμότητας. Τα MCFCs έχουν χρησιμοποιηθεί με ποικίλα καύσιμα όπως υδρογόνο, μονοξειδίο του άνθρακα, φυσικό αέριο, προπάνιο, αέριο προερχόμενο από απόβλητα θαμμένα σε χωματερές, πετρέλαιο diesel που εξορύσσεται από τη θάλασσα, και διάφορα προϊόντα που προέρχονται από διαδικασίες αεριοποίησης άνθρακα.

Ο ηλεκτρολύτης σε αυτήν την κυψέλη καυσίμων είναι συνήθως ένας συνδυασμός αλκαλικών ανθρακικών αλάτων ή συνδυασμός (Na και K), ο οποίος διατηρείται σε μια κεραμική μήτρα  $\text{LiAlO}_2$ . Η κυψέλη καυσίμων λειτουργεί σε θερμοκρασία 600 με 700 °C στην οποία τα αλκαλικά ανθρακικά άλατα διαμορφώνουν ένα ιδιαίτερα αγωγίμο λιωμένο άλας, με τα ιόντα ανθρακικού άλατος να επιτρέπουν την αγωγή των ιόντων. Στις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας των MCFC, το Ni (άνοδος) και το οξειδίο του νικελίου (κάθοδος) είναι τα αρμόδια για τη διεξαγωγή της αντίδρασης. Δεν απαιτούνται ευγενή μέταλλα.

### **Κυψέλη καυσίμων στερεών οξειδίων (SOFC)**

Οι κυψέλες καυσίμων στερεών οξειδίων λειτουργούν σε θερμοκρασίες 650 με 1000 °C, γεγονός που ενισχύει περαιτέρω την απόδοση των συστημάτων στα οποία χρησιμοποιείται η μέθοδος ανάκτησης θερμότητας. Όπως και με τα MCFCs, τα SOFCs είναι ικανά για αποδοτικότητα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς καύσιμο 50 έως 60% και για συνολική θερμική αποδοτικότητα του συστήματος, στις εφαρμογές με σύστημα ανάκτησης θερμότητας, μέχρι 85% LHV.

Ο ηλεκτρολύτης σε αυτήν την κυψέλη καυσίμων είναι ένα στερεό, μη πορώδες μεταλλικό οξείδιο, συνήθως  $\text{Y}_2\text{O}_3$  - σταθεροποιημένο  $\text{ZrO}_2$ . Η αγωγή πραγματοποιείται από ιόντα οξυγόνου. Συνήθως η άνοδος είναι κεραμομέταλλο  $\text{Co-ZrO}_2$  ή  $\text{Ni-ZrO}_2$ , και η κάθοδος είναι  $\text{LaMnO}_3$  με πρόσμιξη Sr. Λόγω του ότι το σύστημα στερεών οξειδίων χρησιμοποιεί ένα σκληρό κεραμικό υλικό αντί ενός υγρού ηλεκτρολύτη, αυτή η στερεά κατάσταση κεραμική κατασκευή επιτρέπει υψηλές θερμοκρασίες, μεγαλύτερη ευελιξία στην επιλογή καυσίμων και συμβάλλει στη σταθερότητα και την αξιοπιστία.

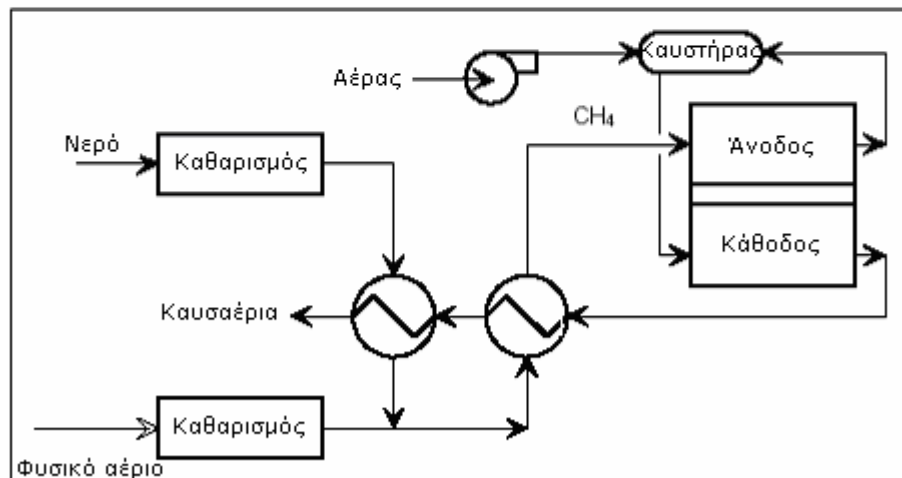
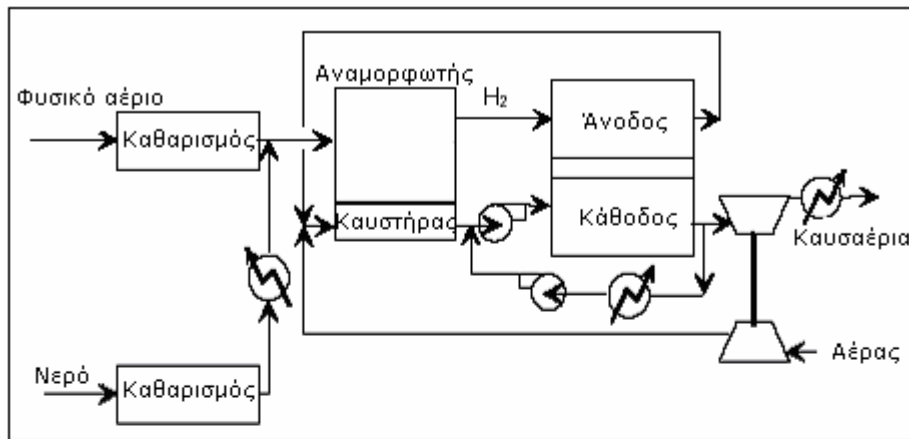
### **Σύνοψη χαρακτηριστικών**

Στις χαμηλής θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμων (PEFC, AFC, PAFC), τα πρωτόνια ή τα υδροξύλια είναι οι σημαντικότεροι φορείς φορτίου στον ηλεκτρολύτη, ενώ στις υψηλής θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμων, MCFC και SOFC, τα ιόντα ανθρακικού άλατος και τα ιόντα οξυγόνου είναι οι αντίστοιχοι φορείς φορτίου. Οι σημαντικές διαφορές των διάφορων κυψελών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Το AFC δεν συμπεριλαμβάνεται στον πίνακα μια και αυτός ο τύπος κυψέλης καταργείται σταδιακά στις ΗΠΑ όπου η μόνη χρήση του ήταν σε διαστημικά οχήματα.

	<b>PEFC</b>	<b>PAFC</b>	<b>MCFC</b>	<b>SOFC</b>
<b>Ηλεκτρολύτης</b>	Μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων	Φωσφορικό οξύ (υγρό)	Λιωμένο ανθρακικό άλας (υγρό)	Κεραμικό
<b>Θερμοκρασία λειτουργίας</b>	80 °C	205 °C	650 °C	800-1000 °C τώρα 600-1000 °C σε 10-15 χρόνια
<b>Φορέας φορτίου</b>	$H^+$	$H^+$	$CO_3^-$	$O^-$
<b>Εξωτερικός αναμορφωτής για <math>CH_4</math></b>	Ναι	Ναι	Όχι	Όχι
<b>Κύρια συστατικά κυψέλης</b>	Άνθρακας	Γραφίτης	Ανοξειδωτο ατσάλι	Κεραμικό
<b>Καταλύτης</b>	Λευκόχρυσος	Λευκόχρυσος	Νικέλιο	Περοβσκίτης
<b>Διαχείριση παραγόμενου νερού</b>	Υπό εξάτμιση	Υπό εξάτμιση	Αέριο προϊόν	Αέριο προϊόν
<b>Διαχείριση παραγόμενης θερμότητας</b>	Αέριο διεργασίας & ανεξάρτητο μέσο ψύξης	Αέριο διεργασίας & ανεξάρτητο μέσο ψύξης	Εσωτερική αναμόρφωση & αέριο διεργασίας	Εσωτερική αναμόρφωση & αέριο διεργασίας

### 2.3.3 Σημαντικές διεργασίες

Αν και ο ηλεκτρολύτης έχει γίνει τα κυρίαρχο μέσο προσδιορισμού μιας κυψέλης καυσίμων, ένας ακόμα σημαντικός τρόπος διαχωρισμού είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του υδρογόνου που λαμβάνει μέρος στην αντίδραση μέσα στην κυψέλη. Το υδρογόνο μπορεί να προκύψει από φυσικό αέριο και ατμό παρουσία ενός καταλύτη σε θερμοκρασίες που ξεκινάνε από τους 760 °C. Η αντίδραση είναι ενδόθερμη. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας των MCFC και SOFC είναι αρκετά υψηλές έτσι ώστε η διαδικασία αναμόρφωσης να μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσα στην κυψέλη, μια διαδικασία καλούμενη ως εσωτερική αναμόρφωση. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει μια σύγκριση των διαδικασιών της εσωτερικής και της εξωτερικής αναμόρφωσης σε κυψέλη καυσίμων MCFC. Η αντίδραση αναμόρφωσης εξαρτάται από τη μείωση του υδρογόνου κατά τη διάρκεια παραγωγής ισχύος από την κυψέλη. Αυτή η εσωτερική αναμόρφωση μπορεί να είναι ευεργετική στην αποδοτικότητα του συστήματος επειδή υπάρχει μια αποτελεσματική μεταφορά της θερμότητας από την εξώθερμη αντίδραση της κυψέλης προς ικανοποίηση της ενδόθερμης αντίδρασης αναμόρφωσης. Ένας καταλύτης αναμόρφωσης απαιτείται δίπλα στον θάλαμο αερίου της ανόδου για την διεξαγωγή της αντίδρασης. Έτσι το κόστος ενός εξωτερικού αναμορφωτή αποβάλλεται και η αποδοτικότητα του συστήματος αυξάνεται, αλλά εις βάρος μιας πιο σύνθετης – και πιο ακριβής – διαμόρφωσης της κυψέλης και μιας μεγαλύτερης ανάγκης για συντήρηση. Αυτό παρέχει στους υπεύθυνους για την ανάπτυξη των κυψελών υψηλής θερμοκρασίας μια επιλογή για εξωτερική ή εσωτερική αναμόρφωση. Η παρούσα εσωτερική αναμόρφωση ενός MCFC είναι περιορίζεται σε λειτουργία με πίεση περιβάλλοντος, ενώ η σύγχρονη μέθοδος εξωτερικής αναμόρφωσης MCFC μπορεί να λειτουργήσει σε πιέσεις μέχρι 3 atm. Ο χαμηλή ταχύτητα της αντίδρασης αναμόρφωσης καθιστά την εσωτερική αναμόρφωση μη πρακτική στις κυψέλες χαμηλότερης θερμοκρασίας. Σε αυτές τις κυψέλες χρησιμοποιείται ένας χωριστός εξωτερικός αναμορφωτής.



**Σύγκριση μεθόδων εξωτερικής & εσωτερικής αναμόρφωσης ενός συστήματος MCFC**

Η πορώδης υφή των ηλεκτροδίων, στην οποία αναφερθήκαμε αρκετές φορές παραπάνω, είναι βασική για την καλή συμπεριφορά των ηλεκτροδίων. Ο λόγος είναι ότι οι πυκνότητες ρεύματος που λαμβάνονται από τα κοινά ηλεκτρόδια είναι συνήθως στην κλίμακα ενός ψηφίου mA/cm<sup>2</sup> ή λιγότερο, εξαιτίας ζητημάτων περιορισμού της ταχύτητας αντίδρασης που προκύπτουν λόγω της διαθέσιμης περιοχής αντίδρασης στα ηλεκτρόδια. Τα πορώδη ηλεκτρόδια, που χρησιμοποιούνται στις κυψέλες καυσίμων, επιτυγχάνουν πολύ υψηλότερες πυκνότητες ρεύματος. Αυτές οι υψηλές πυκνότητες ρεύματος είναι δυνατές επειδή το ηλεκτρόδιο έχει μεγαλύτερη επιφάνεια που χρησιμοποιείται ως περιοχή αντίδρασης, συγκριτικά με τη γεωμετρικά επίπεδη επιφάνεια, που αυξάνει σημαντικά τον αριθμό των περιοχών αντίδρασης.

### 2.3.4 Στοιβες κυψελών

Τα πρόσθετα συστατικά μιας κυψέλης περιγράφονται καλύτερα με τη χρησιμοποίηση μιας χαρακτηριστικής σχηματικής αναπαράστασης κυψελών, (βλέπε παρακάτω σχήμα), που απεικονίζει ένα PAFC. Όπως με τις μπαταρίες, έτσι και οι μεμονωμένες κυψέλες καυσίμων πρέπει να συνδυαστούν για να παράγουν τα επιθυμητά επίπεδα τάσης. Λόγω της διαμόρφωσης μιας κυψέλης καυσίμων επίπεδης πλάκας (βλέπε παρακάτω σχήμα) η διασύνδεση γίνεται με μια διαχωριστική πλάκα με δύο λειτουργίες:

- 1) να παρέχει μια ηλεκτρική σύνδεση σειράς μεταξύ των παρακείμενων κυψελών, συγκεκριμένα για τις κυψέλες καυσίμων επίπεδων πλακών, και

2) να παρέχει ένα εμπόδιο αερίου που χωρίζει τα καύσιμα από το οξειδωτικό των παρακείμενων κυψελών.

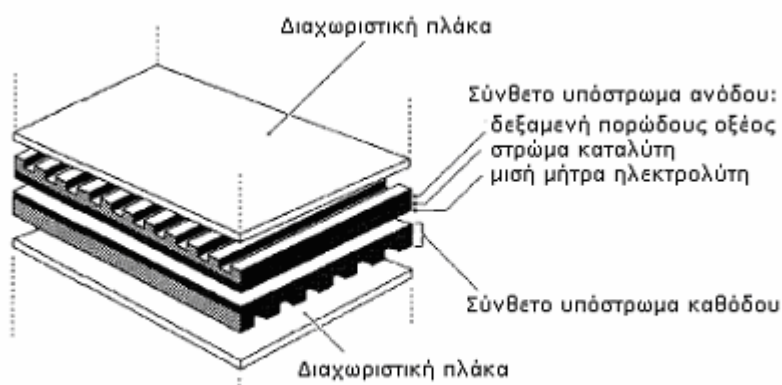
Η διασύνδεση μιας σωληνοειδούς στερεάς κυψέλης καυσίμων οξειδίων (SOFC) είναι μια ειδική περίπτωση και έχει μια ελαφρώς διαφοροποιημένη λειτουργία. Εντούτοις, όλες οι διασυνδέσεις πρέπει να είναι ένας ηλεκτρικοί αγωγοί και αεροστεγείς. Άλλα σημαντικά μέρη της κυψέλης είναι:

1) η δομή για τη διανομή των αντιδρώντων αερίων κατά μήκος της επιφάνειας των ηλεκτροδίων, το οποίο εξυπηρετεί και ως μηχανική υποστήριξη (στο παρακάτω σχήμα η δομή αυτή παρουσιάζεται ως διαδοχικοί ράβδοι)

2) δεξαμενές ηλεκτρολυτών για τις κυψέλες υγρών ηλεκτρολυτών για την αναπλήρωση του ηλεκτρολύτη που χάνεται κατά τη διάρκεια της ζωής της κυψέλης καυσίμων, και

3) συλλέκτες ρεύματος (που δεν παρουσιάζονται) που παρέχουν μια οδό για το ρεύμα μεταξύ των ηλεκτροδίων και του διαχωριστή των κυψελών καυσίμων επίπεδων πλακών.

Στα σχέδια στοιβών κυψελών καυσίμων χρησιμοποιούνται διαφορετικές ρυθμίσεις της ροής αερίων και της ροής ρεύματος.



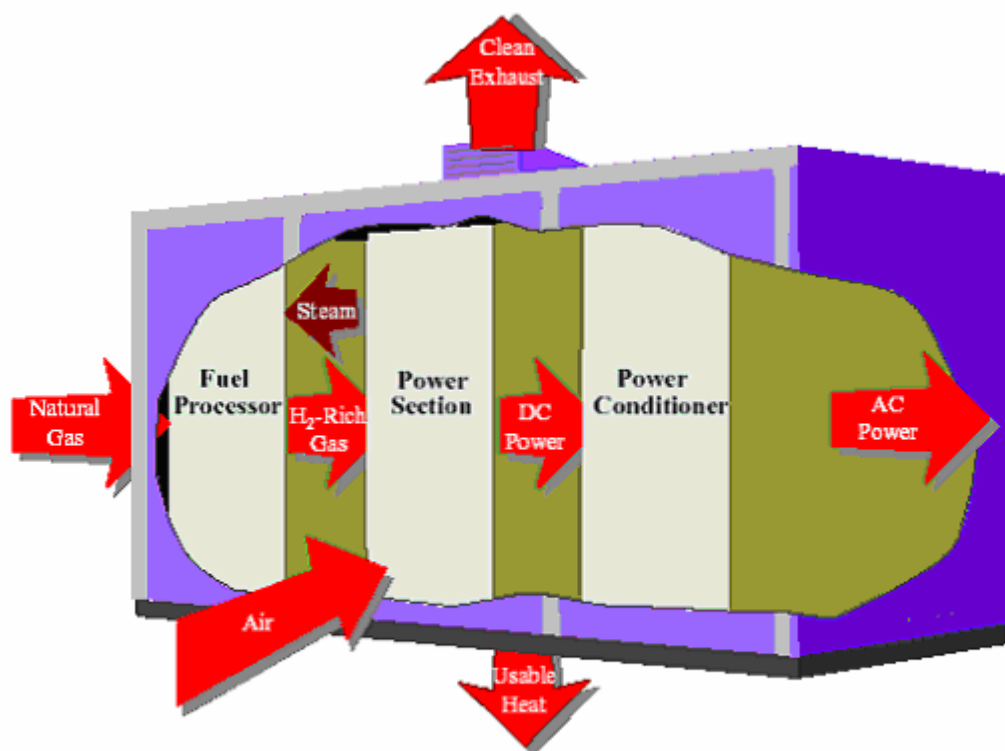
**Εκτεταμένη άποψη μιας επαναλαμβανόμενης μονάδας της βασικής κυψέλης καυσίμων σε μια στοιβα κυψελών καυσίμων**

### 2.3.5 Περιγραφή εγκαταστάσεων κυψελών καυσίμων

Όπως φαίνεται στο σχήμα της §2.1, η κυψέλη καυσίμων συνδυάζει το υδρογόνο που παράγεται από τα καύσιμα και το οξυγόνο του αέρα προς σχηματισμό συνεχούς τάσης (ισχύος), νερού και θερμότητας. Σε περιπτώσεις όπου CO και CH<sub>4</sub> αντιδρούν στην κυψέλη για την παραγωγή υδρογόνου, το CO<sub>2</sub> είναι επίσης ένα προϊόν. Αυτές οι αντιδράσεις πρέπει να πραγματοποιηθούν σε κατάλληλες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας για τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμων. Ένα σύστημα πρέπει να δημιουργηθεί γύρω από τις κυψέλες καυσίμων για να παρέχει σε αυτές τον αέρα και τα καθαρά καύσιμα, για να μετατρέψει την ισχύ σε μια πιο χρησιμοποιήσιμη μορφή όπως η ισχύς εναλλασσόμενου ρεύματος σε ποιότητα όπως αυτή του δικτύου, και να αφαιρέσει τα απεμπλουτισμένα αντιδρώντα και τη θερμότητα, που παράγονται από τις αντιδράσεις στις κυψέλες.

Το παρακάτω σχήμα είναι αναπαράσταση μιας εγκατάστασης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από κυψέλες καυσίμων. Αρχίζοντας με την επεξεργασία

καυσίμων, ένα συμβατικό καύσιμο (φυσικό αέριο, άλλοι αερίωδη υδρογονάνθρακες, μεθανόλη, νάφθα, ή άνθρακας) καθαρίζεται, και κατόπιν μετατρέπεται σε ένα αέριο που περιέχει το υδρογόνο. Η ενεργειακή μετατροπή πραγματοποιείται όταν παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς ρεύματος καθενός εκ των μεμονωμένων κυψελών καυσίμων, που διασυνδέονται σε στοίβες ή σωρούς. Ένας ποικίλος αριθμός κυψελών ή στοιβών μπορεί να αντιστοιχηθεί κάθε φορά με μια ιδιαίτερη εφαρμογή, όσον αφορά την ανάγκη σε ισχύ. Τέλος, με τη ρύθμιση της ισχύος μετατρέπεται η ηλεκτρική ενέργεια από συνεχούς ρεύματος σε σταθεροποιημένου συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος κατάλληλο για χρήση από τους καταναλωτές.

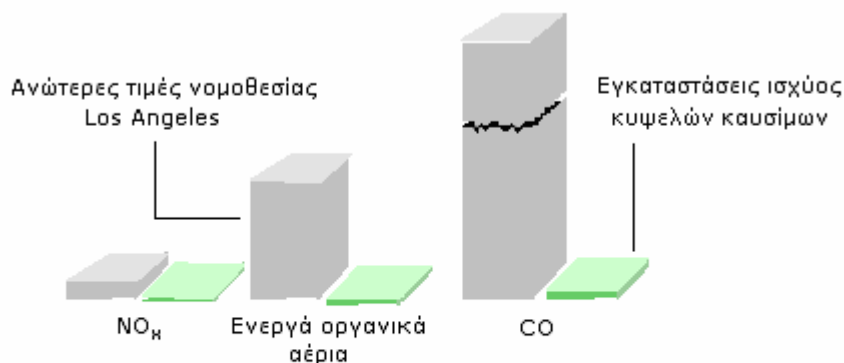


Κύριες διεργασίες μιας εγκατάστασης ισχύος κυψελών καυσίμων

### 2.3.6 Χαρακτηριστικά

Οι κυψέλες καυσίμων έχουν πολλά χαρακτηριστικά που τα καθιστούν προτιμότερα από άλλες συσκευές ενεργειακής μετατροπής. Δύο από αυτά – που έχουν συμβάλει στην κατεύθυνση του ενδιαφέροντος προς την επίγεια εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής – είναι ο συνδυασμός της σχετικά υψηλής αποδοτικότητας και της πολύ χαμηλής περιβαλλοντικής παρείσφρησης (ουσιαστικά καμία αερίωδης ή στερεά εκπομπή). Οι αποδοτικότητες των υπάρχοντων εγκαταστάσεων κυψελών καυσίμων είναι της τάξης του 40 ως 55% βασισμένη στη χαμηλότερη αξία θέρμανσης (LHV – Lower Heating Value) των καυσίμων. Για την αύξηση της αποδοτικότητας έχει προταθεί η υβριδική κυψέλη καυσίμων, η οποία χρησιμοποιεί τη μέθοδο επαναθέρμανσης για στροβίλους αερίου (gas turbines) το οποίο προσφέρει αποδοτικότητα μέχρι 70%, LHV, χρησιμοποιώντας τη δεδομένη απόδοση κυψελών. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει τις χαμηλές εκπομπές των εγκατεστημένων μονάδων PAFC συγκρινόμενες με τις απαιτήσεις που προβλέπονται για το λεκανοπέδιο του Λος Άντζελες (South Coast Air Quality Management District), οι αυστηρότερες των ΗΠΑ. Οι μετρημένες εκπομπές από τη

μονάδα PAFC είναι <1 ppm NO<sub>x</sub>, 4 ppm CO, και <1 ppm των αντιδρώντων οργανικών αερίων (όχι μεθανίου).



**Σχετικές εκπομπές των εγκαταστάσεων ισχύος κυψελών καυσίμων τύπου PAFC συγκρινόμενες με τις αυστηρότατες απαιτήσεις του λεκανοπεδίου του Los Angeles**

Επιπλέον, οι κυψέλες καυσίμων λειτουργούν σε μια σταθερή θερμοκρασία, και η θερμότητα από την ηλεκτροχημική αντίδραση είναι διαθέσιμη για διάφορες εφαρμογές συμπαραγωγής. Επειδή οι κυψέλες καυσίμων λειτουργούν σχεδόν με σταθερή αποδοτικότητα, ανεξαρτήτως μεγέθους, οι μικρές εγκαταστάσεις κυψελών καυσίμων λειτουργούν σχεδόν τόσο αποτελεσματικά όσο και οι μεγάλες. (Η αποδοτικότητα βέβαια των επεξεργαστών των καυσίμων είναι εξαρτώμενη από το μέγεθος, επομένως, οι μικρές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας κυψελών καυσίμων που χρησιμοποιούν τα εξωτερικά αναμορφωμένα καύσιμα υδρογονανθράκων θα είχαν ως αποτέλεσμα μια χαμηλότερη γενική αποδοτικότητα του όλου συστήματος.) Έτσι, η έξοδος ισχύος των εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κυψελών καυσίμων μπορεί να κινηθεί σε ένα ευρύ φάσμα, που κυμαίνεται από βατ ως μεγαβάτ. Οι κυψέλες καυσίμων είναι αθόρυβες και ακόμα κι αν είναι ευέλικτες ως προς τα καύσιμα που μπορούν χρησιμοποιήσουν, είναι ευαίσθητες σε ορισμένους μολυσματικούς παράγοντες καυσίμων (προσμίξεις) που πρέπει να ελαχιστοποιηθούν στο αέριο καυσίμων. Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τον αντίκτυπο των σημαντικότερων συστατικών μέσα στα αέρια καύσιμα στις διάφορες κυψέλες καυσίμων.

Είδος αερίου	PAFC	MCFC	SOFC	PEFC
H <sub>2</sub>	καύσιμο	καύσιμο	καύσιμο	καύσιμο
CO	δηλητήριο (>0,5%)	καύσιμο	καύσιμο	δηλητήριο (>10 ppm)
CH <sub>4</sub>	διαλύτης	διαλύτης	καύσιμο	διαλύτης
CO <sub>2</sub> & H <sub>2</sub> O	διαλύτης	διαλύτης	διαλύτης	διαλύτης
S (H <sub>2</sub> O & COS)	δηλητήριο (>50 ppm)	δηλητήριο (>0,5 ppm)	δηλητήριο (>1,0 ppm)	(δεν υπάρχουν προς το παρόν μελέτες)

**Σύνοψη αντίκτυπου των συστατικών των κυριότερων καυσίμων στα PAFC, MCFC, SOFC, PEFC.**

Δύο είναι τα σημαντικά εμπόδια στη διάδοση της χρήσης των κυψελών καυσίμων:

- 1) το υψηλό αρχικό κόστος και
- 2) η αντοχή των κυψελών στις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας

Αυτές οι δύο πτυχές είναι η σημαντικότερη εστίαση των τεχνολογικών προσπαθειών των κατασκευαστών.

Άλλα χαρακτηριστικά που προσφέρουν οι κυψέλες καυσίμων και οι εγκαταστάσεις κυψελών καυσίμων είναι:

- Άμεση ενεργειακή μετατροπή (καμία καύση).
- Έλλειψη κινούμενων μερών στον ενεργειακό μετατροπέα.
- Αθόρυβα
- Αποδεδειγμένη υψηλή διαθεσιμότητα των μονάδων χαμηλότερης θερμοκρασίας
- Δυνατότητα αναμονής
- Ευελιξία επιλογής καυσίμων
- Αποδεδειγμένη αντοχή και αξιοπιστία των μονάδων χαμηλότερης θερμοκρασίας
- Καλή απόδοση σε λειτουργία υπό φορτίο
- Επιμέρους – συμπληρωματικές – εγκαταστάσεις για την ικανοποίηση του φορτίου και την αύξηση της αξιοπιστίας
- Απομακρυσμένος χειρισμός τους, χωρίς επίβλεψη
- Ευελιξία στο μέγεθος
- Γρήγορη απόκριση στις αλλαγές του φορτίου

Τα γενικά αρνητικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα των κυψελών καυσίμων περιλαμβάνουν:

- Η είσοδος στην αγορά έχει υψηλό κόστος
- Χαμηλή αντοχή και αξιοπιστία των μονάδων υψηλότερης θερμοκρασίας
- Ξένη τεχνολογία για τη βιομηχανία ισχύος
- Έλλειψη υποδομής

## 2.4 Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα

Οι τύποι των κυψελών καυσίμων που εξετάζονται σε αυτό το εγχειρίδιο έχουν σε αρκετά σημεία σημαντικά διαφορετικές αρχές λειτουργίας. Κατά συνέπεια, τα υλικά κατασκευής τους, οι τεχνικές επεξεργασίας, και οι απαιτήσεις των συστημάτων διαφέρουν. Αυτές οι διαφορές οδηγούν σε μεμονωμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που καθορίζουν τη δυνατότητα καθεμιάς κυψέλης να χρησιμοποιείται για διαφορετικές εφαρμογές.

**PEFC:** Το PEFC, όπως το SOFC, παρακάτω, διαθέτει στερεό ηλεκτρολύτη. Κατά συνέπεια, αυτή η κυψέλη παρουσιάζει άριστη αντίσταση στη διάβαση των αερίων μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Σε αντίθεση με το SOFC, η κυψέλη λειτουργεί στη χαμηλή θερμοκρασία των 80 °C. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ικανότητα της κυψέλης να φτάσει στη θερμοκρασία λειτουργίας της γρήγορα, αλλά η θερμότητα που αποβάλλεται δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συμπαραγωγή ή πρόσθετους λόγους ισχύος. Αποτελέσματα δοκιμών έχουν δείξει ότι η κυψέλη μπορεί να λειτουργήσει σε πολύ υψηλές πυκνότητες ρεύματος έναντι των άλλων κυψελών. Εντούτοις, η διαχείριση της θερμότητας και του νερού μπορούν να περιορίσουν τη



πυκνότητα ισχύος στη λειτουργία ενός πραγματικού συστήματος. Η ανοχή του PEFC σε CO είναι σε χαμηλά επίπεδα ppm.

**AFC:** Το AFC ήταν μία από τις πρώτες σύγχρονες κυψέλες καυσίμων που αναπτύχθηκαν, αρχίζοντας το 1960. Η εφαρμογή εκείνη την περίοδο ήταν η παροχή ηλεκτρικής ισχύος στο διαστημικό όχημα Apollo. Οι ενδιαφέρουσες ιδιότητες του AFC περιλαμβάνουν την άριστη απόδοσή του στο υδρογόνο ( $H_2$ ) και το οξυγόνο ( $O_2$ ) έναντι άλλων κυψελών καυσίμων υποψηφίων λόγω της ενεργούς κινητικής συμπεριφοράς των ηλεκτροδίων  $O_2$  του και της ευελιξίας του στην εναλλακτική χρησιμοποίηση από ένα ευρύ φάσμα ηλεκτροκαταλυτών, μια ιδιότητα που παρέχει την ευκολία στην ανάπτυξή του. Οι επίγειες εφαρμογές του AFC άρχισαν να ερευνώνται, κατά τη διάρκεια του καιρού που η ανάπτυξη για διαστημικές εφαρμογές ήταν ήδη υπό εξέλιξη. Οι υπεύθυνοι για την ανάπτυξη αναγνώρισαν ότι θα απαιτούνταν στο ρεύμα καυσίμων καθαρό υδρογόνο, επειδή το  $CO_2$  σε οποιαδήποτε αναμορφωμένα καύσιμα αντιδρά με τον ηλεκτρολύτη KOH προς διαμόρφωση ενός ανθρακικού άλατος, μειώνοντας την ιονική κινητικότητα του ηλεκτρολύτη. Καθαρό  $H_2$  θα μπορούσε να παρασχεθεί στην άνοδο με τη διάβαση ρεύματος καυσίμων πλούσιο σε αναμορφωμένο  $H_2$  από μια μεμβράνη πολύτιμων μετάλλων (παλλάδιο, ασήμι). Το μόριο  $H_2$  είναι σε θέση να περάσει μέσω της μεμβράνης από την απορρόφηση και τη μαζική μεταφορά, στην άνοδο της κυψέλης καυσίμων. Εντούτοις, απαιτείται μια σημαντική διαφοροποίηση στην πίεση κατά μήκος της μεμβράνης και η μεμβράνη είναι μάλλον απαγορευτική στο κόστος. Ακόμη και μικρό ποσό του  $CO_2$  στον περιβαλλοντικό αέρα, πηγή  $O_2$  για την αντίδραση, θα έπρεπε να απομακρυνθεί. Αμερικανικές έρευνες έδειξαν ότι η απομάκρυνση αυτού του μικρού ποσού  $CO_2$  μέσα στον αέρα, μαζί με τον καθαρισμό του υδρογόνου, δεν ήταν οικονομικώς αποδοτικό και ότι η επίγεια εφαρμογή του AFC θα μπορούσε να περιοριστεί σε ειδικές εφαρμογές, όπως, στην καλύτερη περίπτωση, κάποια κλειστά περιβάλλοντα.

**PAFC:** Το  $CO_2$  στο ρεύμα αναμορφωμένου αερίου καυσίμων και τον αέρα δεν αντιδρά με τον ηλεκτρολύτη σε έναν όξινο ηλεκτρολύτη, αλλά είναι διαλύτης. Αυτή η ιδιότητα και η σχετικά χαμηλή θερμοκρασία του PAFC το έκαναν έναν πρωταρχικό, πρώιμο υποψήφιο για επίγεια εφαρμογή. Αν και η απόδοση των κυψελών του είναι κάπως χαμηλότερη από την αλκαλική κυψέλη λόγω του αργού ρυθμού αντίδρασης του οξυγόνου στην κάθοδο, και αν και αυτή η κυψέλη απαιτεί καύσιμα υδρογονανθράκων για να αναμορφωθεί σε ένα πλούσιο σε  $H_2$  αέριο, η αποδοτικότητα των συστημάτων PAFC βελτιώθηκε λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας λειτουργίας του και λόγω της λιγότερο σύνθετης μετατροπής καυσίμων (χωρίς μεμβράνη και συνοδευτική πτώση πίεσης). Η ανάγκη για την απομάκρυνση του  $CO_2$  από τον αέρα εισαγωγής εξαλείφεται επίσης. Η απορριφθείσα θερμότητα από την κυψέλη είναι αρκετά υψηλή σε θερμοκρασία που μπορεί να θερμάνει νερό ή αέρα σε ένα σύστημα που λειτουργεί σε ατμοσφαιρική πίεση. Στα PAFC είναι διαθέσιμη μία ποσότητα ατμού, ένα βασικό σημείο όσον αφορά την επέκταση σε εφαρμογές συμπαραγωγής.

Τα συστήματα PAFC επιτυγχάνουν ηλεκτρική αποδοτικότητα περίπου 37 με 42% (βασισμένη στο LHV του φυσικού αερίου). Αυτό είναι το κάτω άκρο των στόχων αποδοτικότητας για τις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας από κυψέλες καυσίμων. Τα PAFC χρησιμοποιούν καταλύτες πολύτιμων μετάλλων υψηλού κόστους, όπως ο λευκόχρυσος. Τα καύσιμα πρέπει να αναμορφωθούν εξωτερικά της κυψέλης και το CO πρέπει να περιοριστεί, από μια αντίδραση με υδρατμούς, σε ποσοστά μικρότερα του 3 έως 5 % κ.ο. στην κοιλότητα εισόδου της ανόδου της κυψέλης καυσίμων, διαφορετικά θα δηλητηριάσει τον καταλύτη. Αυτοί οι περιορισμοί έχουν προτρέψει την ανάπτυξη των κυψελών εναλλακτικών για υψηλότερης θερμοκρασίας λύσεων, που είναι τα MCFC και SOFC.

**MCFC:** Πολλά από τα μειονεκτήματα των κυψελών χαμηλότερης θερμοκρασίας,

όπως επίσης και υψηλότερης θερμοκρασίας, μπορούν να απαλειφθούν με το υψηλότερης θερμοκρασίας λειτουργίας (περίπου 650 °C) MCFC. Αυτό το επίπεδο θερμοκρασίας οδηγεί σε διάφορα οφέλη:

- η κυψέλη μπορεί να απαρτιστεί από τα συνήθη διαθέσιμα φύλλα μετάλλων που μπορούν να σφραγιστούν για λιγότερο δαπανηρή επεξεργασία
- οι αντιδράσεις κυψελών πραγματοποιούνται με τους καταλύτες νικελίου παρά με τους ακριβούς καταλύτες πολύτιμων μετάλλων
- η αναμόρφωση μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσα στην κυψέλη υπό τον όρο ότι προστίθεται ένας καταλύτης αναμόρφωσης (που έχει ως αποτέλεσμα ένα μεγάλο κέρδος αποδοτικότητας)
- το CO είναι άμεσα χρησιμοποιήσιμο καύσιμα, και
- η απορριφθείσα θερμότητα κυψελών είναι αρκετά υψηλής θερμοκρασίας για να οδηγήσει έναν στρόβιλο αερίου ή/και να παράγει έναν υψηλό ατμό πίεσης για τη χρήση σε έναν στρόβιλο ατμού ή για συμπαραγωγή.

Ένα άλλο πλεονέκτημα του MCFC είναι ότι λειτουργεί αποτελεσματικά με καύσιμα που περιέχουν CO<sub>2</sub>, όπως τα αέρια που προέρχονται από «βιολογικά» καύσιμα. Αυτό το όφελος απορρέει από την αύξηση της απόδοσης της καθόδου – αποτέλεσμα του εμπλουτισμού με CO<sub>2</sub>.

Το MCFC έχει παρ' όλα αυτά μερικά μειονεκτήματα:

- ο ηλεκτρολύτης είναι πολύ διαβρωτικός και κινητός, και
- μια πηγή CO<sub>2</sub> απαιτείται στην κάθοδο (που ανακυκλώνεται συνήθως από την εξάτμιση της ανόδου) για να διαμορφώσει το ιόν ανθρακικού άλατος.

Η ανοχή στο θείο ελέγχεται από τον καταλύτη αναμόρφωσης και είναι χαμηλή (χαρακτηριστικό ίδιο για τους καταλύτες αναμόρφωσης σε όλες τις κυψέλες). Η λειτουργία απαιτεί τη χρήση ανοξειδωτού χάλυβα ως υλικό κυψέλης. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες δημιουργούν επιπλέον προβλήματα όσον αφορά τα υλικά, που αφορούν τη μηχανική σταθερότητα της κυψέλης, που επηρεάζει και τη ζωή της.

**SOFC:** Το SOFC είναι η κυψέλη καυσίμων με την πιο μεγάλη συνεχή περίοδο ανάπτυξης, που αρχίζει προς το τέλος της δεκαετίας του '50 (αρκετά έτη πριν από το AFC). Επειδή ο ηλεκτρολύτης είναι στερεός, η κυψέλη μπορεί να εξαχθεί σε ποικίλες μορφές, όπως σωληνοειδή, επίπεδη ή μονολιθική. Η στερεά κεραμική κατασκευή της κυψέλης απαλείφει επίσης οποιαδήποτε προβλήματα διάβρωσης του υλικού των κυψελών που χαρακτηρίζονται από τα υγρούς ηλεκτρολύτες και έχει το πλεονέκτημα να είναι αδιαπέραστο στη διάβαση των αερίων από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο. Η απουσία υγρού αποβάλλει επίσης το πρόβλημα της μετακίνησης του ηλεκτρολύτη ή της πλημμύρας στα ηλεκτρόδια. Η κινητική συμπεριφορά της κυψέλης είναι γρήγορη και το CO είναι άμεσα χρησιμοποιήσιμο καύσιμο, όπως και στο MCFC. Δεν υπάρχει καμία ανάγκη για παρουσία CO<sub>2</sub> στην κάθοδο όπως με το MCFC. Στη θερμοκρασία που προς το παρόν λειτουργούν τα SOFC (~1000 °C), τα καύσιμα μπορούν να αναμορφωθούν μέσα στην κυψέλη. Η θερμοκρασία ενός SOFC είναι σημαντικά υψηλότερη από αυτή του MCFC. Εντούτοις, ένα τμήμα της απορριφθείσας θερμότητας ενός SOFC απαιτείται για την προθέρμανση του εισερχόμενου αέρα.

Η υψηλή θερμοκρασία του SOFC έχει βέβαια και κάποια μειονεκτήματα. Οι διαστολές λόγω θερμότητας των διαφόρων υλικών του διαφέρουν και η σφράγιση μεταξύ των κυψελών είναι δύσκολη στις εφαρμογές επίπεδων πλακών. Η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας τοποθετεί αυστηρούς περιορισμούς στην επιλογή των υλικών και οδηγεί σε δύσκολες διαδικασίες επεξεργασίας. Το SOFC παρουσιάζει επίσης μια υψηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση στον ηλεκτρολύτη, η οποία οδηγεί σε μια χαμηλότερη απόδοση των κυψελών σε σχέση με το MCFC, της τάξης των 100 mV περίπου. Οι ερευνητές θα επιθυμούσαν την ανάπτυξη κυψελών σε

θερμοκρασία 650 °C περίπου, αλλά η ειδική ηλεκτρική αντίστασή του χρησιμοποιούμενου, προς το παρόν, στερεού υλικού ηλεκτρολυτών θα αυξανόταν.

## **2.5 Εφαρμογές**

Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που συνοψίζονται στο προηγούμενο τμήμα αποτελούν τη βάση για την επιλογή των υποψηφίων για χρησιμοποίηση τύπων κυψελών καυσίμων για τις ανάγκες διαφόρων εφαρμογών. Οι σημαντικότερες εφαρμογές για τις κυψέλες καυσίμων είναι ως σταθερές εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (συμπεριλαμβανομένων των μονάδων συμπαραγωγής), ως κινητήρια δύναμη για οχήματα και ως πηγή ηλεκτρικής ενέργειας για διαστημικά οχήματα ή άλλες εφαρμογές κλειστού περιβάλλοντος.

### **2.5.1 Σταθερή εγκατάσταση ηλεκτρικής ενέργειας**

Ένα από τα χαρακτηριστικά των συστημάτων κυψελών καυσίμων είναι ότι η αποδοτικότητά τους μένει σχεδόν ανεπηρέαστη από το μέγεθος τους. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να αναπτυχθούν μικρές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, με σχετικά υψηλές αποδόσεις, αποφεύγοντας κατά συνέπεια τις υψηλές δαπάνες που συνδέονται με την ανάπτυξη μεγάλων εγκαταστάσεων. Κατά συνέπεια, η αρχική στάσιμη ανάπτυξη εγκαταστάσεων έχει στραφεί σε εγκαταστάσεις ικανότητας κάποιων εκατοντάδων kW έως λίγων MW. Οι μικρότερες εγκαταστάσεις (κάποιες εκατοντάδες kW έως 1 ή 2 MW) μπορούν να εγκατασταθούν κοντά στην κατανάλωση προς διευκόλυνση του χρήστη και είναι κατάλληλες για τη λειτουργία της συμπαραγωγής, δηλαδή να παράγουν ηλεκτρική και θερμική ενέργεια. Οι μεγαλύτερες, διασκορπισμένες εγκαταστάσεις (1 έως 10 MW) είναι πιθανό να χρησιμοποιηθούν για διασκορπισμένη παραγωγή ηλεκτρικής μόνο ενέργειας. Οι εγκαταστάσεις τροφοδοτούνται κυρίως με φυσικό αέριο. Μόλις γίνει η εμπορευματοποίηση αυτών των εγκαταστάσεων και οι μειωθεί το κόστος, οι κυψέλες καυσίμων θα εξεταστούν για εφαρμογή στις μεγάλες εγκαταστάσεις φορτίου βάσης, λόγω της υψηλής αποδοτικότητάς τους. Οι εγκαταστάσεις φορτίου βάσης θα μπορούσαν να τροφοδοτηθούν με καύσιμα από φυσικό αέριο ή άνθρακα. Τα προϊόντα καυσίμων από μια συσκευή παραγωγής τεχνητών αερίων καυσίμων από άνθρακα, μετά από καθαρισμό, είναι συμβατά για χρήση με τις κυψέλες καυσίμων.

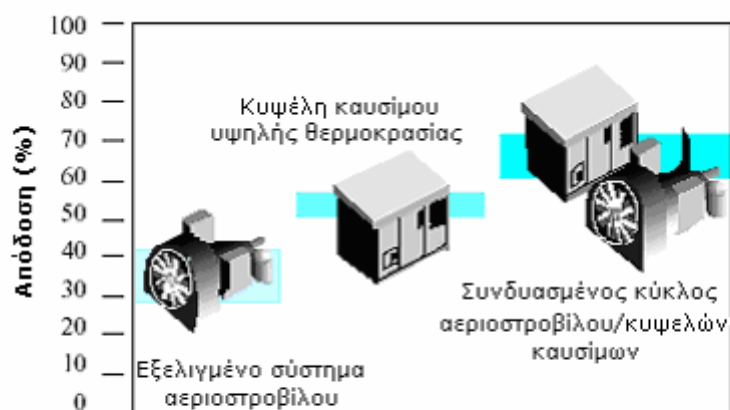
Η λειτουργία των πλήρων, ανεξάρτητων, στάσιμων εγκαταστάσεων κυψελών καυσίμων έχει καταδειχθεί χρησιμοποιώντας τις τεχνολογίες των PEFC, PAFC, MCFC και SOFC. Η πρόσφατη εμπειρία αμερικανών κατασκευαστών πάνω σ' αυτές τις τεχνολογίες κυψελών καυσίμων έχει παράγει σημαντική πληροφόρηση για τα χαρακτηριστικά μεγέθη της λειτουργίας τους.

Παρακάτω παρουσιάζονται δύο εφαρμογές SOFC που λειτουργούν σε περιοχές χρηστών. Και οι δύο μονάδες παρήχθησαν από την εταιρία Siemens Westinghouse Power Corporation, με έδρα στο Ορλάντο, Φλόριδα. Η μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της εταιρίας Westinghouse, που περιέλαβε το πρόγραμμα Westinghouse SOFC, αγοράστηκε πρόσφατα από τη Siemens AG. Η ικανότητα των δύο εγκαταστάσεων είναι αντίστοιχα 25 και 100 kW. Η μονάδα των 25 kW είναι υπό δοκιμή στο πανεπιστήμιο του εθνικού ερευνητικού κέντρου κυψελών καυσίμων (National Fuel Cell Research Center) της Καλιφόρνια (Irvine, California). Η μονάδα λειτουργεί χαρακτηριστικά με συνεχές ρεύμα 173 A και ισχύ 21,7 kW. Η μονάδα έχει συμπληρώσει πάνω από 9500 ώρες λειτουργίας (περιλαμβανομένων 5580 ωρών της προηγηθείσας δοκιμής στο South California Highgrove Edison's Station). Μια ενδιαφέρουσα πτυχή των δύο διαδοχικών εγκαταστάσεων στις

διαφορετικές περιοχές είναι ότι η μονάδα έμεινε ανενεργή και χωρίς κάποια παρακολούθηση για δύο έτη.

Η μονάδα ονομαστική ισχύος 100 kW και συχνότητας λειτουργίας 50 Hz, λειτουργεί προς το παρόν στην περιοχή NUON District Heating στο Westvoort, στις Κάτω Χώρες. Η μονάδα υποστηρίζεται από την EDB/ELSAM, μια κοινοπραξία ολλανδικών και δανικών επιχειρήσεων διανομής ενέργειας. Η εγκατάσταση ολοκληρώθηκε μέχρι τις 6 Φεβρουαρίου 1998. Από τότε, αυτό το σύστημα έχει λειτουργήσει χωρίς εποπτεία, παραδίδοντας 105 kW ισχύ εναλλασσομένου ρεύματος στο δίκτυο για πάνω από 4000 ώρες. Μόνο η ηλεκτρική αποδοτικότητα είναι 45%, ενώ η εγκατάσταση παρέχει επιπλέον θερμική ισχύ 85 kW σε μορφή καυτού νερού σε θερμοκρασία 110 °C στο τοπικό σύστημα θέρμανσης της περιοχής. Οι εγκαταστάσεις, που αποτελούνται από τρία κύρια μέρη-συστήματα, έχουν διαστάσεις 8,42μ×2,75μ×3,58μ (μήκος×πλάτος×ύψος).

Το σχέδιο εμπορευματοποίησης της Siemens Westinghouse SOFC στρέφεται σε μια αρχική προσφορά υβριδικών εγκαταστάσεων κυψελών καυσίμων και στροβίλων αερίου. Το όλο σύστημα των κυψελών καυσίμων αντικαθιστά την αίθουσα καύσης της μηχανής στροβίλου αερίων. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει το όφελος πίσω από αυτήν την συνδυασμένη προσέγγιση εγκατάστασης. Ως αποτέλεσμα της υβριδικής προσέγγισης, η πρώτη εμπορική μονάδα 1 MW αναμένεται να προσεγγίσει αποδοτικότητα LHV 60%, κατά τη λειτουργία με φυσικό αέριο.



#### Συνδυασμός κυψελών καυσίμων SOFC και ενός αεριοστροβίλου για την αύξηση της απόδοσης

Μια ενδεχόμενη αγορά για τις κυψέλες καυσίμων είναι οι μεγάλες (100 έως 300 MW), σταθερές εγκαταστάσεις που θα χρησιμοποιούνται για την κάλυψη του φορτίου βάσης, που λειτουργούν είτε με ανθρακαέριο είτε με φυσικό αέριο. Μια άλλη σχετική, πρώτη ευκαιρία μπορεί να είναι το να ξανατεθούν σε λειτουργία υπάρχουσες, παλαιότερες εγκαταστάσεις με τις κυψέλες καυσίμων υψηλής θερμοκρασίας. Τα MCFC και SOFC συνδεδεμένα με συσκευές παραγωγής ανθρακαερίων έχουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά για να ανταγωνιστούν την αγορά κάλυψης των μεγάλων σε κλίμακα φορτίων βάσης. Η απορριφθείσα θερμότητα από το σύστημα κυψελών καυσίμων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παράγει τον ατμό για τους υπάρχοντες στροβίλους των εγκαταστάσεων. Μελέτες που έχουν διεξαχθεί παρουσιάζουν τις δυνατότητες χρήσης των κυψελών καυσίμων υψηλής θερμοκρασίας για εγκαταστάσεις αυτού του μεγέθους. Αυτές οι εγκαταστάσεις αναμένεται να επιτύχουν αποδοτικότητα από 50 έως 60% HHV. Εντούτοις, η αγορά για τις μεγάλες στάσιμες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας θα είναι δύσκολη λόγω της σύζευξης της συσκευής αεριοποίησης άνθρακα με τις κυψέλες καυσίμων. Οι αεριοποιητές άνθρακα παράγουν ένα προϊόν αερίου

καυσίμων που απαιτεί καθαρισμό με τις αυστηρές προδιαγραφές του ηλεκτροχημικού περιβάλλοντος των κυψελών καυσίμων, που αποτελεί μια δαπανηρή διαδικασία. Η τάση των περιβαλλοντικών κανονισμών ήταν για ακόμη πιο αυστηρό καθαρισμό. Εάν αυτή η τάση συνεχιστεί, άλλες τεχνολογίες θα υποστούν το συμπληρωματικό κόστος του καθαρισμού, ενώ η απόδοση των συστημάτων θα υποβιβαστεί. Αυτό θα βελτιώσει την ανταγωνιστική θέση των εγκαταστάσεων που βασίζονται στην προσέγγιση και χρήση των κυψελών καυσίμων. Τα συστήματα κυψελών καυσίμων θα εκπέμπουν λιγότερο από να τα επιθυμητά όρια εκπομπών. Αμερικανοί υπεύθυνοι για την ανάπτυξη έχουν αρχίσει την έρευνα για τα αποτελέσματα της χρήσης του ανθρακαερίου στα MCFC και SOFC. Μια στοίβα MCFC ERC (Energy Research Corporation) 20 kW εξετάστηκε για συνολικά 4000 ώρες, των οποίων οι 3900 ώρες πραγματοποιήθηκαν στο Plaquemine, Los Angeles, με ανθρακαέριο καθώς επίσης και αέριο του δικτύου παροχής. Η δοκιμή συμπεριέλαβε 1500 ώρες λειτουργίας χρησιμοποιώντας 9142 kJ/m<sup>3</sup> ορυκτού αερίου syngas από ένα ρεύμα ολίσθησης 2180 τόνων/ημέρα ενός αεριοποιητή Destec entrained-bed. Το σύστημα επεξεργασίας καυσίμων ενσωμάτωσε καθαρισμό κρύο αερίου για τη μαζική αφαίρεση του H<sub>2</sub>S και άλλων μολυσματικών παραγόντων επιτρέποντας στη στοίβα MCFC των 21 kW να καταδείξει ότι η τεχνολογία ERC MCFC μπορεί να λειτουργήσει είτε με φυσικό αέριο είτε με ανθρακαέριο.

### 2.5.2 Κινητήρια ισχύ οχημάτων

Από το τέλος της δεκαετίας του '80, έχει υπάρξει μια ισχυρή ώθηση να αναπτυχθούν οι κυψέλες καυσίμων για τη χρήση στην προώθηση οχημάτων, που απαιτούν είτε μικρές είτε μεγάλες ροπές. Ένας σημαντικός λόγος για αυτήν την ανάπτυξη είναι η ανάγκη για καθαρά, αποδοτικά αυτοκίνητα, φορτηγά και λεωφορεία που να μπορούν να λειτουργήσουν με συμβατικά καύσιμα (βενζίνη, diesel), καθώς επίσης και με ανανεώσιμα και εναλλακτικά καύσιμα (υδρογόνο, μεθανόλη, αιθανόλη, φυσικό αέριο, και άλλους υδρογονάνθρακες). Με το υδρογόνο ως καύσιμο, τέτοια οχήματα θα είχαν μηδενικές εκπομπές ρύπων. Με τα καύσιμα εκτός του υδρογόνου, που μεταφέρονται από το όχημα, τα συστήματα κυψελών καυσίμων θα χρησιμοποιούσαν έναν κατάλληλο επεξεργαστή καυσίμων για να μετατρέψουν τα καύσιμα σε υδρογόνο, δημιουργώντας οχήματα με πολύ χαμηλές εκπομπές και υψηλές αποδοτικότητες. Περαιτέρω, τέτοια οχήματα προσφέρουν τα πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής κίνησης και της χαμηλής συντήρησης, λόγω των λίγων κρίσιμων κινούμενων μερών. Αυτή η ανάπτυξη υποστηρίζεται από τις διάφορες κυβερνήσεις στη Βόρεια Αμερική, την Ευρώπη, και την Ιαπωνία, καθώς επίσης και από σημαντικούς αυτοκινητικούς κατασκευαστές παγκοσμίως. Από τον Μάιο του 1998, αρκετά αυτοκίνητα, φορτηγά και λεωφορεία που χρησιμοποιούν την τεχνολογία των κυψελών καυσίμων, έχουν παρουσιαστεί, τα οποία λειτουργούν με υδρογόνο και μεθανόλη.

Στις αρχές της δεκαετίας του '70, ο K. Kordesch τροποποίησε ένα τετραθέσιο δίπορτο σεντάν Austin A-40 του 1961 σε υβριδικό αυτοκίνητο κυψελών καυσίμων και μπαταρίας που χρησιμοποιεί ως καύσιμα τον αέρα και το υδρογόνο. Αυτό το όχημα χρησιμοποιούσε ένα AFC 6 kW σε συνδυασμό με όξινες μπαταρίες μολύβδου, και λειτούργησε με υδρογόνο που μεταφερόταν σε κυλίνδρους συμπιεσμένου αερίου που είχαν τοποθετηθεί στη στέγη. Το αυτοκίνητο χρησιμοποιήθηκε σε δημόσιους δρόμους για τρία έτη και περίπου 21.000 χλμ.

Το 1994 και το 1995, η H-Power (Belleville, New Jersey) διεύθυνε μια ομάδα που κατασκεύασε τρία υβριδικά λεωφορεία που χρησιμοποιούσαν PAFC και μπαταρίες και είχαν μήκος 9 μέτρα και χωρητικότητα 25 καθισμάτων (με χώρο για δύο αναπηρικά καροτσάκια). Τα λεωφορεία αυτά χρησιμοποιούσαν μία κυψέλη καυσίμων των 50 kW και μια μπαταρία νικελίου καδμίου 100 kW, 180 Ah

(αμπερώρια).

Τελευταία, η σημαντικότερη δραστηριότητα στην ανάπτυξη κυψελών καυσίμων μεταφορών έχει εστιάσει στην κυψέλη καυσίμων πολυμερών ηλεκτρολυτών (PEFC). Το 1993, τα Ballard Power Systems (στο Burnaby, στη βρετανική Κολούμπια του Καναδά) παρουσίασαν ένα λεωφορείο μήκους 10 μ με ένα σύστημα κυψελών καυσίμων 120 kW, το οποίο διαδέχθηκε στη συνέχεια ένα λεωφορείο 12 μέτρων των 200 kW, το 1995. Αυτά τα λεωφορεία δεν χρησιμοποιούν μπαταρίες. Λειτουργούν με καύσιμο συμπιεσμένο υδρογόνο, που προφανώς μεταφέρεται από τα ίδια τα λεωφορεία. Το 1997, τα Ballard παρείχαν μονάδες PEFC των 205 kW (275 HP) για έναν μικρό στόλο υδρογόνο-τροφοδοτούμενων λεωφορείων για παρουσιάσεις στο Σικάγο, το Ιλλινόις, και το Βανκούβερ, της βρετανικής Κολούμπια. Λειτουργώντας σε συνεργασία με τα Ballard, τη Daimler-Benz κατασκεύασε μια σειρά οχημάτων που χρησιμοποιούσαν τα PEFC, και τα οποία κυμαίνονταν από επιβατικά αυτοκίνητα ως λεωφορεία. Τα πρώτα τέτοια οχήματα τροφοδοτήθηκαν με καύσιμο το υδρογόνο. Ένα αυτοκίνητο Α' κατηγορίας που χρησιμοποιούσε μεθανόλη για την τροφοδοσία του PEFC παρουσιάστηκε από την Daimler-Benz το 1997, και έχει αυτοδυναμία 640 χλμ. Ο στόχος, μετά απ' όλα αυτά, είναι να προσφερθεί ένα εμπορικό όχημα μέχρι το 2004. Η αυτοκινητοβιομηχανία της Toyota κατασκεύασε ένα υβριδικό επιβατικό αυτοκίνητο κυψελών καυσίμων, με τη παρουσία μπαταριών, που τροφοδοτούταν από υδρογόνο (χρήση υδριδίου μετάλλου για την αποθήκευση του υδρογόνου), το 1996, και επακολούθησε το 1997 ένα με τροφοδοσία μεθανόλης, που στηρίχτηκε στην ίδια πλατφόρμα, ονόματι RAV4.

Άλλοι σημαντικοί αυτοκινητικοί κατασκευαστές, συμπεριλαμβανομένων των General Motors, Volkswagen, Volvo, Honda, Chrysler, Nissan και Ford, έχουν επίσης αναγγείλει σχέδια για την κατασκευή πρωτοτύπων οχημάτων κυψελών καυσίμων, πολυμερών ηλεκτρολυτών, που θα λειτουργούν με υδρογόνο, μεθανόλη, ή βενζίνη. Η IFC και η Plug Power στις ΗΠΑ, και τα Ballard Power Systems στον Καναδά, συμμετέχουν σε χωριστά προγράμματα για την κατασκευή συστημάτων κυψελών καυσίμων ισχύος 50 έως 100 kW ως την κινητήρια δύναμη των οχημάτων. Και άλλοι κατασκευαστές κυψελών καυσίμων εμπλέκονται σε παρόμοια προγράμματα οχημάτων. Μερικοί αναπτύσσουν οχήματα ειδικών χρήσεων όπως αυτοκίνητα για το γκολφ, κλπ.

### **2.5.3 Ισχύς στο διάστημα και σε άλλα κλειστά περιβάλλοντα**

Η εφαρμογή των κυψελών καυσίμων στο διαστημικό πρόγραμμα (1 kW PEFC στο πρόγραμμα Gemini και 1,5 kW AFC στο πρόγραμμα Apollo) παρουσιάστηκε στη δεκαετία του '60. Πιο πρόσφατα, τρεις μονάδες 12 kW AFC έχουν χρησιμοποιηθεί για τουλάχιστον 87 αποστολές με χρόνο πτήσης 65.000 ωρών στο Space Shuttle Orbiter. Σε αυτές τις διαστημικές εφαρμογές, οι κυψέλες καυσίμων χρησιμοποιούν καθαρά αντιδρώντα αέρια. Η IFC επίσης έχει παράγει μια μονάδα H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 30 kW για το όχημα του ναυτικού των ΗΠΑ Lockheed Deep Quest το οποίο λειτουργεί σε βάθος 1500 μέτρων. Τα Ballard Power Systems έχουν παραγάγει μια μονάδα κυψελών καυσίμων PEFC 80 kW, για υποβρύχια χρήση (που τροφοδοτείται με μεθανόλη) και για φορητό σύστημα ισχύος.

### **2.5.4 Παράγωγες εφαρμογές**

Εξαιτίας της μορφολογίας του συστήματος των κυψελών καυσίμων, είναι ελκυστικές για χρήση σε μικρές φορητές μονάδες, που κυμαίνονται σε μέγεθος από 5 W (ή λιγότερο) έως 100 W. Παραδείγματα των χρήσεων αυτών των μονάδων περιλαμβάνουν μία κυψέλη καυσίμων Ballard που καταδεικνύει την 20-ωρη λειτουργία μιας φορητής μονάδας ισχύος και στρατιωτικό εξοπλισμό πλάτης της IFC. Επίσης έχει υπάρξει μεταφορά τεχνολογίας από τα διάφορα τμήματα των

συστημάτων κυψελών καυσίμων. Το καλύτερο παράδειγμα είναι ένα κοινή τολμηρή προσπάθεια των IFC και Praxair Inc. να αναπτύξουν μια μονάδα που μετατρέπει το φυσικό αέριο σε 99,999% καθαρό υδρογόνο βασισμένο στη χρησιμοποίηση της τεχνολογίας αναμόρφωσης των κυψελών καυσίμων και μιας διαδικασίας προσρόφησης, που εκμεταλλεύεται την ασκούμενη πίεση.

## 2.6 Κυψέλες καυσίμων στερεών οξειδίων (SOFC)

Οι κυψέλες καυσίμων στερεών οξειδίων\* (SOFC) έχουν αναγνωρισθεί ως βιώσιμη τεχνολογία κυψελών καυσίμων υψηλής θερμοκρασίας. Δεν υπάρχει κάποιος υγρός ηλεκτρολύτης με τα συνακόλουθα προβλήματα διάβρωσης των υλικών που απαρτίζουν το όλο σύστημα των κυψελών καυσίμων και τα προβλήματα γενικότερης διαχείρισης των ηλεκτρολυτών. Η λειτουργούσα θερμοκρασία, που είναι άνω των 600 °C, επιτρέπει την εσωτερική αναμόρφωση, προωθεί ταχεία κινητικά χαρακτηριστικά για τα ιόντα με μη πολύτιμα υλικά και παράγει υψηλής ποιότητας θερμότητα υποπροϊόντων για τη μέθοδο της συμπαραγωγής. Η υψηλή θερμοκρασία του SOFC, εντούτοις, τοποθετεί αυστηρές προδιαγραφές για τα υλικά του. Η ανάπτυξη κατάλληλων, χαμηλού κόστους, υλικών και η επίτευξη χαμηλού κόστους κατασκευής των διαφόρων χρησιμοποιούμενων κεραμικών δομών είναι προς το παρόν οι βασικές τεχνικές προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα SOFC.

Ο στερεάς κατάστασης χαρακτήρας όλων των συστατικών ενός SOFC σημαίνει ότι, σε γενικές γραμμές, δεν υπάρχει κανένας περιορισμός στην μορφή – σχήμα – των κυψελών. Αντίθετα, είναι δυνατό να διαμορφωθεί η κυψέλη σύμφωνα με κριτήρια όπως τον πρωτοποριακό σχεδιασμό – από οποιαδήποτε άποψη – ή τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Οι κυψέλες αναπτύσσονται με δύο διαφορετικές μορφές, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Μία από αυτές τις προσεγγίσεις, η σωληνοειδής κυψέλη, έχει αναπτυχθεί στην εταιρία Siemens Westinghouse Corporation και τον προκάτοχό της από το τέλος της δεκαετίας του '50. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, η Siemens Westinghouse ανέπτυξε τη σωληνοειδή μορφή όπως παρουσιάζεται τώρα εγκατεστημένη σε τοποθεσίες χρηστών σε μια ολοκληρωμένη μονάδα παραγωγής ενέργειας από κυψέλες καυσίμων ονομαστικής ισχύος 100 kW (εναλλασσόμενο ρεύμα). Η μορφή των επίπεδων πλακών δεν έχει αναπτυχθεί ακόμα σε ικανοποιητικό βαθμό. Οι επιχειρήσεις που ακολουθούν αυτές τις μεθόδους στις ΗΠΑ είναι οι AlliedSignal, SOFCo και άλλες. Επιπλέον, τουλάχιστον επτά επιχειρήσεις στην Ιαπωνία, οκτώ στην Ευρώπη, και μια στην Αυστραλία αναπτύσσουν SOFC.

\* Ένα ευρύτερο, γενικότερο όνομα για τις κυψέλες καυσίμων που λειτουργούν στις θερμοκρασίες που περιγράφονται σε αυτό το τμήμα θα ήταν "κεραμικές" κυψέλες καυσίμων. Ο ηλεκτρολύτης αυτών των κυψελών γίνεται κυρίως από στερεό κεραμικό υλικό για να επιζήσει στο υψηλής θερμοκρασίας περιβάλλον που το περιβάλλει. Ο ηλεκτρολύτης των υπάρχοντων SOFC είναι αγωγή ιόντων οξυγόνου. Οι κεραμικές κυψέλες θα μπορούσαν επίσης να είναι χρησιμοποιηθούν για την αγωγή πρωτονίων.



Σχέδια κυψελών καυσίμων SOFC στην κάθοδο

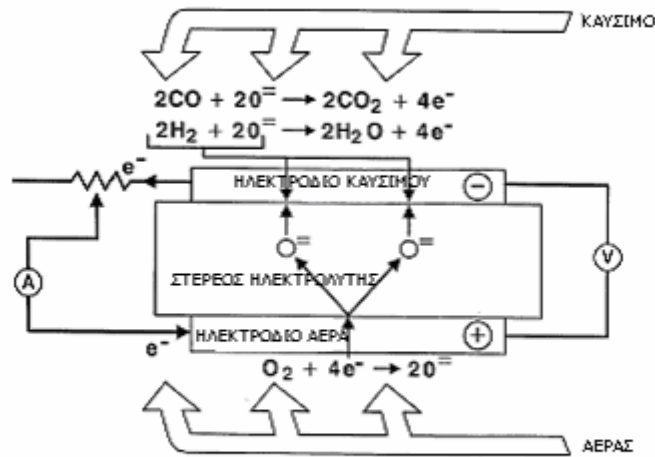
Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στα SOFC χρησιμοποιούν  $H_2$  και  $O_2$  και είναι βασισμένες στις παρακάτω εξισώσεις:



Και η συνολική αντίδραση είναι η παρακάτω:



Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις παρουσιάζονται παραστατικά στο επόμενο σχήμα:



Αρχή λειτουργίας στην κυψέλη καυσίμων SOFC

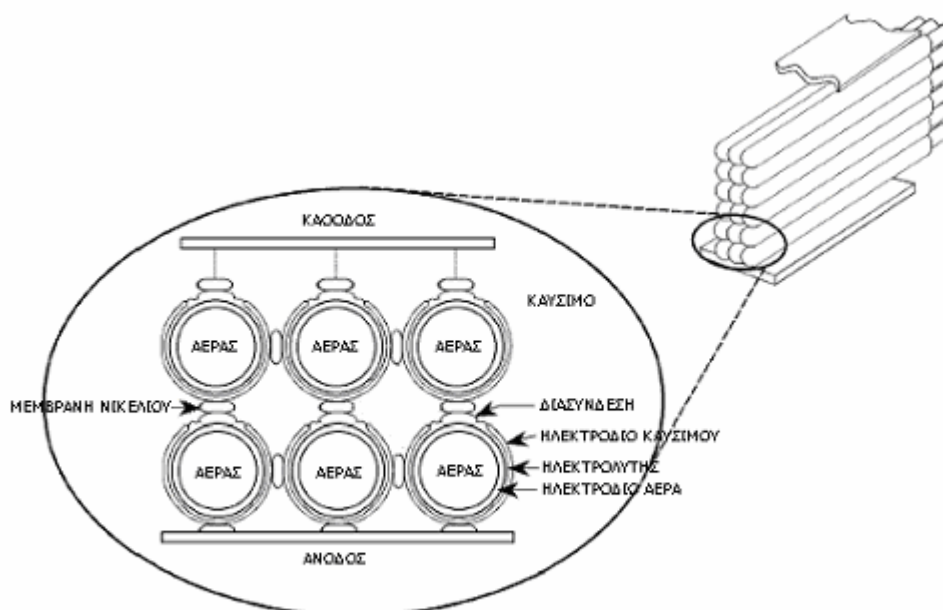
Το επίπεδο της τάσης που μπορεί να παραχθεί από τις αντιδράσεις αυτές μπορεί να καθοριστεί βάσει της εξίσωσης Nernst, την αντίστοιχη για την αντίδραση (2.3):

$$E = E^o + \frac{RT}{2F} \ln \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}} \quad (2.4)$$



Η εξίσωση του Nernst παρέχει μια σχέση ανάμεσα στο ιδανικό κανονικό<sup>1</sup> δυναμικό<sup>2</sup> ( $E^{\circ}$ ) για την αντίδραση της κυψέλης και το ιδανικό δυναμικό σε ισορροπία ( $E$ ) σε διαφορετικές θερμοκρασίες και μερικές πιέσεις των αντιδρώντων και των προϊόντων. Εάν το ιδανικό δυναμικό είναι γνωστό σε κανονικές συνθήκες, η ιδανική τάση μπορεί να καθοριστεί σε άλλες θερμοκρασίες και πιέσεις μέσα από τη χρήση αυτών των εξισώσεων. Σύμφωνα με την εξίσωση του Nernst, το ιδανικό δυναμικό της κυψέλης σε γνωστή θερμοκρασία μπορεί να αυξηθεί με τη λειτουργία της σε υψηλότερες πιέσεις αντιδρώντων, και η μεγαλύτερη αποδοτικότητα των κυψελών καυσίμων έχει παρατηρηθεί σε υψηλότερες πιέσεις.

Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και οι υδρογονάνθρακες, όπως το μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ), μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα στα SOFC. Είναι εφικτό η αλληλεπίδραση των υδρατμών με το CO ( $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$ ) και η αναμόρφωση ατμών του  $\text{CH}_4$  ( $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{CO}$ ) να πραγματοποιηθούν σε περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας των SOFC για να παράγουν  $\text{H}_2$  που οξειδώνεται εύκολα στην άνοδο. Η άμεση οξείδωση του CO στις κυψέλες καυσίμων είναι επίσης εύκολα πραγματοποιήσιμη. Φαίνεται ότι η αναμόρφωση του  $\text{CH}_4$  στο υδρογόνο υπερσχύει στα υπάρχοντα SOFC. Σχέδια κυψελών καυσίμων SOFC για την άμεση οξείδωση του  $\text{CH}_4$  δεν έχουν διερευνηθεί λεπτομερώς σε SOFC, στο παρελθόν, ούτε πρόσφατα (δεν έχει βρεθεί αξιόλογη εργασία).



### Συνδέσεις κυψελών ανάμεσα σε σωληνοειδείς κυψέλες καυσίμων SOFC

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται ο τρόπος διασύνδεσης πολλών κυψελών καυσίμων SOFC σωληνοειδούς μορφής, προς σχηματισμό μίας στοίβας για την επίτευξη του επιθυμητού επιπέδου τάσης.

1. Κανονικές συνθήκες θεωρούνται η πίεση 1 Atm και η θερμοκρασία 25 °C.
2. Το κανονικό δυναμικό του Nernst ( $E^{\circ}$ ) είναι η ιδανική τάση κυψέλης σε κανονικές συνθήκες. Δεν περιλαμβάνει απώλειες που προκύπτουν κατά τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμων. Έτσι, μπορεί να θεωρηθεί σαν τάση ανοιχτοκυκλώματος.

## 2.7 Μοντελοποίηση μιας στοιβας κυψελών καυσίμων τύπου SOFC

Ένα σύστημα παραγωγής ισχύος από κυψέλες καυσίμων ουσιαστικά περιλαμβάνει 3 μέρη:

- Επεξεργαστής καυσίμων, που μετατρέπει καύσιμα όπως το φυσικό αέριο σε υδρογόνο και υποπροϊόντα
- Τμήμα ισχύος, που αποτελείται από τις κυψέλες καυσίμων και παράγει το ηλεκτρικό ρεύμα
- Ρυθμιστής ισχύος, που μετατρέπει την dc ισχύ σε ac και περιλαμβάνει έλεγχο ρεύματος, τάσης και συχνότητας

### 2.7.1 Επεξήγηση στόχων μοντέλου προσομοίωσης και θεωρήσεις

Η ανάλυσή μας θα επικεντρωθεί στη μοντελοποίηση των δύο τελευταίων μερών αφού θα θεωρήσουμε ότι έχουμε στη διάθεση μας απ' ευθείας το υδρογόνο.

Για τη δημιουργία του μοντέλου προσομοίωσης μιας στοιβας κυψελών καυσίμων χρησιμοποιήθηκε μία στοιβα SOFC η οποία διαθέτει τα χαρακτηριστικά μεγέθη ενός πραγματικού SOFC αλλά δεν περιγράφει τη συμπεριφορά μιας υπάρχουσας, σε χρήση ή υπό κατασκευή, εφαρμογής SOFC.

Οι μεταβατικές καταστάσεις του μοντέλου εκφράζονται με τη βοήθεια συναρτήσεων Laplace. Γενικά το μοντέλο εξετάζεται υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Αυτό σημαίνει ότι δεν επιχειρείται να αποδοθεί η συμπεριφορά ενός SOFC κατά την εκκίνηση και τον τερματισμό της λειτουργίας του, ή μακριά από τις ονομαστικές τιμές λειτουργίας του.

Ως έξοδο του μοντέλου θεωρούμε την ενεργό και άεργο ισχύ. Ως είσοδο, θεωρούμε τη ζήτηση ενεργού ισχύος από το φορτίο που καλείται να καλύψει. Λόγω της φύσης της εφαρμογής (παραγωγή DC ρεύματος) η άεργος ισχύ που παράγεται είναι μηδενική και γι' αυτόν το λόγο θεωρούμε ότι η ζήτηση άεργου ισχύος είναι μηδενική.

Για τη συμπεριφορά του μοντέλου σε αλλαγές της ζήτησης ενεργού ισχύος θεωρούμε ότι πριν πραγματοποιηθεί κάτι τέτοιο, το μοντέλο έρχεται σε ισορροπία – ουσιαστικά βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση. Οι αρχικές συνθήκες λοιπόν του μοντέλου τίθενται στις τιμές που αντιστοιχούν στην ενεργό ισχύ από την οποία λαμβάνει χώρα μια μεταβολή.

Γενικότερες θεωρήσεις έχουν γίνει, που αφορούν τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί ένα SOFC. Αναλυτικά:

- Τα αέρια είναι ιδανικά
- Η στοιβα τροφοδοτείται αποκλειστικά με υδρογόνο και αέρα (οξυγόνο, άζωτο)
- Τα κανάλια που μεταφέρουν τα αέρια κατά μήκος των ηλεκτροδίων έχουν σταθερό όγκο, αλλά έχουν μικρό μήκος, με συνέπεια να μπορεί να υποτεθεί ότι η πίεση στο εσωτερικό τους έχει μία ενιαία τιμή
- Η εξάτμιση κάθε καναλιού απαρτίζεται από ένα στόμιο. Η αναλογία των πιέσεων ανάμεσα στο εσωτερικό και το εξωτερικό του καναλιού είναι αρκετά μεγάλη για να θεωρηθεί ότι στο στόμιο υπάρχει διακόπτης στραγγαλισμού (choke)
- Η θερμοκρασία είναι σταθερή κατά τη διάρκεια όλου του χρόνου λειτουργίας

- Η μόνη πηγή απωλειών είναι οι ωμικές, καθώς οι συνθήκες λειτουργίας του συστήματος έχουν θεωρηθεί έτσι ώστε οι τιμές του ρεύματος να βρίσκονται μακριά από τα άνω και κάτω όρια τους (πραγματοποιείται έλεγχος για να διασφαλιστεί αυτό)
- Εφαρμόζεται η εξίσωση του Nernst

### 2.7.2 Μοντελοποίηση

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, ένα στόμιο που μπορεί να θεωρηθεί ότι διαθέτει choke, όταν τροφοδοτείται με μία μίξη αερίων με μέσο όρο μοριακής μάζας  $M$  (kg/mol) και παρόμοιες ειδικές αναλογίες σε θερμότητα, σε μία σταθερή θερμοκρασία, ακολουθεί την επόμενη χαρακτηριστική σχέση:

$$\frac{W}{P_u} = K\sqrt{M} \quad (2.5)$$

όπου  $W$  είναι η ροή της μάζας (kg/s),  $K$  είναι η σταθερά της βαλβίδας, που εξαρτάται κυρίως από την περιοχή του στομίου ( $\sqrt{\text{kmol} \cdot \text{kg}} / (\text{atm} \cdot \text{s})$ ) και  $P_u$  είναι η πίεση στο ρεύμα αερίων μέσα στο κανάλι (atm).

Για την ειδική περίπτωση της ανόδου μπορεί να εισαχθεί η έννοια της χρησιμοποίησης καυσίμου  $U_f$  ως ο λόγος της ροής καυσίμου που αντιδρά προς τη ροή καυσίμου που εισάγεται στη στοίβα. Το  $U_f$  είναι επίσης ένας τρόπος να εκφραστεί το μοριακό κλάσμα του νερού στην εξάτμιση. Σύμφωνα με αυτόν τον ορισμό η σχέση (2.5) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\frac{W_{an}}{P_{an}} = K_{an} \sqrt{(1 - U_f)M_{H_2} + U_f M_{H_2O}} \quad (2.6)$$

όπου  $W_{an}$  είναι η ροή της μάζας στη βαλβίδα της ανόδου (kg/s),  $K_{an}$  είναι η σταθερά της βαλβίδας της ανόδου ( $\sqrt{\text{kmol} \cdot \text{kg}} / (\text{atm} \cdot \text{s})$ ),  $M_{H_2}$ ,  $M_{H_2O}$  είναι οι μοριακές μάζες του υδρογόνου και του νερού, αντίστοιχα (kg/kmol), και  $P_{an}$  η πίεση μέσα στο κανάλι της ανόδου (atm).

Εάν θεωρηθεί ότι η μοριακή ροή οποιουδήποτε αερίου δια μέσω της βαλβίδας είναι ανάλογη της μερικής πιέσεώς του μέσα στο κανάλι, τότε σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$\frac{q_{H_2}}{P_{H_2}} = \frac{K_{an}}{\sqrt{M_{H_2}}} = K_{H_2} \quad (2.7)$$

$$\frac{q_{H_2O}}{P_{H_2O}} = \frac{K_{an}}{\sqrt{M_{H_2O}}} = K_{H_2O} \quad (2.8)$$

όπου  $q_{H_2}$ ,  $q_{H_2O}$  είναι οι μοριακές ροές δια μέσω της ανόδου (kmol/s),  $P_{H_2}$ ,  $P_{H_2O}$  είναι οι μερικές πιέσεις (atm), και  $K_{H_2}$ ,  $K_{H_2O}$  είναι οι μοριακές σταθερές της βαλβίδας (kmol/(s·atm)) του υδρογόνου και του νερού αντίστοιχα,

μπορεί να εξαχθεί η επόμενη σχέση:

$$\frac{W}{P_{an}} = K_{an} \left[ (1 - U_f) \sqrt{M_{H_2}} + U_f \sqrt{M_{H_2O}} \right] \quad (2.9)$$

Η σύγκριση των σχέσεων (2.6) και (2.9) δείχνει ότι για  $U_f > 70\%$  το σφάλμα είναι μικρότερο από 7%. Είναι δυνατόν να τροποποιηθούν ελαφρώς οι σχέσεις (2.7) και (2.8) ώστε το σφάλμα να είναι ακόμα μικρότερο. Αυτό το μικρό σφάλμα δείχνει πως υπάρχει λογική στην χρήση των σχέσεων (2.7) και (2.8). Αντίστοιχη μελέτη για την κάθοδο δείχνει ότι το σφάλμα εκεί είναι ακόμα μικρότερο, λόγω των όμοιων μοριακών μαζών του οξυγόνου και του αζώτου.

Για τον υπολογισμό των μερικών πιέσεων των αερίων θα χρησιμοποιήσουμε την καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων. Κάθε αέριο θα αντιμετωπιστεί ξεχωριστά. Για παράδειγμα γίνεται ο υπολογισμός της μερικής πίεσης του υδρογόνου:

$$p_{H_2} V_{an} = n_{H_2} RT \quad (2.10)$$

όπου  $V_{an}$  είναι ο όγκος της ανόδου (lt),  $n_{H_2}$  είναι ο αριθμός των γραμμομορίων υδρογόνου στο κανάλι της ανόδου (mol),  $R$  είναι η παγκόσμια σταθερά αερίων (lt·atm)/(kmol·K) και  $T_a$  είναι η απόλυτη θερμοκρασία (K).

Απομονώνουμε την πίεση και παίρνουμε την παράγωγο του χρόνου:

$$\frac{d}{dt} p_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} q_{H_2} \quad (2.11)$$

όπου  $q_{H_2}$  είναι η παράγωγος ως προς τον χρόνο του  $n_{H_2}$  και αναπαριστά την μοριακή ροή του υδρογόνου (kmol/s)

Στη συνολική μοριακή ροή του υδρογόνου υπάρχουν τρεις συνιστώσες ροές: η ροή εισόδου  $q_{H_2}^{in}$ , η ροή που παίρνει μέρος στην αντίδραση  $q_{H_2}^r$ , και η ροή εξόδου  $q_{H_2}^{out}$ , συνεπώς:

$$\frac{d}{dt} p_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r) \quad (2.12)$$

Σύμφωνα με βασικές ηλεκτροχημικές σχέσεις η μοριακή ροή του υδρογόνου που αντιδρά μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$q_{H_2}^r = \frac{N_o I}{2F} = 2K_r I \quad (2.13)$$

όπου  $N_o$  είναι ο αριθμός των κυψελών σε σειρά στη στοιβία,  $F$  είναι η σταθερά Faraday (C/kmol),  $I$  είναι το ρεύμα της στοιβίας και  $K_r$  είναι μια σταθερά που ορίζεται εδώ, τοπικά, για τη μοντελοποίηση (kmol/(s·A)).

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (2.13) και (2.7) στην (2.12) και εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό Laplace στα δύο μέρη παίρνουμε την παρακάτω σχέση:

$$p_{H_2} = \frac{1/K_{H_2}}{1 + \tau_{H_2} s} (q_{H_2}^{in} - 2K_r I) \quad (2.14)$$

όπου  $\tau_{H_2} = \frac{V_{an}}{K_{H_2} RT}$ , εκφρασμένο σε δευτερόλεπτα, είναι η τιμή του πόλου του συστήματος αναφορικά με τη ροή του υδρογόνου.

Αντιστοίχως υπολογίζονται οι μερικές πιέσεις για το οξυγόνο και το νερό.

Συνήθως το  $U_f$  (χρησιμοποίηση καυσίμου) κυμαίνεται μεταξύ του 80-90%. Άρα το ρεύμα περιορίζεται στο εύρος:

$$\frac{0,8 \cdot q_{H_2}^{in}}{2K_r} \leq I_{fc}^{in} \leq \frac{0,9 \cdot q_{H_2}^{in}}{2K_r} \quad (2.15)$$

ενώ το ρεύμα εξόδου μπορεί να μετρείται έτσι ώστε η ροή καυσίμου (υδρογόνου) να κρατά το  $U_f$  στο 85%:

$$q_{H_2}^{in} = \frac{2K_r I}{0,85} \quad (2.16)$$

Επιπλέον η στοιχειομετρική αναλογία του υδρογόνου προς το οξυγόνο στην αντίδραση (2.3) είναι 2:1. Επιλέγουμε να έχουμε περίσσεια οξυγόνου, έτσι ώστε να μπορεί το υδρογόνο να αντιδρά πιο ολοκληρωμένα με το οξυγόνο. Έτσι έχουμε θεωρήσει μία αναλογία 1,145:1 (υδρογόνο προς οξυγόνο) που δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα (μετά από προσομοιώσεις και παρατήρηση). Έτσι περιορίζουμε την είσοδο του οξυγόνου βάσει αυτής της αναλογίας, με έλεγχο της ταχύτητας από τον συμπιεστή αέρα.

Η χημική απόκριση στον επεξεργαστή καυσίμου είναι συνήθως αργή, καθώς σχετίζεται με τον χρόνο που απαιτείται για να αλλαχτούν οι παράμετροι της χημικής αντίδρασης, μετά από μια αλλαγή στη ροή των αντιδρώντων. Έτσι εκφράζεται με μια 1<sup>ης</sup> τάξης συνάρτηση Laplace με σταθερά χρόνου 5s:

$$T = \frac{1}{1 + 5s} \quad (2.17)$$

Αντιθέτως η ηλεκτρική απόκριση στις κυψέλες καυσίμων είναι σχετικά γρήγορη και σχετίζεται κυρίως με την ταχύτητα στην οποία η χημική αντίδραση είναι ικανή να ανακτά τα φορτία (φορτισμένα σωματίδια) που κλείνουν το ηλεκτρικό κύκλωμα δια μέσω του ηλεκτρικού φορτίου. Κι αυτή η απόκριση εκφράζεται με μια 1<sup>ης</sup> τάξης συνάρτηση Laplace με σταθερά χρόνου 0,8s:

$$T = \frac{1}{1 + 0,8s} \quad (2.18)$$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για τον υπολογισμό της τάσης της στοιβάς χρησιμοποιείται η εξίσωση του Nernst (2.4), άρα

$$E_{\sigma\tau} = N_o E \quad (2.19)$$

και οι ωμικές απώλειες, στις οποίες επίσης αναφερθήκαμε, εκφράζεται από μια πτώση τάσης πάνω σε μια αντίσταση  $r$  ( $\Omega$ ):

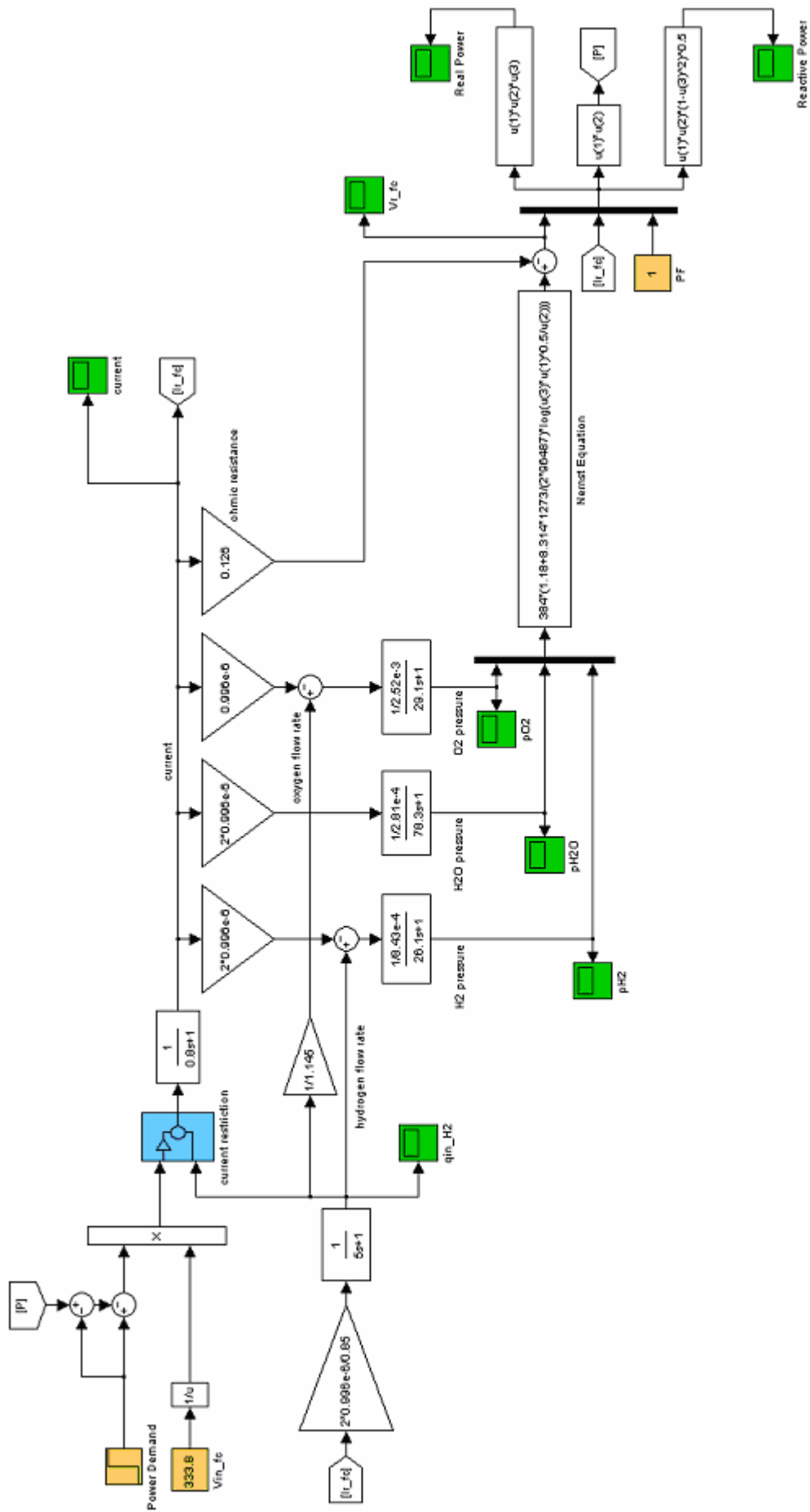
$$V = E - rI \quad (2.20)$$

Δια μέσω του ρυθμιστή ισχύος η κυψέλη καυσίμων μπορεί να έχει ως έξοδο όχι μόνο ενεργό ισχύ αλλά και άεργο. Ο συντελεστής ισχύος κυμαίνεται συνήθως μεταξύ του 0,8 και του 1,0. Ο χρόνος απόκρισης του ρυθμιστή ισχύος είναι της τάξης των 10ms – αμελητέο μπροστά στο αργό συνολικά σύστημα μας, οπότε δεν τον λαμβάνουμε υπόψη.

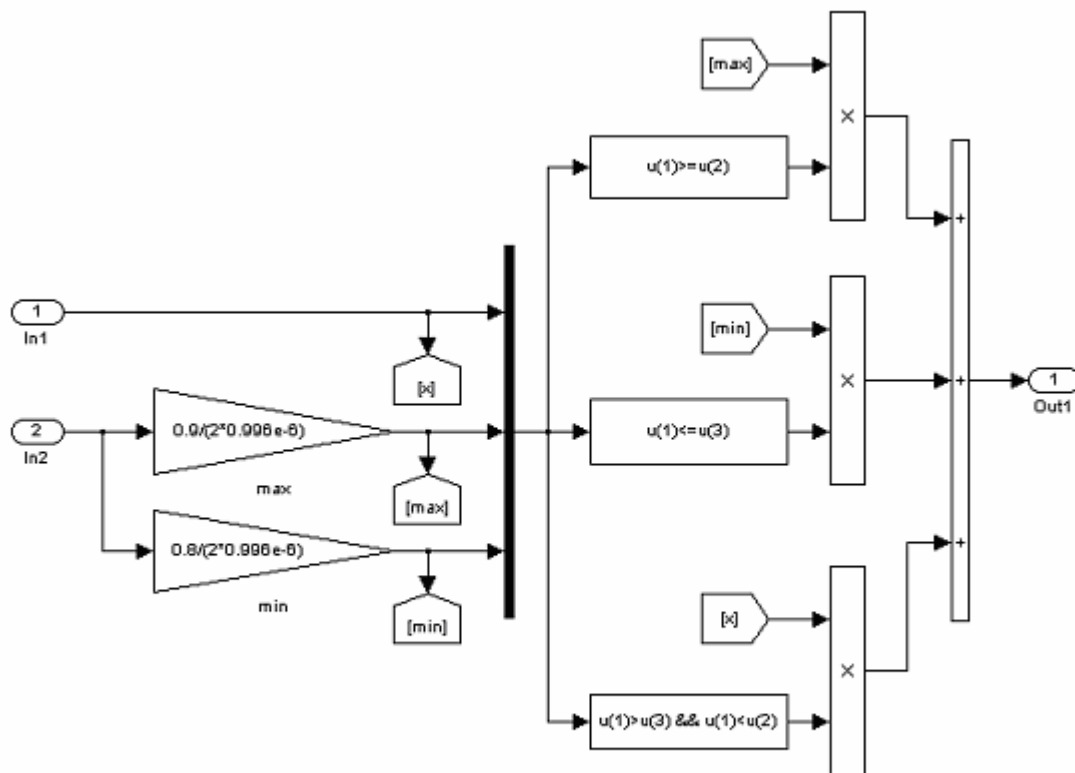
Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι τιμές των σταθερών που χρησιμοποιήθηκαν (ή/και δημιουργήθηκαν) για τις ανάγκες του μοντέλου:

<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδα</b>
$N_o$	384	-
$K_{H_2}$	8,43e-4	kmol/(s·Atm)
$K_{H_2O}$	2,81e-4	kmol/(s·Atm)
$K_{O_2}$	2,52e-3	kmol/(s·Atm)
$\tau_{H_2}$	26,1	s
$\tau_{H_2O}$	78,3	s
$\tau_{O_2}$	2,91	s
$r$	0,126	$\Omega$
$T$	1273	K
$F$	96,487	C/kmol
$R$	8314	J/(kmol·K)
$E^o$	1,18	V
$K_r$	0,996e-6	kmol/(s·A)

Παρακάτω παρουσιάζεται το μοντέλο όπως αυτό υλοποιήθηκε με Simulink, Matlab™.



ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΥΨΕΛΑΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΤΥΠΟΥ SOFC

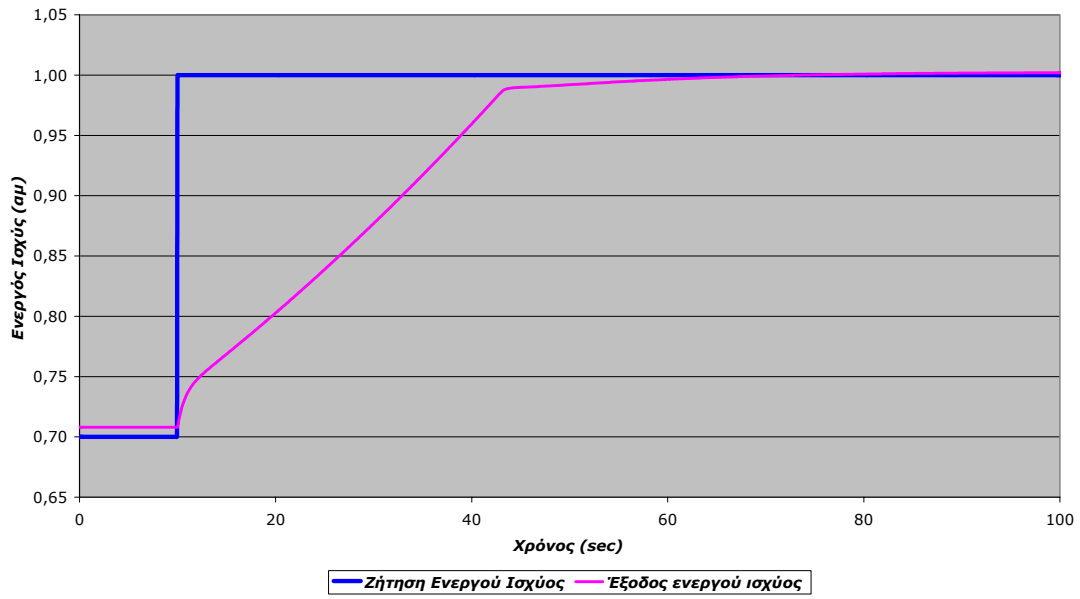


#### ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΤΙΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ (current restriction)

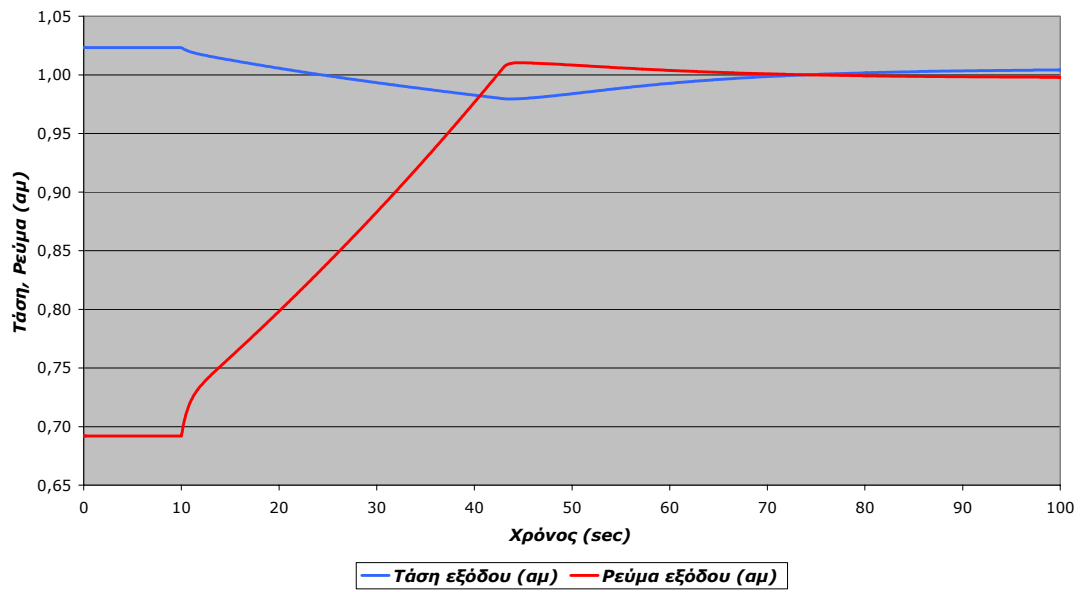
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των κυριότερων μεγεθών του μοντέλου. Σημειώνεται ότι θεωρήσαμε πως παράγεται μόνο ενεργός ισχύς  $\Sigma.I.=1$  (εξάλλου η παραγωγή και άεργου ισχύος είναι αποκλειστικά δουλειά του ρυθμιστή ισχύος και όχι των κυψελών καυσίμων) κι ότι για τα ηλεκτρικά μεγέθη χρησιμοποιήσαμε μοναδιαίες τιμές με βάση ισχύος τα 100 kW (ονομαστική ισχύς για το σύστημα μας) και βάση τάσεως την ονομαστική, 333,8 Volts.



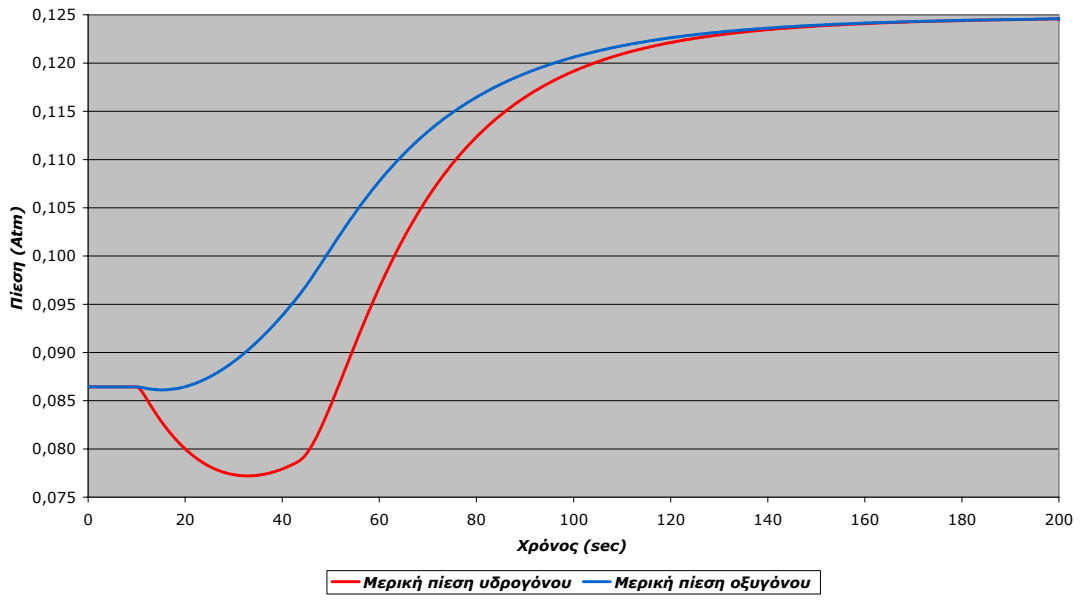
### Ενεργός Ισχύς



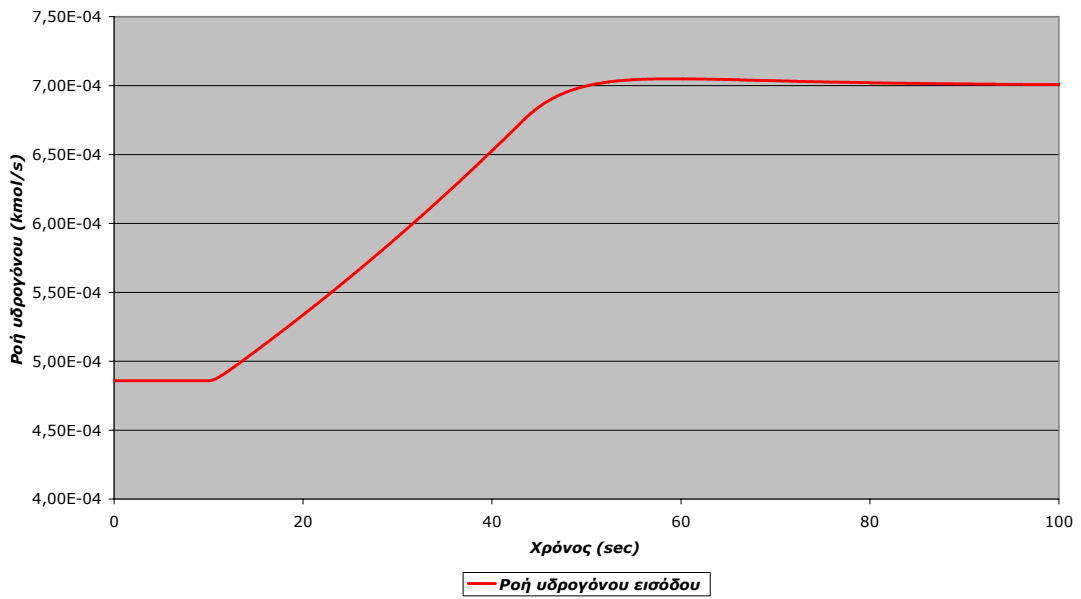
### Τάση, Ρεύμα εξόδου



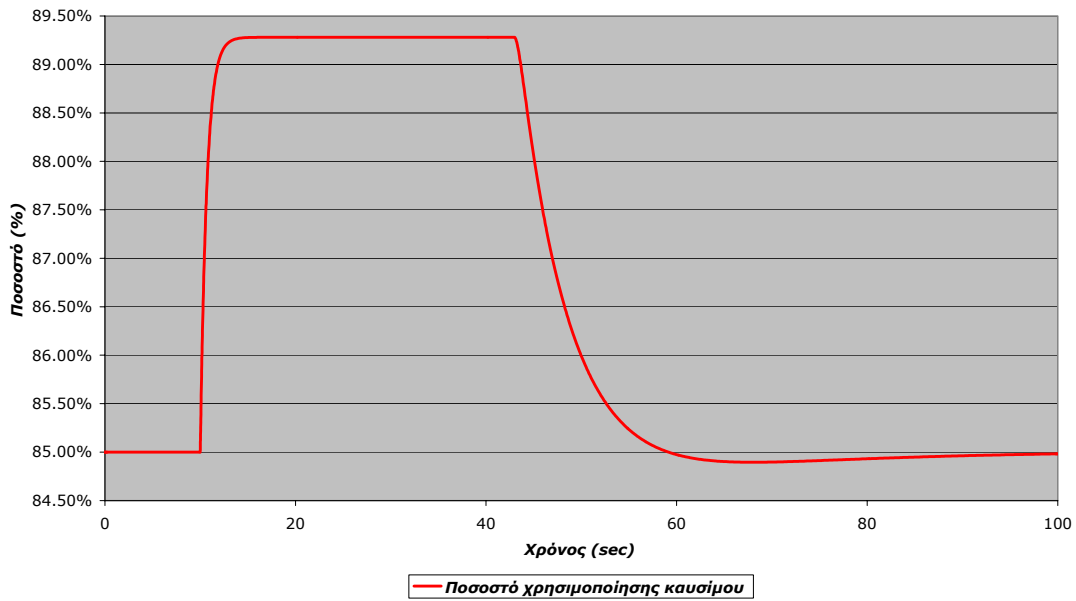
Μερικές πιέσεις



Ροή υδρογόνου εισόδου



Ποσοστό χρησιμοποίησης καυσίμου



### Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Κατά τα πρώτα 2-3 δευτερόλεπτα της αύξησης της ζήτησης ισχύος από 0,7 αμ σε 1 αμ έχουμε μία γρήγορη απόκριση του συστήματος, που οφείλεται στο σύντομο χρόνο απόκρισης των κυψελών καυσίμων (2.18). Στη συνέχεια η ισχύς εξόδου της κυψέλης καυσίμων αυξάνεται αργά έως την επιθυμητή ισχύ, γεγονός που οφείλεται στον σχετικά μεγάλο χρόνο απόκρισης του επεξεργαστή καυσίμων της κυψέλης (2.17). Ο συνολικός χρόνος απόκρισης για βηματική αλλαγή ζήτησης ισχύος από 0,7 αμ σε 1,0 αμ είναι συνολικά περί τα 30 sec. Χρόνος άνω του διπλάσιου του χρόνου που χρειάζεται για μια αντίστοιχη μεταβολή η μικροτουρμπίνα.

Παρατηρούμε ότι η γραφική παράσταση της ροής υδρογόνου είναι πανομοιότυπη με αυτή της εξόδου ισχύος, αναμενόμενο, αφού αυτό αποτελεί και τη μόνη πηγή ενέργειας. Σημειώνεται ότι ροή  $7,0 \cdot 10^{-4}$  kmol/sec  $H_2$  αντιστοιχεί σε ροή 5 kg/h  $H_2$  περίπου, ενώ το υδρογόνο που τελικά καταναλώνεται είναι περίπου 4,3 kg/h ( $U_f=0,85\%$ ). Υπολογισμοί μπορούν επίσης να γίνουν για τις ανάγκες σε οξυγόνο (για την περίπτωση της χρήσης των κυψελών καυσίμων σε κλειστούς, όχι καλά αεριζόμενους, χώρους).

Η dc τάση εξόδου του μοντέλου μειώνεται ελαφρά καθώς η ισχύς εξόδου αυξάνεται, ενώ το ρεύμα ακολουθεί λίγο-πολύ την ίδια συμπεριφορά με την ισχύ εξόδου. Η μείωση της τάσης οφείλεται, κυρίως, στην αύξηση της πτώσης τάσης από την αύξηση του ρεύματος. (Λόγω της αλλαγής του ρεύματος αλλάζουν οι συσχετισμοί των πιέσεων υδρογόνου, οξυγόνου και νερού μέσα στην κυψέλη, με αποτέλεσμα μια μικρή αύξηση της τάσης των κυψελών που επικαλύπτεται όμως από την πολύ μεγαλύτερη πτώση τάσης πάνω στην εσωτερική αντίσταση που έχουμε ορίσει.) Η σταθεροποίηση των δύο αυτών μεγεθών (τάση, ρεύμα) καθυστερεί λίγα δευτερόλεπτα παραπάνω (συνολικά περίπου 40 sec) από ότι της ισχύος.

Η dc τάση εξόδου του μοντέλου μειώνεται ελαφρά καθώς η ισχύς εξόδου αυξάνεται, ενώ το ρεύμα ακολουθεί την ίδια συμπεριφορά με την ισχύ εξόδου. Η μείωση της τάσης οφείλεται, κυρίως, στην αύξηση της πτώσης τάσης από την αύξηση του ρεύματος. (Λόγω της αλλαγής του ρεύματος αλλάζουν και οι

συσχετισμοί των πιέσεων υδρογόνου, οξυγόνου και νερού μέσα στην κυψέλη, με αποτέλεσμα μια μικρή αύξηση της τάσης των κυψελών που επικαλύπτεται όμως από την πολύ μεγαλύτερη πτώση τάσης πάνω στην εσωτερική αντίσταση που έχουμε ορίσει.) Η σταθεροποίηση των δύο αυτών μεγεθών (τάση, ρεύμα) καθυστερεί λίγα δευτερόλεπτα παραπάνω (συνολικά περίπου 40 sec) από ότι η σταθεροποίηση της ισχύος.

Στο μοντέλο μας ορίσαμε ως επιτρεπτά όρια για τη χρησιμοποίηση καυσίμου τα 80-90% (2.15). Από την τελευταία γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι το μοντέλο μας προσεγγίζει τη μέγιστη χρησιμοποίηση καυσίμου (90%) για 30 sec περίπου. Η συνολική μεταβολή στο ποσοστό χρησιμοποίησης καυσίμου (μέχρι την επάνοδο του στο 85%) διαρκεί κοντά στα 50 sec.

Οι πανομοιότυπες (πριν και μετά το πέρας της μεταβολής του συστήματος μας) πιέσεις υδρογόνου και οξυγόνου χρειάζονται περί τα 100 sec για να προσεγγίσουν η μία την άλλη και κοντά στα 140 sec για να σταθεροποιηθούν στο νέο σημείο ισορροπίας.

### 3. Διανεμημένη παραγωγή ενέργειας (distributed generation)

Οι διανεμημένες πηγές ενέργειας περιλαμβάνουν ποικίλες πηγές παραγωγής ενέργειας, όπως οι μικροτουρμπίνες (microturbines), τα φωτοβολταϊκά (photovoltaics), οι κυψέλες καυσίμων (fuel cells), και διάφορες εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας, με απόδοση ισχύος από 1kW ως 10MW. Η επέκταση της διανεμημένης παραγωγής ενέργειας στα δίκτυα διανομής θα μπορούσε ενδεχομένως να αυξήσει την αξιοπιστία τους και να χαμηλώσει το κόστος της μεταφοράς ισχύος, με την τοποθέτηση των πηγών ενέργειας πλησιέστερα στα σημεία της ζήτησής της. Δίνοντας αυτήν τη δυνατότητα παράκαμψης των συμβατικών συστημάτων μεταφοράς ισχύος, οι διανεμημένες πηγές ενέργειας θα μπορούσαν επίσης να προσφέρουν μεγάλη ευελιξία στην παροχή ενέργειας.

#### 3.1 Εισαγωγή

Με την καθιέρωση μιας ανταγωνιστικής αγοράς στον τομέα της ισχύος και την αυξανόμενη έμφαση στα οικονομικά οφέλη της, η προσοχή των επενδυτών συνεχίζει να εστιάζεται στις μικρότερες, πιο ευέλικτες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό μια γρήγορη απάντηση στα αυξανόμενα φορτία και την ανάγκη για μεγαλύτερη αξιοπιστία των συστημάτων. Αυτές οι διανεμημένες πηγές ενέργειας μπορούν να προσφέρουν πολλά πιθανά οφέλη, που περιλαμβάνουν τα εξής:

- ευελιξία στην τοποθεσία εγκατάστασης
- ποικιλομορφία καυσίμων
- μείωση εκπομπών
- μείωση απωλειών
- μείωση χρόνου εγκατάστασης
- χρονική αναβολή των έργων για τη βελτίωση του δικτύου
- ποιότητα ισχύος και βελτίωση της αξιοπιστίας τοπικά
- μείωση ενεργειακού κόστους

Η διανεμημένη παραγωγή πρωτοπαρουσιάστηκε στην αγορά της ενέργειας πριν από πολύ καιρό. Παρά τις άρσεις των απαγορεύσεων της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ιδιώτες, η εικόνα παραμένει θολή. Το αν η επιχειρηματική δραστηριότητα θα δημιουργήσει ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που θα εκμεταλλεύεται όλους τους τύπους διανεμημένων πηγών ενέργειας ή το αν το σύστημα θα παραμείνει λίγο πολύ στα πεπραγμένα τόσων ετών, θα εξαρτηθεί από τις επιπτώσεις της χρήσης των διαφόρων μονάδων διανεμημένης παραγωγής, το μέγεθος και τον τύπο τους, το πλήθος τους και το πώς θα διαμορφωθεί η νομοθεσία που θα διέπει τη λειτουργία τους.

Όταν κανείς αναφέρεται στη διανεμημένη παραγωγή μπορεί να σκεφτεί έναν σημαντικό αριθμό εφαρμογών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως είναι οι μικροί στρόβιλοι, τα μικρά υδροηλεκτρικά, οι κυψέλες καυσίμων, οι ανεμογεννήτριες, τα φωτοβολταϊκά, οι μπαταρίες, οι γεννήτριες diesel και οι μικροτουρμπίνες. Η εμφάνιση π.χ. των μικροτουρμπινών, με ταχύτητες περιστροφής έως και άνω των 90.000 στροφών ανά λεπτό, έχει κυριεύσει στη φαντασία αλλά και στη διάθεση για επενδύσεις των επιχειρηματιών όλου του κόσμου. Η ιδέα της κατοχής μιας ευέλικτης πηγής παραγωγής ενέργειας, που μπορεί να αγοράζεται σταδιακά καθώς το φορτίο αυξάνεται, που είναι σχετικά αποδοτική, που προκαλεί ελάχιστη ρύπανση και που αποβάλλει τις περισσότερες από τις απώλειες που συνδέονται με το παραδοσιακό σύστημα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, απασχολεί κατά κόρο τη βιομηχανία.

Η διανεμημένη παραγωγή, εντούτοις, δεν είναι απαραίτητως "φιλική προς τον χρήστη" σε ένα παραδοσιακό σύστημα διανομής. Το σύστημα διανομής, όπως το ξέρουμε, είναι ακτινωτό, δύσκαμπτο, στερείται αρμονικών (στο μεγαλύτερο μέρος του) και δεν ασχολείται με την ιδιαίτερη συμπεριφορά των γεννητριών που χρησιμοποιούνται (η ενασχόληση των εγγράφων διεθνώς – έρευνες, δημοσιεύσεις – με την σταθερότητα των συστημάτων είναι γενικά περιορισμένη).

Η είσοδος στην αγορά ενέργειας ανεξάρτητων παραγωγών ισχύος, που συνδέονται με τα υπάρχοντα ηλεκτρικά συστήματα, έχει προτρέψει τη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας να επανεξετάσει τις μεθόδους διασύνδεσής της με τους παραγωγούς. Σε ένα απορυθμισμένο περιβάλλον αυτές οι μέθοδοι πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των εγκαταστάσεων των ανεξάρτητων παραγωγών, συμπεριλαμβανομένων των μονάδων διανεμημένης παραγωγής, στα δίκτυα διανομής τους, και το αντίκτυπό τους στην ασφάλεια και την αξιοπιστία των συστημάτων. Οι απαιτήσεις για την κατάλληλη προστασία με ηλεκτρονόμους στη διασύνδεση, και η δυνατότητα για απομακρυσμένο χειρισμό και καταμέτρηση των διασυνδέσεων είναι ουσιαστικές, έτσι ώστε οι μεγάλες γεννήτριες να μπορούν να χρησιμοποιηθούν παράλληλα με τη διανεμημένη παραγωγή.

### **3.2 Ανάλυση της αξιοπιστίας της διανεμημένης παραγωγής**

Με τις πρόσφατες προόδους στην τεχνολογία, θα πρέπει να αναμένονται αυξανόμενα ποσά διανεμημένης παραγωγής ενέργειας στα συστήματα διανομής ενέργειας. Αυτή η διανεμημένη παραγωγή μπορεί να έχει θετικό αντίκτυπο στο όλο σύστημα όπως η υποστήριξη της τάσης και η ραγδαία ελαχιστοποίηση της ανάγκης για εύρεση μεγάλων κεφαλαίων για επενδύσεις στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά μπορεί επίσης να ασκήσει αρνητικές επιδράσεις στο συντονισμό της προστασίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, στη ρύθμιση της τάσης, και στον κανονισμό των επιπέδων του τρεμοπαίγματος (flicker) της τάσης και των βραχυκυκλωμάτων. Η αξιοπιστία είναι μια περιοχή όπου η διανεμημένη παραγωγή ενέργειας μπορεί να ασκήσει και θετική και αρνητική επίδραση. Στη συνέχεια θα περιγράψουμε αυτές τις καταστάσεις και θα αναπτύξουμε κάποιες μεθόδους για την ανάλυση.

#### **3.2.1 Γενικά**

Στο παρελθόν, οι περισσότεροι διανομείς ηλεκτρικής ενέργειας τροφοδοτούνταν από μια ενιαία πηγή και λειτουργούσαν με μια ακτινωτή διάταξη. Σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου η ισχύς θα μεταφερόταν μακριά από τον υποσταθμό, κατά τη διάρκεια και της κανονικής λειτουργίας αλλά και κάτω από ελαττωματικές συνθήκες. Στο πλαίσιο των νομοθεσιών όλων των χωρών του κόσμου, ο διαχειριστής του δικτύου (ΔΕΗ, στην περίπτωση της Ελλάδας) είχε το αποκλειστικό δικαίωμα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για εμπορική χρήση και θα μπορούσε να αποτρέψει τους πελάτες από την «πράξη» της εισαγωγής ισχύος στο δίκτυο.

Σταδιακά σε όλο τον κόσμο άρχισαν να επιτρέπονται η παραγωγή και πώληση ηλεκτρικής ενέργειας σε κατάλληλες εγκαταστάσεις: ενέργεια που ο διαχειριστής του δικτύου υποχρεούται να αγοράσει. Αυτές οι μικρές και διεσπαρμένες γεννήτριες, καλούμενες ως διανεμημένη παραγωγή (DG), σημαίνουν ουσιαστικά ότι οι διανομείς ισχύος έχουν πολλαπλές επιλογές πηγών και είναι τώρα δυνατό για τη ροή ισχύος να κινηθεί αντίθετα: από τη θέση της μονάδας διανεμημένης παραγωγής προς τον υποσταθμό.

Οι εγκαταστάσεις αυτές που έχουν τη δυνατότητα διανεμημένης παραγωγής ενέργειας χρησιμοποιούν συνήθως μονάδες ισχύος άνω του 1 MW. Αυτές οι μονάδες είναι σύνθετες, ακριβές, και εξαιρετικά προσεγμένες όσον αφορά τα συστήματα προστασίας και τα χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα λειτουργίας, με στόχο την εξασφάλιση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας. Το επόμενο κύμα της διανεμημένης παραγωγής θα συνίσταται από πολλές μικρές μονάδες, παρά από έναν μικρό αριθμό μεγάλων μονάδων. Οι μικροτουρμπίνες είναι ήδη ικανές να παράγουν ενέργεια σε ανταγωνιστικές τιμές, σε ισχύεις μέχρι και 20 kW\* (από 20 kW και άνω). Άλλες τεχνολογίες διανεμημένης παραγωγής όπως οι κυψέλες καυσίμων και τα φωτοβολταϊκά στοιχεία γίνονται όλο και πιο προσιτά στις τιμές και πιο δημοφιλή, ιδιαίτερα εκεί όπου τα επίπεδα θορύβου και οι αυστηρές απαιτήσεις εκπομπών ρύπων αποτελούν σημαντικές παραμέτρους για την επιλογή της πηγής ισχύος.

Ο πολλαπλασιασμός των μονάδων διανεμημένης παραγωγής θέτει πολλές δυσκολίες στα συστήματα διανομής. Δεδομένου ότι ο έλεγχος της ρύθμισης της τάσης είναι συνήθως βασισμένος στις υποθέσεις ακτινωτής ροής ισχύος, η διανεμημένη παραγωγή μπορεί να οδηγήσει σε υπερτάσεις και υποτάσεις. Θέτοντας μια μονάδα διανεμημένης παραγωγής σε λειτουργία ή αποσυνδέοντάς τη, μπορεί να προκληθεί αξιοπρόσεχτο τρεμόπαιγμα της τάσης και οι αλλαγές στη διαθέσιμη ισχύ από τις πηγές διανεμημένης παραγωγής ενέργειας μπορεί να προκαλέσουν στους ρυθμιστές τάσης κάποια έντονη απορύθμιση.

Οι μονάδες διανεμημένης παραγωγής μπορούν να ασκήσουν ουσιαστική επίδραση στα χαρακτηριστικά των βραχυκυκλωμάτων που παρατηρούνται, αναγκάζοντας τις εκτιμήσεις για τον εξοπλισμό των εγκαταστάσεων να αστοχήσουν και τα σχέδια προστασίας να αποτύχουν.

Επιπλέον, και οι μονοφασικές και οι τριφασικές μονάδες διανεμημένης παραγωγής μπορούν να επιδεινώσουν τα προβλήματα που συνδέονται με τα ασύμμετρα φορτία και τις σύνθετες αντιστάσεις.

Η διανεμημένη παραγωγή μπορεί επίσης να ασκήσει θετικές επιδράσεις στα συστήματα διανομής. Οι δυνατότητες περιλαμβάνουν την αντιστάθμιση αέργου ισχύος για τον έλεγχο της τάσης και την μείωση των απωλειών, την ανίχνευση της κατανάλωσης ισχύος από τα φορτία για τη ρύθμιση της συχνότητας, τη βοηθητική λειτουργία (εφεδρεία) για την υποστήριξη των διακοπών λειτουργίας της κύριας παραγωγής, και δυναμική λειτουργία για τη βελτίωση της σταθερότητας του εκάστοτε δικτύου.

Εάν οι μονάδες διανεμημένης παραγωγής συντονίζονται κατάλληλα, μπορούν να ασκήσουν θετική επίδραση στην αξιοπιστία των συστημάτων διανομής. Ένα απλό παράδειγμα είναι μια εφεδρική παραγωγή, η οποία ξεκινά να εξυπηρετεί τους πελάτες όταν εμφανίζεται μια διακοπή της τροφοδοσίας από την κύρια πηγή. Οι μονάδες διανεμημένης παραγωγής που βρίσκονται συνδεδεμένες μπορούν επιπλέον να μειώσουν τις μεγάλες φορτίσεις των διαφόρων εφαρμογών (εξοπλισμού) και να επιτρέψουν τις μεταφορές φορτίων προς κάλυψη, από παρακείμενους τροφοδότες, που έχει διακοπεί η λειτουργία τους.

Μετά την εκτεταμένη χρήση κριτηρίων αξιολόγησης που στηρίζονται στην αναδόμηση και την απόδοση, είναι κρίσιμο για τις εγκαταστάσεις να ελαχιστοποιήσουν τον αρνητικές επιδράσεις της διανεμημένης παραγωγής και να

\* Χρησιμοποιείται η έκφραση «μέχρι και 20 kW» γιατί στην προκειμένη περίπτωση είναι σημαντική η χρήση όσο το δυνατόν μικρότερων μονάδων παραγωγής ισχύος.

μεγιστοποιήσουν τις θετικές. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, τα μοντέλα που θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να είναι σε θέση να ποσοτικοποιήσουν την επίδραση της διανεμημένης παραγωγής στην αξιοπιστία των συστημάτων διανομής.

### **3.2.2 Διανεμημένη παραγωγή**

Οι διανεμημένες γεννήτριες μπορούν να οριστούν γενικά ως πηγές ενέργειας που συνδέονται με τα συστήματα διανομής. Είναι πολύ μικρότερες από τις παραδοσιακές γεννήτριες των κεντρικών σταθμών, που κυμαίνονται σε ισχύ από μερικά kW έως περίπου 10 MW. Το κύριο πλεονέκτημα των μονάδων διανεμημένης παραγωγής είναι η κοντινή απόστασή τους από τα φορτία που εξυπηρετούν. Προφανώς, υπάρχουν και μειονεκτήματα σ' αυτήν την πρακτική, διαφορετικά θα αντικαθιστούσαν πλήρως την κεντρική παραγωγή. Μια περίληψη των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων είναι η ακόλουθη:

*πλεονεκτήματα διανεμημένης παραγωγής συγκριτικά με κεντρική παραγωγή*

- χωρίς απαιτήσεις μετάδοσης ή διανομής
- μειωμένες διακοπές λόγω διακοπών λειτουργίας
- σύντομους διαδικασία προμήθειας και εγκατάστασης
- διαθέσιμη σε μικρές συναρμολογούμενες μονάδες

*μειονεκτήματα διανεμημένης παραγωγής συγκριτικά με κεντρική παραγωγή*

- γενικά οδηγεί σε υψηλότερες ενεργειακές δαπάνες
- μικρότερη ποικιλομορφία φορτίων απαιτεί αυξανόμενη μέγιστη ικανότητα
- απαιτεί πλεονασμό για ισοδύναμη αξιοπιστία ισχύος
- ενδεχομένως να απαιτηθεί σύνδεση κάποιας εφαρμογής για εφεδρική ισχύ
- ενδεχομένως να απαιτηθεί σύνδεση κάποιας εφαρμογής για την ικανοποίηση του φορτίου

Αν και υπάρχουν πολλές τεχνολογίες διανεμημένης παραγωγής που χρησιμοποιούν ανανεώσιμη ενέργεια (π.χ., φωτοβολταϊκή, αιολική, πτώση υδάτων), θα εστιάσουμε την προσοχή μας στις τεχνολογίες που χρησιμοποιούν μια συνεχή πηγή καυσίμων (π.χ., εμβολοφόρες μηχανές, μικροτουρμπίνες, κυψέλες καυσίμων). Εκτός του ότι αυτές οι τεχνολογίες είναι βολικές ως προς τις ιδιαιτερότητες τους (εύκολη εγκατάσταση, συνεχή παροχή καυσίμων, δυνατότητα διαρκούς παρακολούθησης), είναι και πολύ λιγότερο ακριβές και θα κυριαρχήσουν την αγορά διανεμημένης παραγωγής για πολλά έτη.

Η πιο κοινή χρήση της διανεμημένης παραγωγής είναι η εφεδρική παραγωγή. Μετά από μια διακοπή, οι εφεδρικές γεννήτριες αρχίζουν για να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια στα κρίσιμα φορτία. Οι περισσότερες εφεδρικές γεννήτριες είναι εμβολοφόρες μηχανές diesel λόγω του χαμηλότερου κόστους και της γρήγορης εκκίνησης τους. Αυτές οι μονάδες είναι θορυβώδεις, χρησιμοποιούν ακριβά καύσιμα, έχουν σχετικά αυξημένες εκπομπές ρύπων και δεν είναι γενικά κατάλληλες για λειτουργία φορτίου βάσης.

Για τα κρίσιμα και ευαίσθητα φορτία, οι εφεδρικές γεννήτριες μπορούν να συνδυαστούν με μπαταρίες και αντιστροφείς για την εξασφάλιση αδιάκοπης ισχύος. Αφότου εμφανίζεται μια διακοπή, τα φορτία μεταφέρονται αμέσως στις μπαταρίες και τον αναστροφέα. Οι μπαταρίες έχουν αντίστοιχο μέγεθος για να μπορούν να εξυπηρετήσουν τα κρίσιμα φορτία έως ότου η πηγή διανεμημένης παραγωγής να μπορεί να αποδώσει τη μέγιστη ισχύ της.

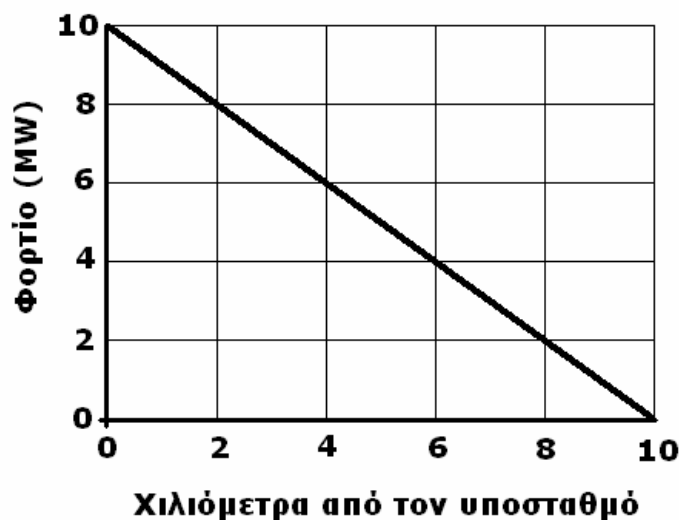
Η επόμενη πιο κοινή εφαρμογή για τη διανεμημένη παραγωγή είναι η εξομάλυνση των αιχμών. Κατά τη διάρκεια των περιόδων υψηλής ενεργειακής ζήτησης και



υψηλών τιμών, οι τοπικές γεννήτριες τίθενται σε λειτουργία και χρησιμοποιούνται για την εξυπηρέτηση μέρους των φορτίων της γύρω περιοχής. Εκτός από τη μείωση των λογαριασμών κατανάλωσης ενέργειας, η εξομάλυνση των αιχμών μπορεί να βελτιώσει την αξιοπιστία των συστημάτων με τη μείωση της φόρτισης των κεντρικών γεννητριών.

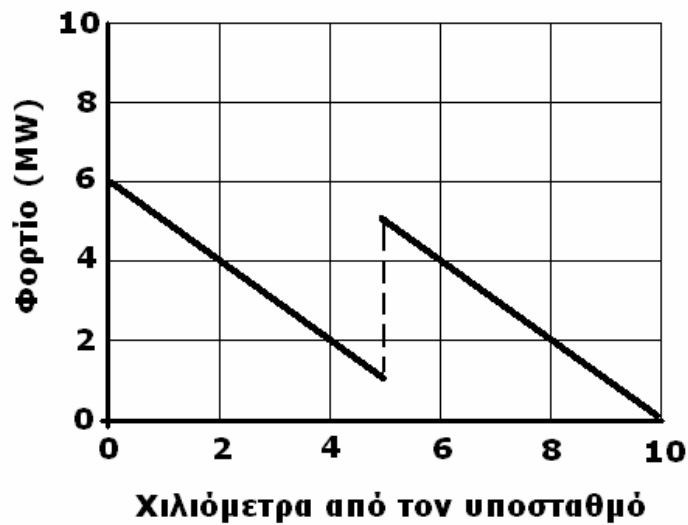
Μια άλλη εφαρμογή για τη διανεμημένη παραγωγή που κερδίζει στη δημοτικότητα αναφέρεται ως "net metering", κατά την οποία η επιτόπια παραγωγή μπορεί να υπερβεί την απαίτηση της περιοχής της και να οδηγήσει σε παροχή ισχύος προς το σύστημα διανομής. Η ενέργεια που ανατροφοδοτείται στο σύστημα μετρείται και ο λογαριασμός κατανάλωσης ενέργειας ενός πελάτη βασίζεται στη διαφορά μεταξύ της ενέργειας που λαμβάνεται από το σύστημα διανομής και της ενέργειας που παρέχεται στο σύστημα διανομής.

Το "net metering" προσκρούει στην αυξημένη αξιοπιστία του συστήματος διανομής επειδή αλλάζει τα χαρακτηριστικά ροής ισχύος των τροφοδοτών διανομής. Θεωρήστε μια γραμμή μεταφοράς μήκους 10 χιλιομέτρων που εξυπηρετεί ένα ομοιόμορφα διανεμημένο φορτίο 10 MW. Η πλήρης ισχύ των 10 MW θα ρεύσει από τον υποσταθμό διανομής και θα μειώνεται σταδιακά μέχρι το τέλος της γραμμής. Το τι ακριβώς συμβαίνει παρουσιάζεται στο επόμενο διάγραμμα:



### **Φόρτιση γραμμής μεταφοράς χωρίς διανεμημένη παραγωγή**

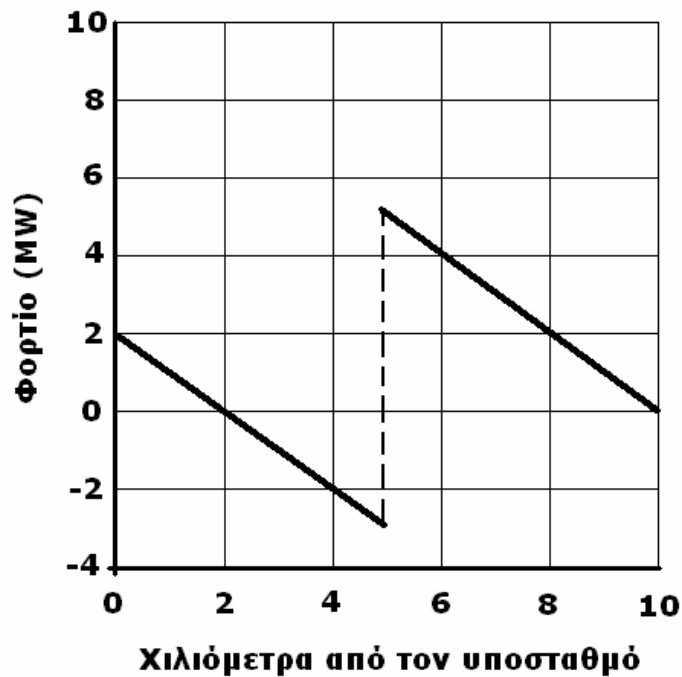
Θεωρήστε τώρα την επίδραση της τοποθέτησης μιας μονάδας διανεμημένης παραγωγής 4 MW στο μεσαίο σημείο αυτής της γραμμής. Σε αυτήν την περίπτωση, η ισχύς που μετρείται στην αρχή της γραμμής είναι 6 MW αντί για το συνολικό φορτίο των 10 MW, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



### Φόρτιση γραμμής με παρουσία διανεμημένης παραγωγής 4 MW στο μέσο της γραμμής

Αυτό μπορεί να είναι παραπλανητικό δεδομένου ότι οι μεταφορές φορτίων είναι συχνά βασισμένες σε μετρήσεις στον υποσταθμό, αλλά μπορεί να επιβαρυνθούν από τα μεγαλύτερα φορτία μετά τη μονάδα διανεμημένης παραγωγής. Περαιτέρω, η διανεμημένη παραγωγή μπορεί να επικαλύψει την αύξηση του φορτίου και να προκαλέσει έτσι δυσκολίες στην πρόβλεψη και τον προγραμματισμό. Εάν η αύξηση των φορτίων των τροφοδοτών δεν ανιχνεύεται λόγω της παρουσίας της διανεμημένης παραγωγής, και επιτραπεί να γίνει πάρα πολύ μεγάλη, η απώλεια μιας μονάδας διανεμημένης παραγωγής κατά τη διάρκεια της μέγιστης φόρτισης μπορεί να οδηγήσει σε υπερφορτίσεις του εξοπλισμού και διακοπές παροχής ενέργειας στους πελάτες.

Εάν η μονάδα διανεμημένης παραγωγής παράγει περισσότερο από το φορτίο της περιοχής που καλείται αυτή να καλύψει (δηλ. την περιοχή μετά το μέσο της γραμμής, στο οποίο έχει τοποθετηθεί αυτή), θα υπάρξει ροή ισχύος από τη θέση της μονάδας διανεμημένης παραγωγής προς τον υποσταθμό, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα. Κάπου κατά μήκος αυτής της πορείας θα υπάρξει ένα σημείο όπου δε θα υπάρχει καθόλου ρεύμα (μηδενική ροή ισχύος). Η δυνατότητα να βελτιωθεί η αξιοπιστία είναι υψηλότερη καθώς το μηδενικό σημείο πλησιάζει τον υποσταθμό, αλλά αυξάνουν επίσης οι δυσκολίες του συντονισμού της λειτουργίας και της προστασίας του όλου συστήματος. Το να υπάρχει ένα τέτοιο μηδενικό σημείο στην περιοχή μεταξύ της διανεμημένης παραγωγής και του υποσταθμού δεν είναι γενικά αποδεκτό δεδομένου ότι θα οδηγήσει αντίστροφη της ροής ισχύος δια μέσω των μετασχηματιστών του υποσταθμού.



### **Φόρτιση γραμμής με παρουσία διανεμημένης παραγωγής 8 MW στο μέσο της γραμμής**

Εάν η ροή ισχύος από μια μονάδα διανεμημένης παραγωγής προς τον υποσταθμό είναι αρκετά μεγάλη, ο εξοπλισμός κοντά στη μονάδα διανεμημένης παραγωγής μπορεί να χρειαστεί να εξυπηρετήσει μεγαλύτερα φορτία σε σχέση με τα φορτία που θα εξυπηρετούσε εάν δεν υπήρχε διανεμημένη παραγωγή. Στην πρώτη περίπτωση του παραδείγματος που εξετάζουμε, όπου υπάρχει φόρτιση 2 MW, 8 χιλιόμετρα μακριά από τον υποσταθμό. Εάν μια μονάδα διανεμημένης παραγωγής των 8 MW τοποθετηθεί σ' αυτό το σημείο, τα 6 MW του φορτίου θα ρεύσουν προς τον υποσταθμό δηλ. τρεις φορές η κανονική φόρτιση. Προφανώς λοιπόν πρέπει να τηρούνται οι προδιαγραφές του εξοπλισμού σε κάθε σημείο του συστήματος και να μην υπερφορτώνεται, διαφορετικά μπορεί να προκληθούν προβλήματα αξιοπιστίας.

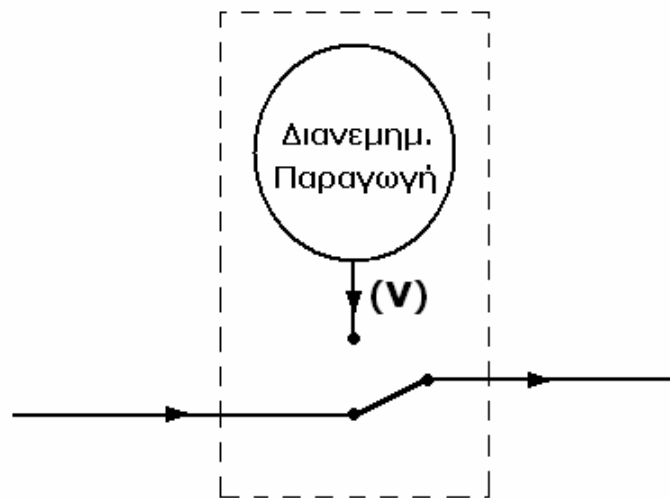
#### **3.2.3 Αξιολόγηση της πρόβλεψης αξιοπιστίας**

Η αξιολόγηση της αξιοπιστίας των συστημάτων διανομής είναι τομέας που ωριμάζει γρήγορα. Πραγματοποιείται με προγράμματα που αναπτύσσονται διαρκώς και που χρησιμοποιούνται σε κλειστούς χώρους – μακριά από την περιοχή παραγωγής της ενέργειας – με τη μορφή εμπορικά διαθέσιμων προϊόντων λογισμικού. Αυτά τα εργαλεία σχεδιασμού είναι σε θέση να προβλέψουν την αξιοπιστία ενός συστήματος διανομής, βασιζόμενα στην τοπολογία του συστήματος και δεδομένα αξιοπιστίας καθενός εκ των συστατικών που απαρτίζουν το σύστημα, αλλά γενικά δεν έχουν σχεδιαστεί για να εξετάζουν το αντίκτυπο της αξιοπιστίας της διανεμημένης παραγωγής.

Στη συνέχεια εξηγούμε πώς το αντίκτυπο της αξιοπιστίας διάφορων εφαρμογών της διανεμημένης παραγωγής μπορεί να διαμορφωθεί στο υπάρχον λογισμικό αξιολόγησης της αξιοπιστίας.

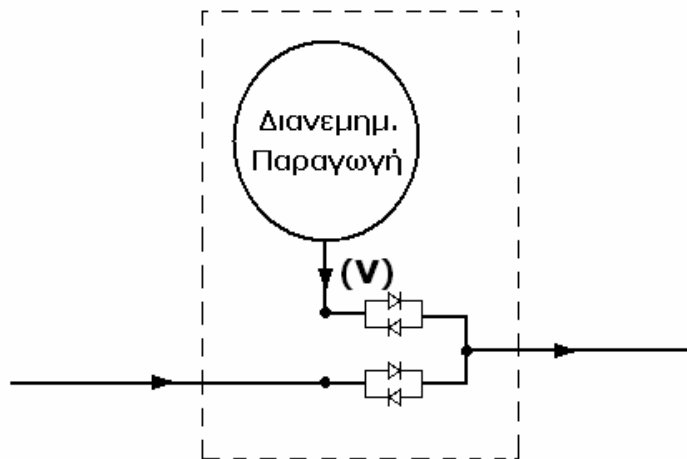
### 3.2.4 Εφεδρεία εκτός λειτουργίας για ακτινωτά συστήματα

Σήμερα, η πιο κοινή εφαρμογή της διανεμημένης παραγωγής είναι η λειτουργία της ως εφεδρική παραγωγή, με μια πώληση εναλλασσόμενων γεννητριών συνολικής ισχύος περί τα 14 GW κάθε χρόνο. Η μονάδα διανεμημένης παραγωγής παραμένει εκτός λειτουργίας κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας και τίθεται σε λειτουργία για την εξυπηρέτηση των κρίσιμων φορτίων, μετά την εμφάνιση μιας διακοπής της κύριας πηγής παραγωγής ενέργειας. Ακριβώς όπως μια πραγματική εφεδρική γεννήτρια συνδέεται με το σύστημα διανομής μέσω ενός διακόπτη μεταφοράς, οι εφεδρικές γεννήτριες διανεμημένης παραγωγής μπορούν να μοντελοποιηθούν εύκολα στα εργαλεία αξιολόγησης της αξιοπιστίας χρησιμοποιώντας έναν διακόπτη μεταφοράς, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



#### **Εφεδρεία σε θέση εκτός λειτουργίας με καθυστέρηση στον χρόνο έναρξης**

Σε αυτό το μοντέλο, η μονάδα διανεμημένης παραγωγής μπορεί να θεωρηθεί ως πηγή τάσης, δεδομένου ότι δεν θα χρησιμοποιηθεί ποτέ παράλληλα με την κύρια πηγή. Αφότου εμφανίζεται μια διακοπή, ο διακόπτης μεταφοράς μετατοπίζει το φορτίο που υπάρχει μετά τη θέση της μονάδας διανεμημένης παραγωγής, από την κύρια πηγή στην εφεδρική (όπως στο παράδειγμα που αναλύσαμε πριν). Δεδομένου ότι η μονάδα διανεμημένης παραγωγής δεν αρχίζει ακαριαία, τα φορτία θα υποστούν ακόμα μία σύντομη διακοπή. Αυτό μπορεί να διαμορφωθεί με τον καθορισμό του χρόνου διακοπής του διακόπτη μεταφοράς ίσο με τον χρόνο έναρξης της μονάδας διανεμημένης παραγωγής.



### Υποστήριξη αδιάλειπτης λειτουργίας (UPS) σε θέση εκτός λειτουργίας

Μερικοί πελάτες χρησιμοποιούν τις συσκευές UPS (υποστήριξη αδιάλειπτης λειτουργίας) από κοινού με τη διανεμημένη παραγωγή για την αποβολή των στιγμιαίων διακοπών που συνδέονται με τον χρόνο έναρξης των μονάδων διανεμημένης παραγωγής.

#### 3.2.5 Διαρκής λειτουργία με τη μέθοδο "net metering" για ακτινωτά συστήματα

Για ακτινωτά δίκτυα η διανεμημένη παραγωγή δε μπορεί να διαμορφωθεί ως μια πηγή παράλληλα με την κύρια πηγή. Κάτι τέτοιο θα δημιουργούσε ένα μη ακτινωτό σύστημα με αδυναμία ανάλυσης από τους αντίστοιχους αλγορίθμους. Ο απλούστερος τρόπος ανάλυσης είναι η μοντελοποίηση της διανεμημένης παραγωγής ως αρνητικό φορτίο που εγγχεί πραγματική και άεργο ισχύ στο σύστημα, ανεξάρτητα από την τάση του συστήματος. Εφ' όσον συνδέεται η μονάδα διανεμημένης παραγωγής με μια κύρια πηγή, θα παραδώσει ισχύ στο σύστημα είτε στις περιόδους αιχμής είτε κατά τη λογική του "net metering". (ανάλογα με το εάν η μονάδα διανεμημένης παραγωγής δίδει ισχύ μεγαλύτερη από το φορτίο το οποίο καλείται να καλύψει). Από την οπτική του συστήματος διανομής η μοντελοποίηση της διανεμημένης παραγωγής ως αρνητικό φορτίο είναι λογική. Δεδομένου ότι η κύρια πηγή θα απαιτήσει πιθανώς τις μονάδες διανεμημένης παραγωγής για την αποσύνδεση από το σύστημα, ελλείψει μιας πηγής που θα μπορέσει να εξασφαλίσει την ασφάλεια, το αρνητικό φορτίο θα επιτρέψει την απαλοιφή των ελαττωμάτων και την αποφυγή των προβλημάτων που συνδέονται με την απομονωμένη λειτουργία συστημάτων.

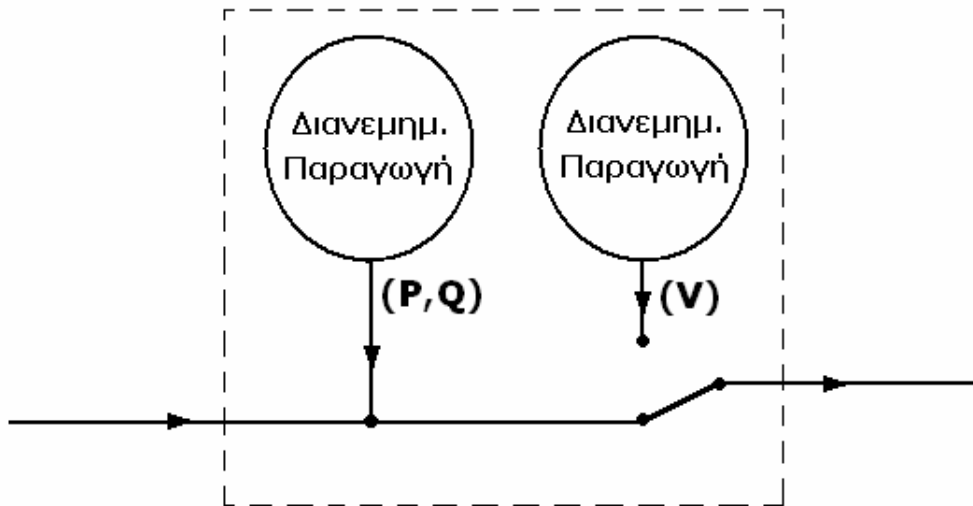
Η μοντελοποίηση της διανεμημένης παραγωγής ως αρνητικό φορτίο μπορεί να ασκήσει θετική επίδραση στην αξιοπιστία εάν το πρότυπο αξιολόγησης της αξιοπιστίας θέτει περιορισμούς στην ικανότητα των συστημάτων κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στον επαναπροσδιορισμού του συστήματος. Θεωρήστε το παρακάτω σχήμα. Όταν εμφανίζεται ένα σφάλμα στην περιοχή που καλείται να καλύψει η πηγή A, ο διακόπτης θα ανοίξει και θα διακόψει όλους τους πελάτες στην αντίστοιχη γραμμή (ή γραμμές) μεταφοράς. Το άνοιγμα του διακόπτη θα επιτρέψει ενδεχομένως στους πελάτες που ανήκουν στην περιοχή με διαθέσιμη εναλλακτική πηγή τροφοδότησης, να αποκαταστήσουν, με το κλείσιμο του αντίστοιχου διακόπτη, την επανατροφοδότησή τους με ενέργεια. Για να επιτραπεί αυτή η μεταφορά, η ισχύς που ρέει μέσω του διακόπτη, που υπό κανονικές συνθήκες

λειτουργίας είναι κλειστός, και συνδέει τους καταναλωτές με την πηγή A, πρέπει να μπορεί να παρασχεθεί από ένα σύστημα μεταφοράς που ξεκινά από έναν – υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας – ανοικτό διακόπτη και τερματίζει στην πηγή B. Εάν οποιοδήποτε τμήμα (του εξοπλισμού του συστήματος) σε αυτήν την πορεία δεν μπορεί να χειριστεί το πρόσθετο φορτίο χωρίς υπέρβαση των προδιαγραφών του, η μεταφορά των φορτίων παρεμποδίζεται και έτσι η αξιοπιστία μειώνεται. Εάν η μονάδα διανεμημένης παραγωγής βρίσκεται ακριβώς στην περιοχή με την εναλλακτική πηγή τροφοδότησης, οι απαιτήσεις για τη μεταφορά των φορτίων μπορούν να μειωθούν, επιτρέποντας στις προηγουμένως παρεμποδισμένες μεταφορές φορτίων να πραγματοποιηθούν με αποτέλεσμα τη βελτίωση της γενικής αξιοπιστίας του συστήματος.

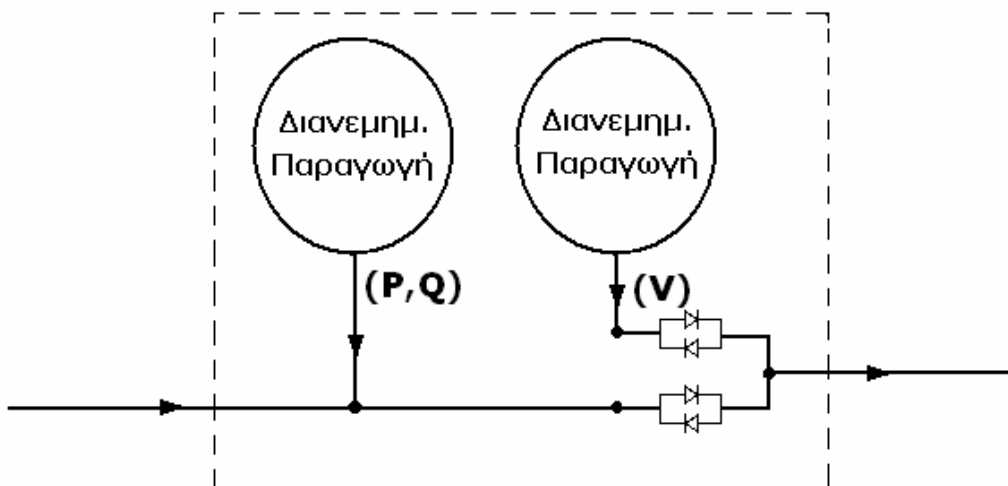


### **Τροφοδότηση φορτίου από εναλλακτική πηγή μετά από σφάλμα στην κύρια πηγή**

Σε πολλές περιπτώσεις, οι πελάτες θα θελήσουν να λειτουργήσουν τη διανεμημένη παραγωγή με τη μέθοδο του "net metering" κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας, αλλά ίσως θελήσουν επίσης να αποσυνδεθούν από την κύρια πηγή και να λειτουργήσει το σύστημα σε απομονωμένη μορφή κατά τη διάρκεια των διακοπών λειτουργίας της κύριας πηγής. Για την ακτινωτή ανάλυση αυτής της συμπεριφοράς με τα αντίστοιχα εργαλεία, χρησιμοποιείται ένα σύνθετο μοντέλο από ένα αρνητικό φορτίο και μια πηγή τάσης. Κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας, το αρνητικό φορτίο μειώνει τη συνολική φόρτιση των τροφοδοτών και βελτιώνει την αξιοπιστία του συστήματος. Κατά τη διάρκεια μιας διακοπής, ένας διακόπτης μεταφοράς αποσυνδέει το φορτίο των πελατών από το αρνητικό φορτίο (διανεμημένη παραγωγή) και το συνδέει με μια εναλλασσόμενη πηγή. Παρόμοια με τα μοντέλα εφεδρείας, αυτή η μεταφορά μπορεί να διαμορφωθεί με καθυστέρηση ή χωρίς καθυστέρηση.



**Ακτινωτή διασύνδεση απομονωμένης λειτουργίας με καθυστέρηση**

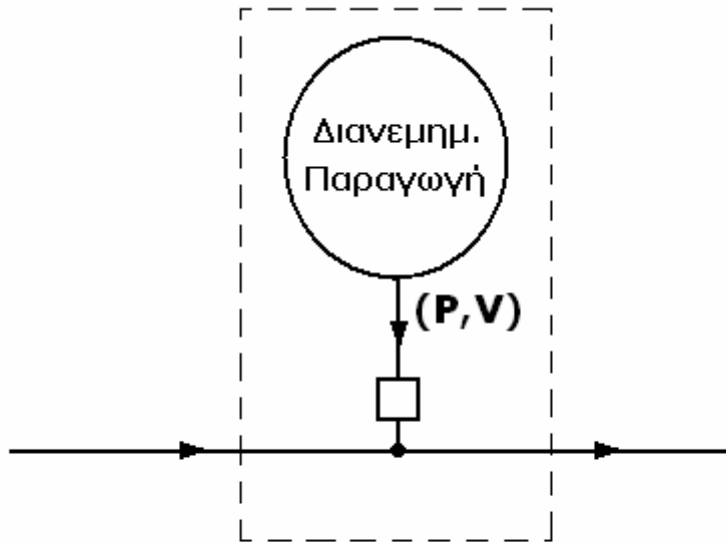


**Ακτινωτή διασύνδεση απομονωμένης αδιάλειπτης λειτουργίας**

Κατά χρησιμοποίηση των σύνθετων μοντέλων που αποτελούνται και από ένα αρνητικό φορτίο και από μια πηγή τάσης, πρέπει να ληφθεί προσοχή όσον αφορά την εξασφάλιση ότι οι μονάδες διανεμημένης παραγωγής δεν προσμετρούνται δύο φορές. Ο διπλός υπολογισμός θα πραγματοποιηθεί εάν ο αλγόριθμος αξιολόγησης της αξιοπιστίας επαναλάβει έναν πλήρη υπολογισμό της ροής ισχύος αφού ο διακόπτης μεταφοράς έχει μεταβεί στην πηγή τάσης. Εάν πραγματοποιηθεί αυτή η υπολογιστική ακολουθία, το αρνητικό φορτίο θα μειώσει τεχνητά τη ζήτηση και ίσως επιτρέψει κι άλλες μεταφορές φορτίου που ειδάλλως θα είχαν αποκλειστεί λόγω αδυναμίας του συστήματος.

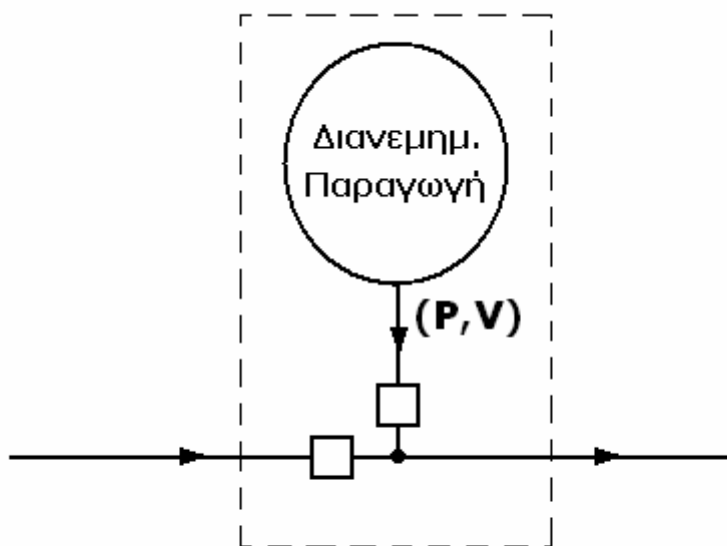
### 3.2.6 Δίκτυα

Εάν ένας αλγόριθμος αξιολόγησης της αξιοπιστίας υποστηρίζει συστήματα δικτύων (συστήματα όπου πολλαπλές πηγές λειτουργούν παράλληλα) οι μονάδες διανεμημένης παραγωγής μπορούν να διαμορφωθούν όπως μια πηγή τάσης σταθερής ισχύος. (Προσοχή πρέπει να ληφθεί στην προστασία της μονάδας διανεμημένης παραγωγής με έναν διακόπτη ρεύματος δεδομένου ότι το μοντέλο διανεμημένης παραγωγής μπορεί να παρέχει λανθάνον ρεύμα χωρίς να είναι συνδεδεμένο με την παροχή της κύριας πηγής.)



#### Βασικό μοντέλο

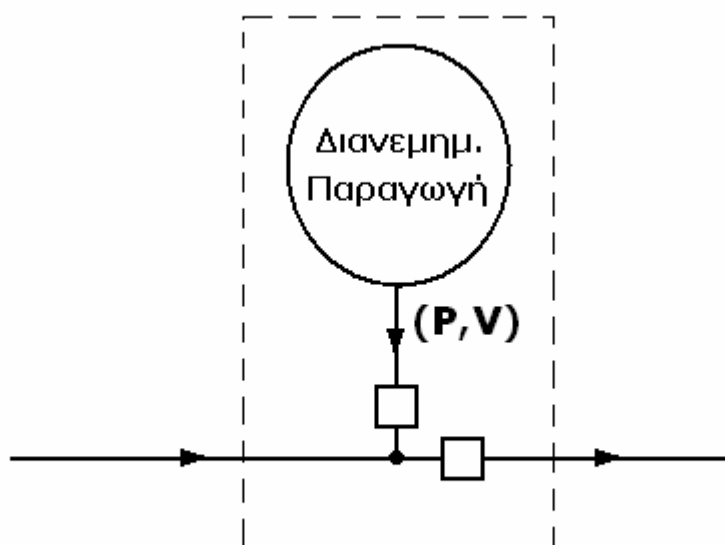
Μια πρόσθετη εφαρμογή των διακοπών ρεύματος μπορεί να είναι η συγκράτηση της μονάδας διανεμημένης παραγωγής συνδεδεμένη με έναν πελάτη μετά από ένα σφάλμα στο σύστημα (αδιάλειπτη ισχύς),



#### Αδιάλειπτη Ισχύς



ή η συγκράτηση της μονάδας διανεμημένης παραγωγής συνδεδεμένη με το δίκτυο, μετά από ένα σφάλμα πελατών (αδιάλειπτη υποστήριξη τροφοδοσίας).



### **Αδιάλειπτη υποστήριξη τροφοδοσίας**

#### **3.2.7 Συμπεράσματα**

Οι διάφορες εφαρμογές που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή και μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να αναμένουν μια σημαντική αύξηση στο ποσό διανεμημένης παραγωγής που συνδέεται στα συστήματα διανομής τους. Αν και αυτές οι πηγές ισχύος μπορούν να δημιουργήσουν πολλές περιπλοκές, έχουν επίσης τη δυνατότητα να βελτιώσουν την αξιοπιστία του συστήματος.

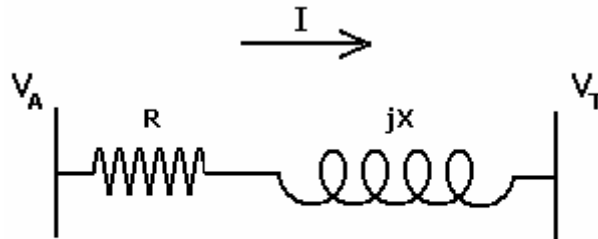
Όταν η διανεμημένη παραγωγή εφαρμόζεται σε ένα σύστημα που καλείται να καλύψει βαριά φορτία, αποδεικνύεται ότι βελτιώνει την αξιοπιστία του συστήματος (τροφοδότη) με τη συνδεδεμένη διανεμημένη παραγωγή αλλά και των άλλων διασυνδεδεμένων συστημάτων χωρίς διανεμημένη παραγωγή. Δεδομένου ότι ο τροφοδότης με τη διανεμημένη παραγωγή είναι σε θέση να παρέχει μόνο μέρος του φορτίου του, μπορεί να μεταφέρει αποτελεσματικότερα τους πελάτες σε παρακείμενους τροφοδότες κατά την εμφάνιση ενός σφάλματος. Ομοίως, η μειωμένη φόρτιση των τροφοδοτών επιτρέπει στους παρακείμενους τροφοδότες να μεταφέρουν αποτελεσματικότερα το φορτίο τους στον τροφοδότη με τη διανεμημένη παραγωγή. Η βελτίωση της αξιοπιστίας του συστήματος αποδεικνύεται σε όλες τις περιπτώσεις.

#### **3.3 Μοντελοποίηση**

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης ενός μικρού δικτύου με την ύπαρξη διανεμημένης παραγωγής πραγματοποιούμε το μοντέλο που παρουσιάζεται στις επόμενες σελίδες και το οποίο αφορά μια γραμμή μεταφοράς R-L. Δεδομένα σε αυτό το μοντέλο θεωρούνται οι ισχύεις (ενεργός και άεργος) οι οποίες θα ρεύσουν από τη γραμμή, η τάση του ενός άκρου της γραμμής και η γωνία της τάσης (για άπειρο ζυγό θεωρούμε γωνία 0). Ζητούμενα είναι η τάση και η γωνία του άλλου άκρου της γραμμής και το ρεύμα που ρέει στη γραμμή.

Η γραμμή θεωρούμε ότι παρουσιάζει σύνθετη αντίσταση σειράς  $(0,1 + j0,2) \Omega/\text{km}$ . Ενδεικτικά δημιουργούμε παρακάτω το μοντέλο για γραμμή μεταφοράς 10 km.

Για τη προσομοίωση της γραμμής κάναμε αναγωγή του συστήματος σε ανά μονάδα μεγέθη. Θεωρήσαμε ότι η βασική τάση του δικτύου είναι 6,6 kV (ονομαστική τιμή) και ως βασική ισχύ θεωρήσαμε το 1 MVA. Η συχνότητα λειτουργίας του δικτύου είναι τα 50 Hz. Θεωρούμε επίσης ότι έχουμε τριφασικό σύστημα μεταφοράς.



Γραμμή μεταφοράς R-L

Θεωρούμε την παραπάνω γραμμή μεταφοράς R-L στην οποία δείχνουμε ποια ορίζουμε ως θετική φορά ρεύματος, όπως επίσης και τις τάσεις στα δύο άκρα (ζυγούς). Ροή ισχύος με φορά ίδια με αυτή του ρεύματος θεωρείται επίσης θετική. Αντίθετη φορά ροής ισχύος θεωρείται αρνητική. Παρακάτω υπολογίζουμε τις σχέσεις για την τάση του τελικού άκρου ( $V_T$ ) και το ρεύμα της γραμμής ( $I$ ).

$$\tilde{V}_T = \tilde{V}_A - \tilde{I}(R + jX) \quad (3.1)$$

$$\tilde{S} = P + jQ = 3\tilde{V}_A \tilde{I}^* \Leftrightarrow$$

$$\tilde{I} = \frac{\tilde{S}^*}{3\tilde{V}_A^*} \quad (3.2)$$

ενώ,

$$\tilde{S}^* = P - jQ \quad (3.3)$$

Από τις (3.1), (3.2) και (3.3) προκύπτει η παρακάτω σχέση που δίνει την τιμή της τάσης στο άλλο άκρο της γραμμής.

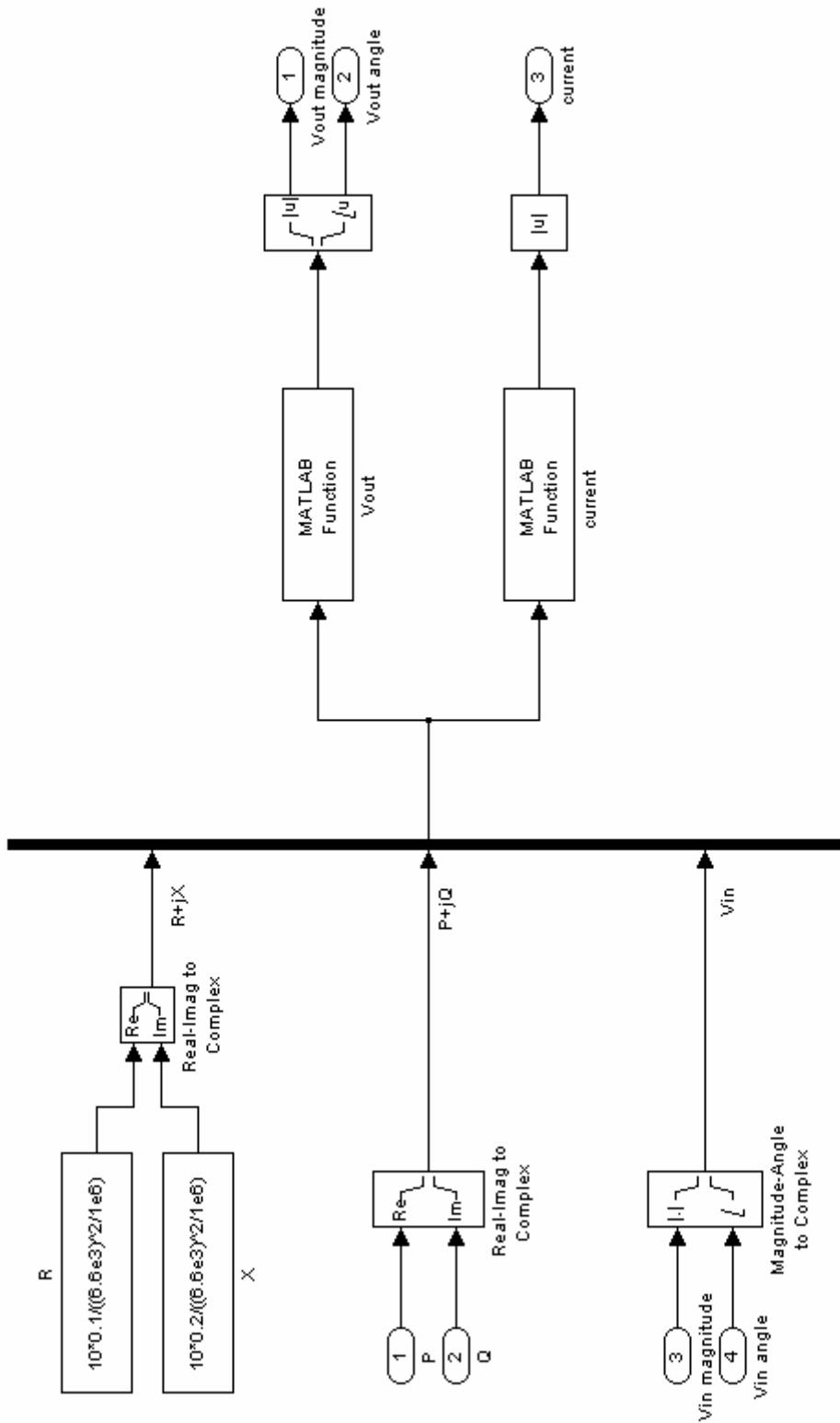
$$\tilde{V}_T = \frac{P - jQ}{3\tilde{V}_A^*} (R + jX) - \tilde{V}_A \quad (3.4)$$

όπου

$$R = 10 \cdot 0,1 \frac{10^6}{(6,6 \cdot 10^3)^2} \text{ αμ} \quad (3.5)$$

$$X = 10 \cdot 0,2 \frac{10^6}{(6,6 \cdot 10^3)^2} \text{ αμ} \quad (3.6)$$

Το μοντέλο παρουσιάζεται παρακάτω:



Τα blocks "Vout" και "current" περιέχουν τις σχέσεις (3.4) και (3.2) αντίστοιχα.

ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΓΡΑΜΜΗΣ

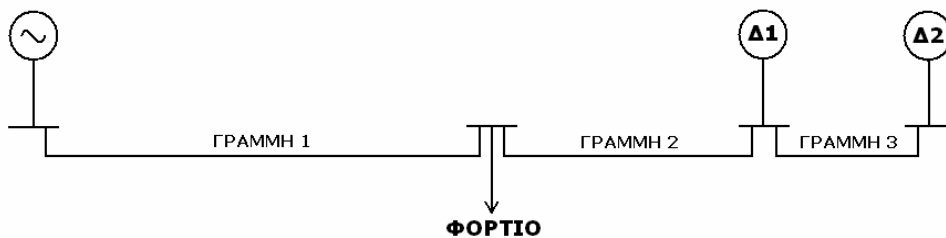
Για την προσομοίωση άλλων γραμμών διαφορετικών μηκών, αλλά ίδιας σύνθετης αντίστασης, απλά μεταβάλλουμε στα blocks R και X τον πρώτο παράγοντα, που στο παραπάνω σχήμα έχει την τιμή 10 (km).

## 4. Ένταξη μονάδων διανεμημένης παραγωγής ενέργειας σε δίκτυο

Για την εξέταση των ιδιοτήτων της εγκατάστασης μονάδων μικροτουρμπινών και κυψελών καυσίμων με τη μορφή της διανεμημένης παραγωγής, δημιουργήσαμε ένα μικρό δίκτυο παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, πάνω στο οποίο πραγματοποιούμε διάφορες προσομοιώσεις, βάσει κάποιων σεναρίων που αφορούν διαφορετικές λειτουργικές καταστάσεις. Προσπαθούμε να δούμε πως αλληλεπιδρά το δίκτυο με την παρουσία της διανεμημένης παραγωγής και γίνονται συγκριτικές δοκιμές.

### 4.1 Περιγραφή δικτύου & παραδοχές

Θεωρούμε μια δεδομένη ζήτηση ισχύος από ένα φορτίο που διασυνδέεται με έναν άπειρο ζυγό και δύο συστάδες 10 μικροτουρμπινών και 10 στοιβών κυψελών καυσίμων ( $\Delta 1$  και  $\Delta 2$  αντίστοιχα) σε δύο διαφορετικά σημεία – δύο διαφορετικούς ζυγούς – του δικτύου, που απέχουν απόσταση 1 χιλιόμετρο (ΓΡΑΜΜΗ 3). Το φορτίο απέχει 0.5 χιλιόμετρα (ΓΡΑΜΜΗ 2) από την κοντινότερη σε αυτό συστάδα μικροπηγών (οι 10 μικροτουρμπίνες) και η κύρια παροχή ενέργειας προέρχεται από τον άπειρο ζυγό – γεννήτρια που απέχει 10 χιλιόμετρα (ΓΡΑΜΜΗ 1) από το φορτίο. Το δίκτυο που υλοποιούμε έχει δηλαδή την παρακάτω μορφή:



#### ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΟΥ ΥΛΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΜΕ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΕ SIMULINK

Θεωρούμε την τάση του δικτύου σταθερή και καθιστούμε τελικά το δίκτυο – βάσει κάποιων κανονισμών – ως συμπληρωματική πηγή ενέργειας για το φορτίο μας. Συγκριτικά σενάρια προσπαθούν να αποκαλύψουν τις ιδιαιτερότητες μιας τέτοιας λειτουργίας σε σχέση με την κλασική λειτουργία του δικτύου σήμερα (μοναδικός παροχέας ενέργειας ο άπειρος ζυγός) αλλά και την απομονωμένη λειτουργία.

Θεωρούμε ότι έχουμε θέσει σε λειτουργία τις μικροπηγές κι ότι ισχύς που ζητείται από αυτές είναι άνω του 40% της ονομαστικής ισχύος τους (100 kVA για κάθε μία – 1 MVA για ολόκληρη τη συστάδα). Θεωρούμε δηλ. ότι οι μικροπηγές βρίσκονται διαρκώς σε λειτουργία. Εξάλλου τα μοντέλα που δημιουργήσαμε αφορούν τη σταθερή κατάσταση λειτουργίας τους και όχι τη μεταβατική, κατά την εκκίνηση τους. Επιπλέον, δεν φορτίζουμε τις μικροπηγές άνω της ονομαστικής ισχύος τους. Επιλέγουμε να φορτίζουμε πρώτα πλήρως τη μία από τις δύο συστάδες μικροπηγών ( $\Delta 1$ ), όσο μας το επιτρέπει η ζήτηση ισχύος, και τη δεύτερη ( $\Delta 2$ ) τη φορτίζουμε άνω του 40% της ονομαστικής φόρτισής της, αν αυτό είναι αναγκαίο

(όταν δηλ. η  $\Delta 1$ ) δεν αρκεί για την κάλυψη της ισχύος). Σε κάθε περίπτωση, το υπόλοιπο της ζητούμενης ισχύος καλύπτεται από το δίκτυο.

Θεωρούμε ότι ο έλεγχος κάθε συστάδας γίνεται ενιαία για όλες τις μικροπηγές (μικροτουρμπίνες ή στοίβες κυψελών καυσίμων) που περιλαμβάνει αυτό (10 και στις δυο περιπτώσεις). Δηλαδή η ρύθμιση της ισχύος ή η κατανομή της φόρτισής τους γίνεται ταυτόχρονα\* για το σύνολο των μικροπηγών κάθε συστάδας.

Οι τρεις γραμμές θεωρούμε ότι είναι πανομοιότυπες και ότι παρουσιάζουν σύνθετη αντίσταση σειράς  $(0,1 + j0,2) \Omega/\text{km}$ .

## 4.2 Μοντελοποίηση

Παρακάτω παρουσιάζεται το μοντέλο στο σύνολό του.

Τα blocks που αναπαριστούν τις γραμμές μεταφοράς στο διάγραμμα της επόμενης σελίδας έχουν ως εισόδους την ενεργό και άεργο ισχύ που ζητείται να μεταφερθεί από αυτές, την τάση (μέτρο και γωνία) στην αρχή της εκάστοτε γραμμής. Οι έξοδοι είναι η τάση (μέτρο και γωνία) του τελικού άκρου της γραμμής σε κάθε χρονική στιγμή και το ρεύμα που διαρρέει τις γραμμές. Ως θετική φορά μεταφοράς της ισχύος έχει οριστεί η φορά από αριστερά προς τα δεξιά (όπως παρατηρούμε το μονογραμμικό σχέδιο του δικτύου ή το ίδιο το μοντέλο). Γι' αυτό και επειδή γενικά διαχειριζόμαστε τα μεγέθη με θετικές τιμές, στο block που αντιστοιχεί στις Γραμμές 2 και 3 η ενεργός και η άεργος ισχύς πολλαπλασιάζονται με το -1, αφού η ροή της ισχύος είναι από τα δεξιά προς τα αριστερά.

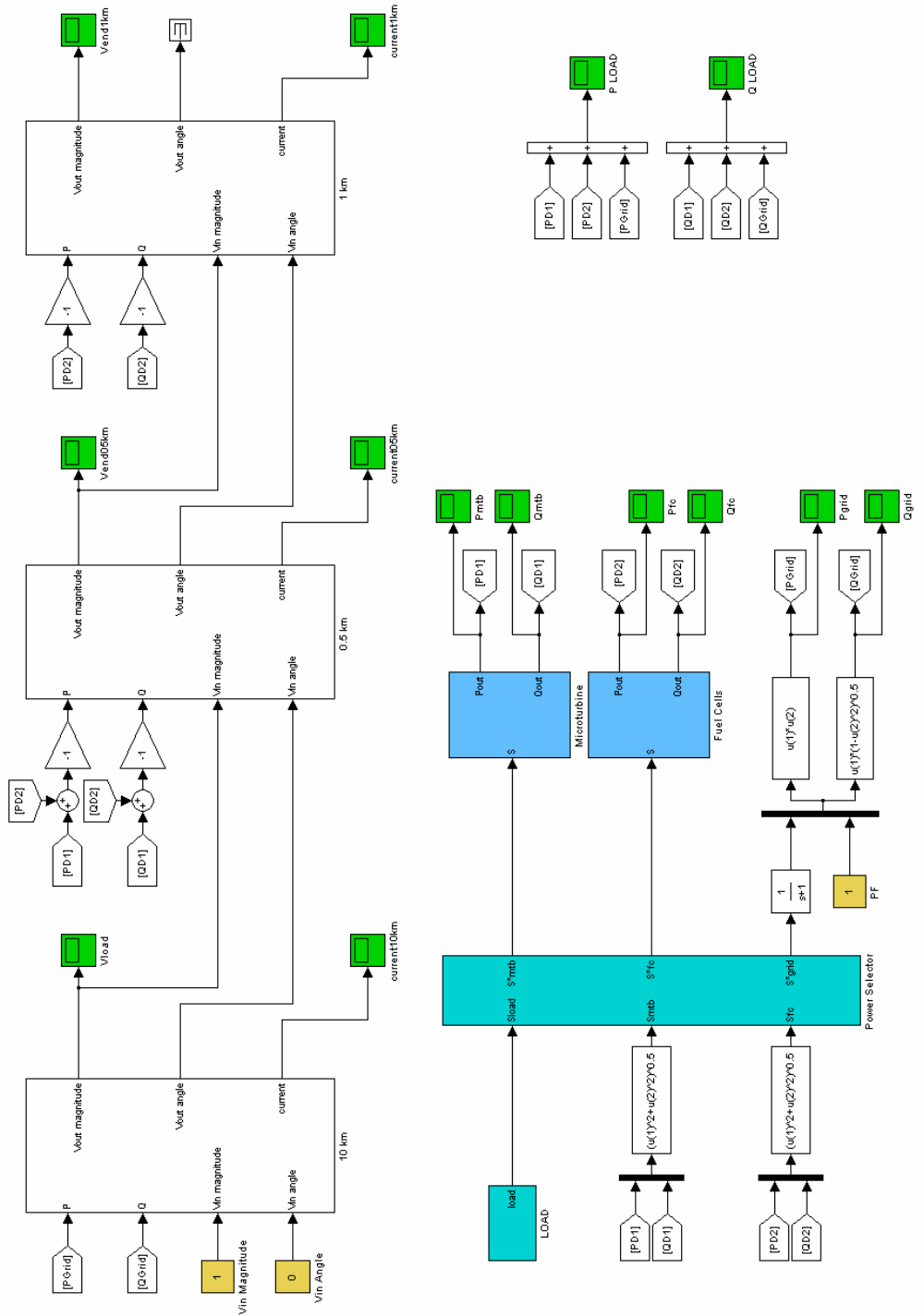
Το μοντέλο της γραμμής παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 3.

Η κατανομή της ισχύος γίνεται μέσω του block "Power Selector", το οποίο έχει ως είσοδο το φορτίο που το σύστημα καλείται να καλύψει και την ισχύ που τελικά προσφέρουν οι δύο εγκαταστάσεις διανεμημένης παραγωγής ενέργειας. Έξοδοι είναι η ισχύς που πρέπει να ζητηθεί από κάθε μικροπηγή ισχύος – δηλ. τις δύο μονάδες διανεμημένης παραγωγής ενέργειας και το δίκτυο.

Αυτή η ισχύς τελικά καθορίζει τη λειτουργία των  $\Delta 1$  και  $\Delta 2$  και του δικτύου (grid).

Οι διάφορες ισχείς που παράγονται από τις πηγές αυτές, είναι εκείνες που καλούνται να μεταφέρουν οι γραμμές μεταφοράς – κάθε μία από αυτές εκείνη που της αντιστοιχεί, ανάλογα με τις συνδέσεις στους ζυγούς.

\* Προφανώς ο χειρισμός κάθε μικροτουρμπίνας χωριστά είναι ευνοϊκότερη περίπτωση αυτής που εξετάζεται.



**ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

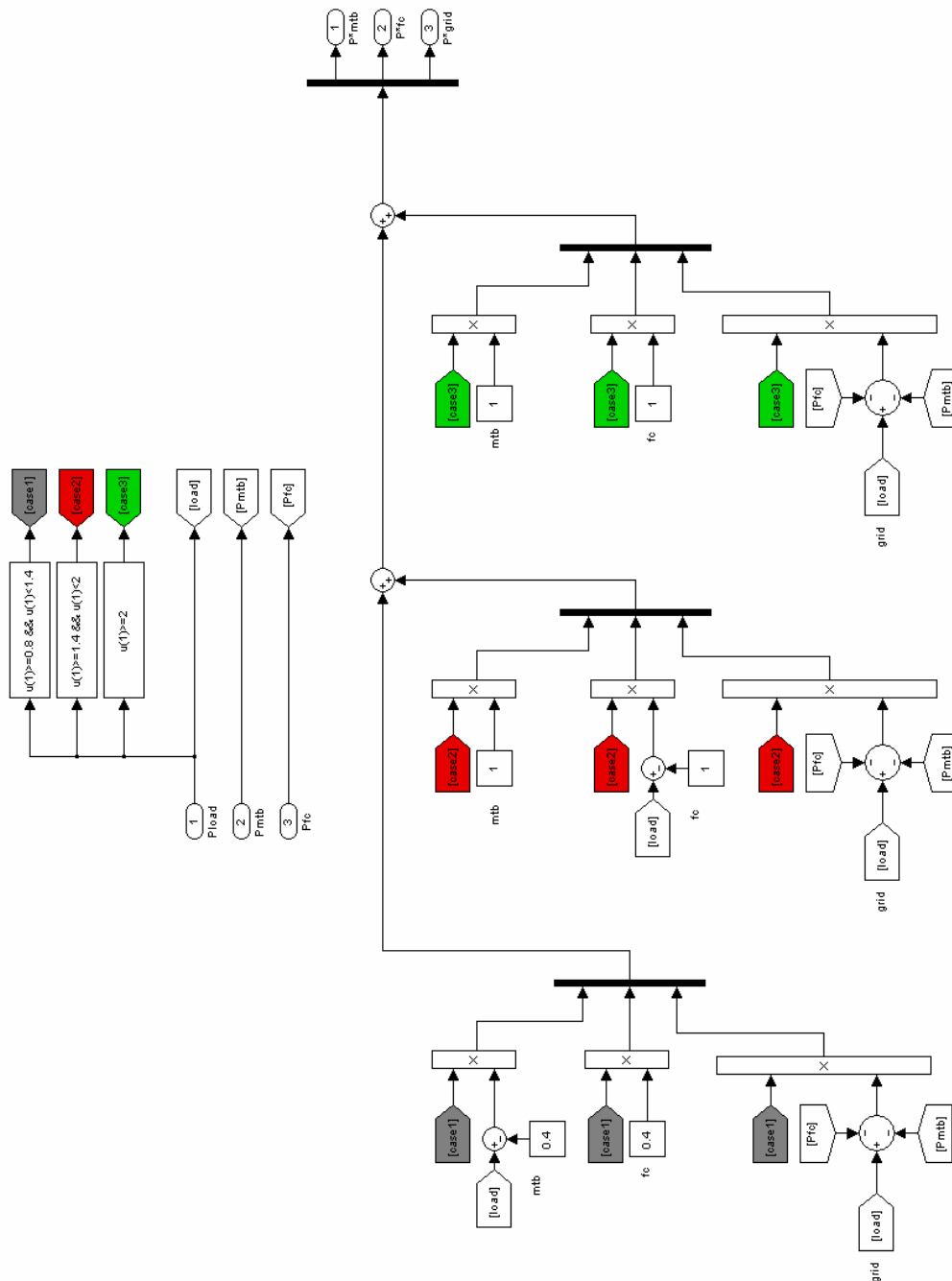
Η τελική ισχύς που παρέχεται από το σύστημα για την ικανοποίηση του φορτίου είναι το άθροισμα των ισχύων που παράγονται από όλες τις διαθέσιμες πηγές μας.

Στο σχήμα της επόμενης σελίδας παρουσιάζεται το block "Power Selector" που υλοποιεί τον αλγόριθμο της κατανομής της ισχύος με τον οποίο καλύπτουμε της ανάγκες του φορτίου μας σε ισχύ.

Σύμφωνα με τους κανονισμούς που έχουμε θέσει παραπάνω ορίζουμε 3 περιπτώσεις (3 cases) βάσει των οποίων ανάλογα με το φορτίο (την φαινόμενη ισχύ που ζητείται) αναθέτουμε σε κάθε μία από τις διαθέσιμες πηγές ισχύος την ισχύ που θα αναλάβει να καλύψει. Οι 3 περιπτώσεις είναι οι εξής:

- 0.8 έως 1.4 αμ: Διανεμημένη Παραγωγή 2 ( $\Delta 2$ ): 0.4 αμ  
Διανεμημένη Παραγωγή 1 ( $\Delta 1$ ): υπόλοιπη ισχύς
- 1.4 έως 2 αμ: Διανεμημένη Παραγωγή 1 ( $\Delta 1$ ): 1 αμ  
Διανεμημένη Παραγωγή 2 ( $\Delta 2$ ): υπόλοιπη ισχύς
- άνω των 2 αμ: Διανεμημένη Παραγωγή 1 ( $\Delta 1$ ): 1 αμ  
Διανεμημένη Παραγωγή 2 ( $\Delta 2$ ): 1 αμ  
Άπειρος ζυγός: υπόλοιπη ισχύς

Σε κάθε περίπτωση και μέχρι οι μονάδες διανεμημένης παραγωγής ενέργειας να αποκτήσουν την τιμή ισχύος που τους ανατίθεται, το δίκτυο δρα βοηθητικά για την κάλυψη του φορτίου.



ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΠΗΓΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (POWER SELECTOR)



Να σημειώσουμε ότι ως φορτίο θέτουμε φαινόμενη ισχύ, για την οποία μεταβάλλουμε τον συντελεστή ισχύος (σε διαφορετικά σενάρια). Η ισχύς που παράγεται στις διάφορες πηγές είναι επίσης η φαινόμενη με συντελεστή ισχύος ίδιο με αυτόν του φορτίου.

### 4.3 Προσομοίωση

Κατά την προσομοίωση ακολουθήσαμε διάφορα σενάρια, που παρουσιάζονται παρακάτω:

α) Θεωρούμε αρχικά ότι οι μονάδες διανεμημένης παραγωγής παρέχουν μόνο ενεργό ισχύ προς το φορτίο – καθαρά ωμικό – ενώ δε ζητείται καθόλου άεργος ισχύς από το δίκτυο.

β) Ως δεύτερη περίπτωση θεωρούμε εκείνη στην οποία έχουμε ζήτηση και άεργου ισχύος από το φορτίο (όχι ωμικό), με  $\Sigma I=0.8$ , το οποίο και παρέχεται από τις μικροπηγές.

Για τις δύο παραπάνω περιπτώσεις έχουμε τις παρακάτω υποπεριπτώσεις:

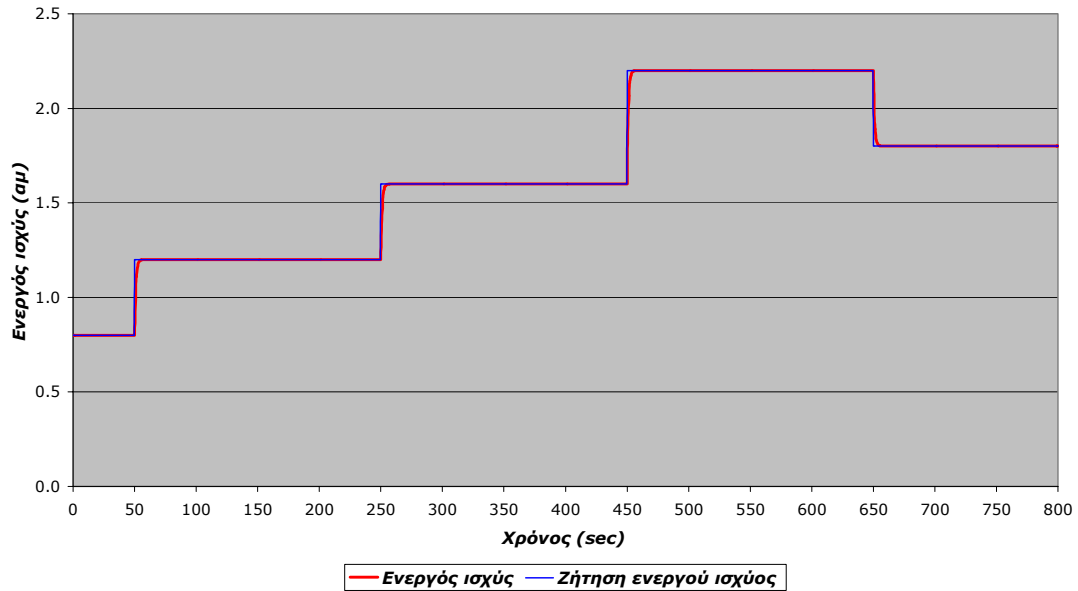
- i) Συμπεριφορά του δικτύου κατά την παροχή της απαιτούμενης από το φορτίο ισχύος μόνο από το δίκτυο – απομόνωση μικροπηγών.
- ii) Συμπεριφορά του δικτύου κατά την παροχή της ισχύος του φορτίου από όλες τις διαθέσιμες πηγές ενέργειας.
- iii) Συμπεριφορά δικτύου κατά την παροχή της ισχύος του φορτίου μόνο από το δίκτυο, για το οποίο αυξάνουμε το μήκος των γραμμών μεταφοράς από 10 χιλιόμετρα σε 50. Κρατάμε τα άλλα μήκη γραμμών σταθερά.
- iv) Συμπεριφορά του προαναφερθέντος δικτύου (γραμμή 50 km) με όλες τις πηγές ενέργειας διαθέσιμες.
- v) Συμπεριφορά του δικτύου με μόνες διαθέσιμες πηγές ενέργειας τις μικροπηγές (απουσία άπειρου ζυγού).

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε Simulink, Matlab™ παρουσιάζονται στη συνέχεια:

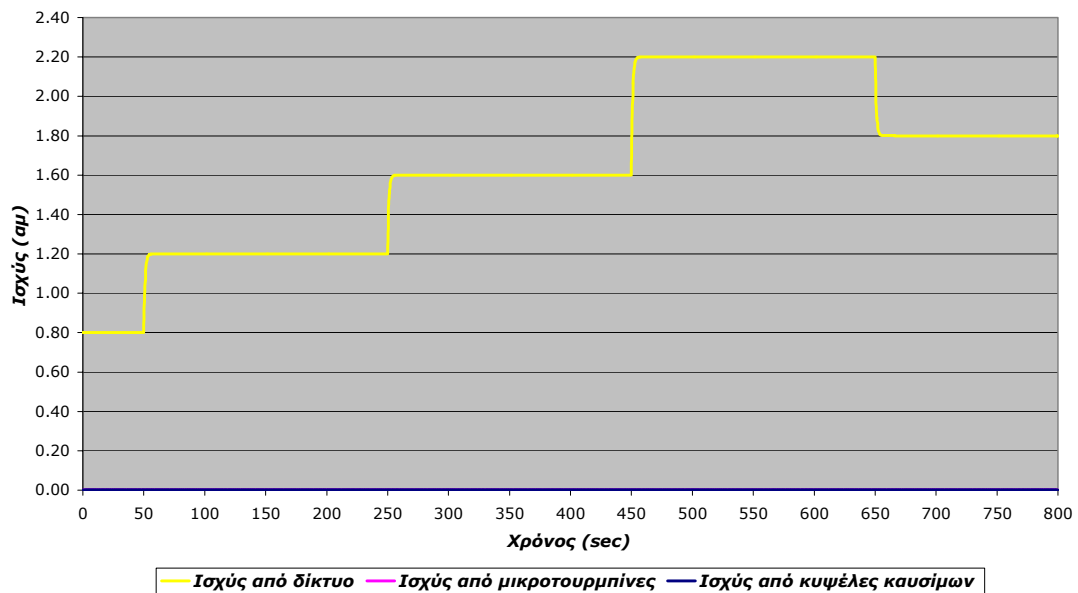
**4.3.α Ωμικό φορτίο (παροχή ενεργού μόνο ισχύος από μικροπηγές)  
Σ.Ι.=1**

**4.3.α.ι Συμπεριφορά του δικτύου κατά την παροχή της απαιτούμενης από το φορτίο ισχύος μόνο από το δίκτυο – απομόνωση μικροπηγών**

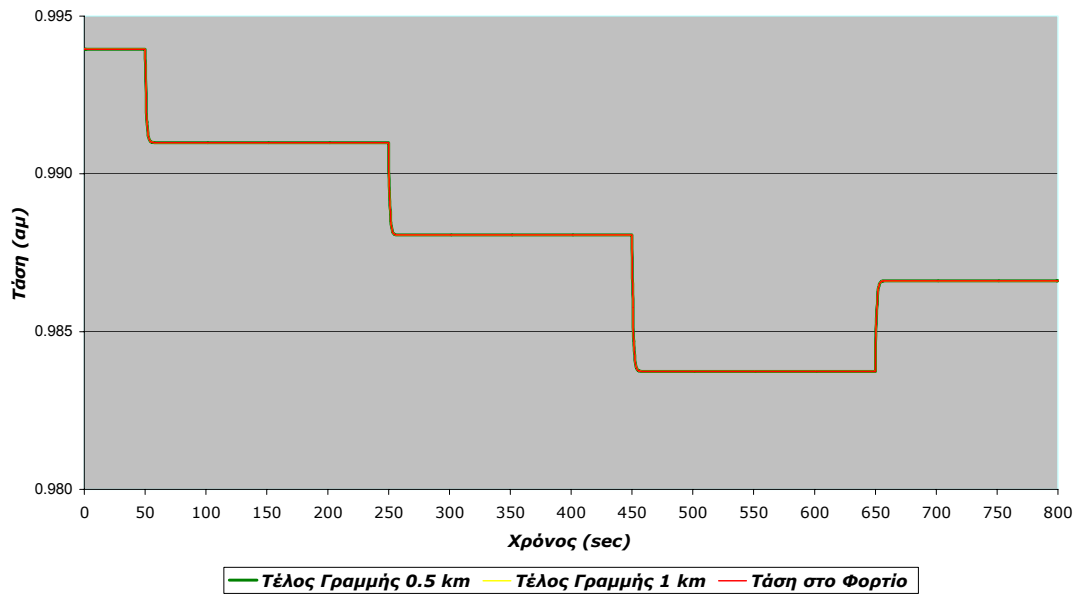
*Ενεργός ισχύς*



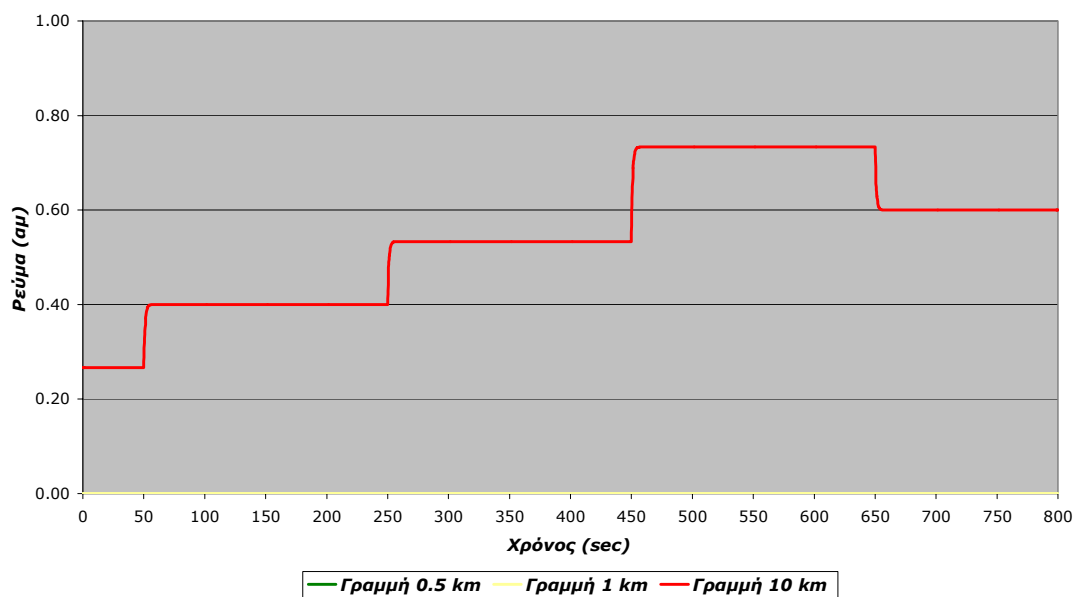
*Κατανομή ενεργού ισχύος*



### Τάσεις ζυγών



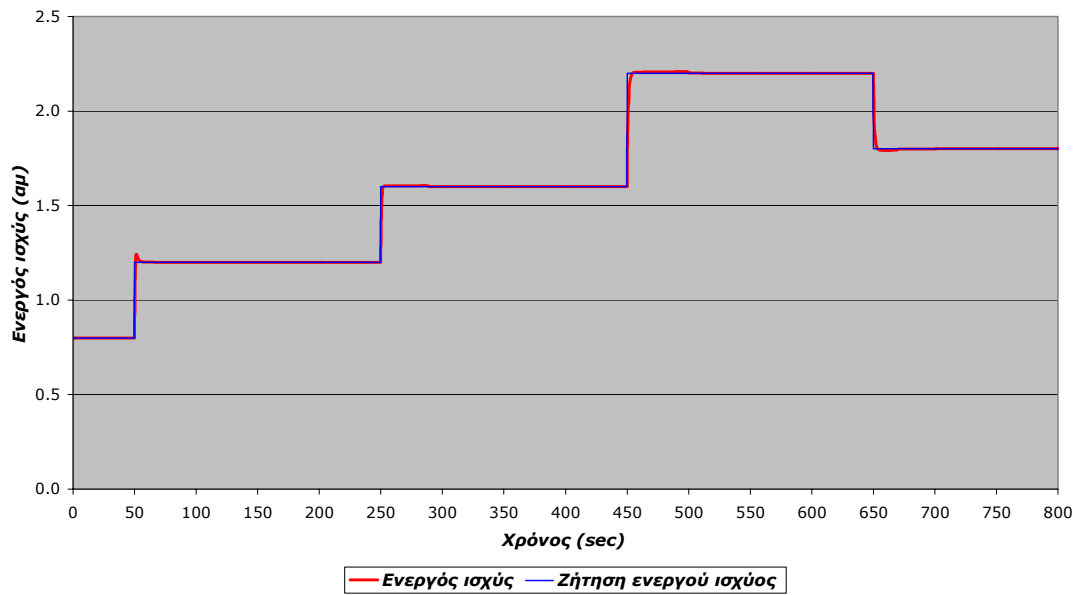
### Ρεύματα γραμμών



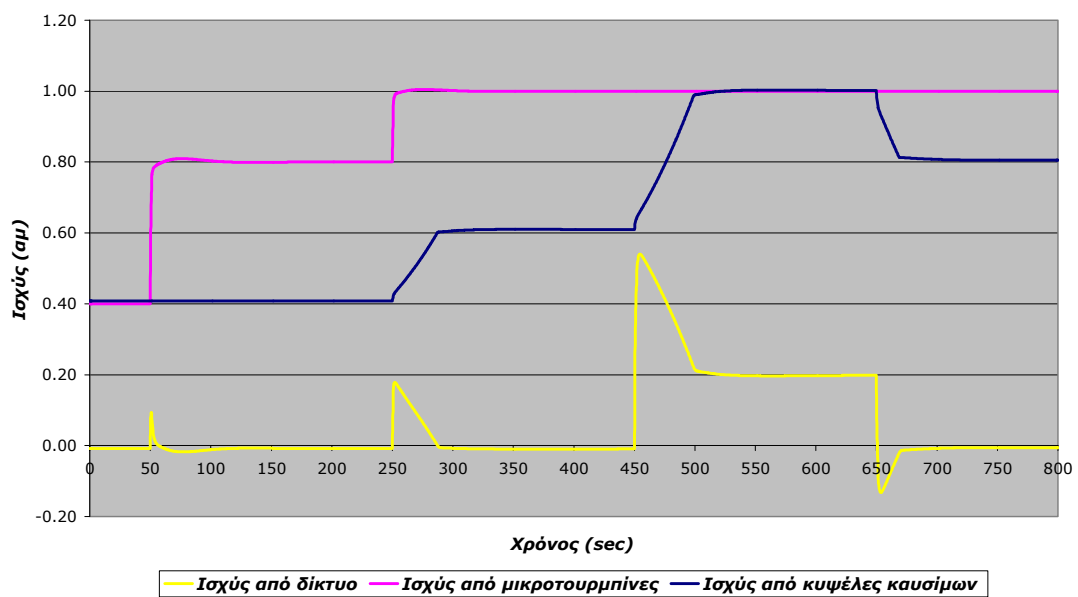
Κατά τη ζήτηση μόνο ενεργού ισχύος από το φορτίο, παρατηρούμε ότι το δίκτυο εξυπηρετεί σχεδόν άμεσα το φορτίο. Οι τάσεις των 3 ζυγών πλην του άπειρου είναι ταυτόσημες. Παρουσιάζουν πτώση τάσης (μέγιστη) κοντά στο 0.016 αμ ενώ από την σταθερή τάση (1 α.μ.) του άπειρου ζυγού. Ρεύμα προφανώς υπάρχει μόνο στη γραμμή από τον άπειρο ζυγό και η μορφή του είναι αντίστοιχη αυτής της ισχύος.

**4.3.α.ii Συμπεριφορά του δικτύου κατά την παροχή της ισχύος του φορτίου από όλες τις διαθέσιμες πηγές ενέργειας**

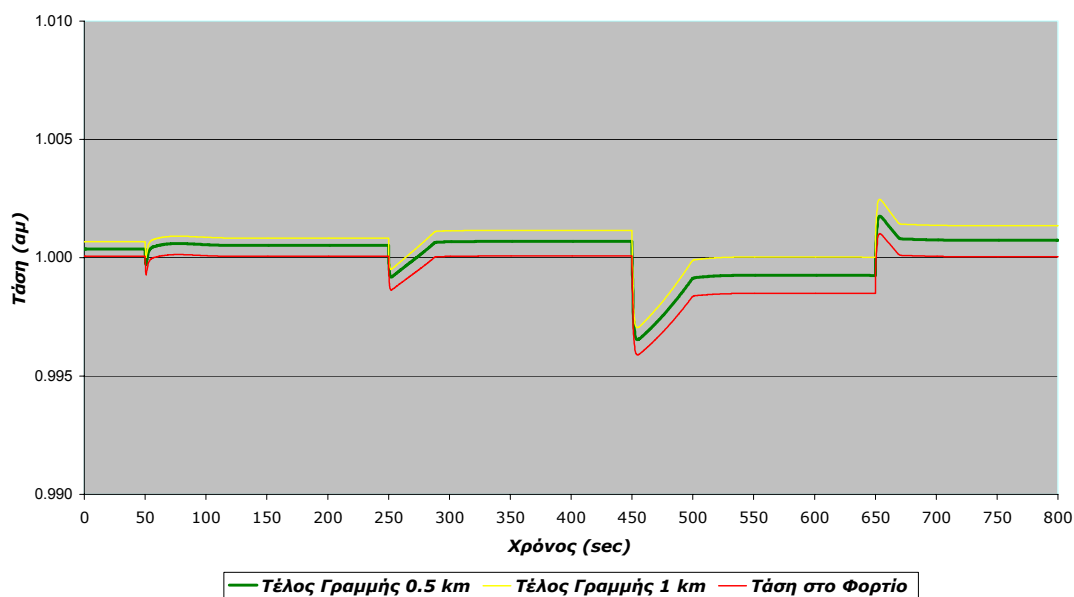
**Ενεργός ισχύς**



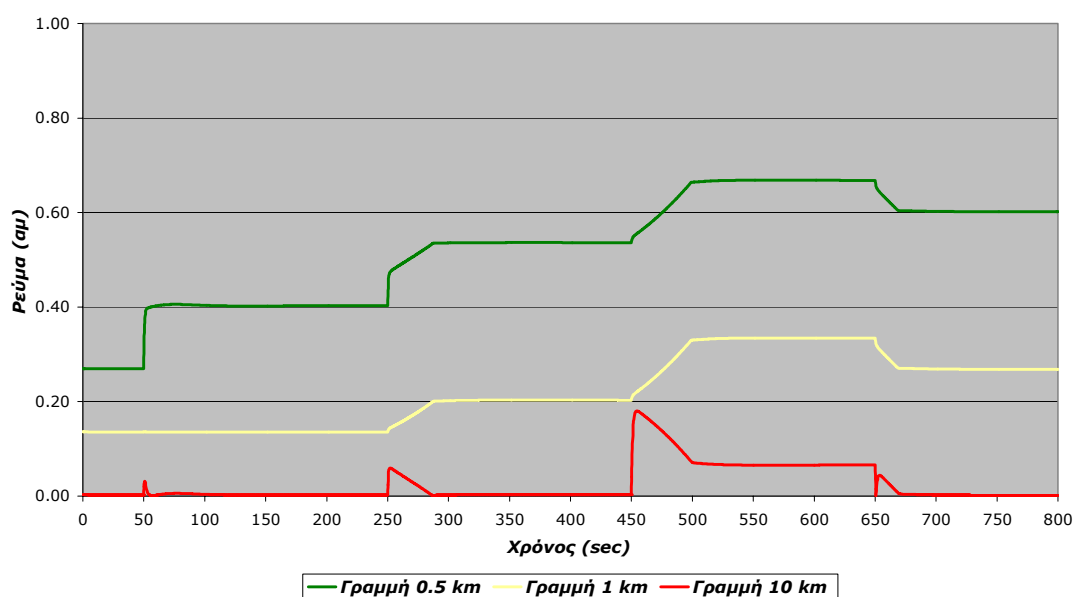
**Κατανομή ενεργού ισχύος**



### Τάσεις ζυγών



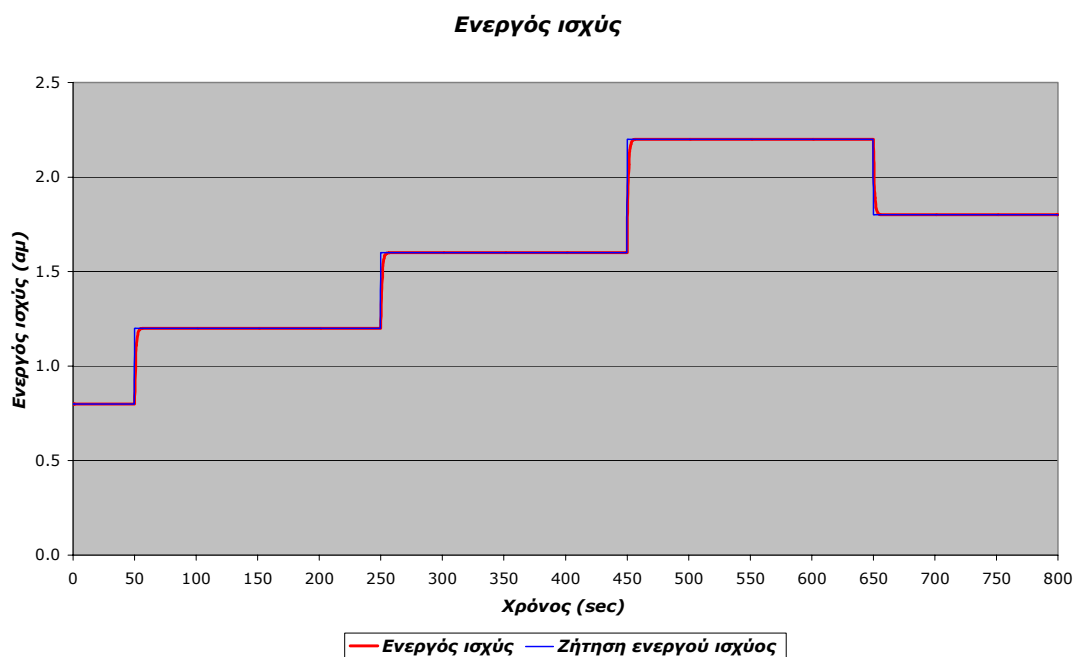
### Ρεύματα γραμμών



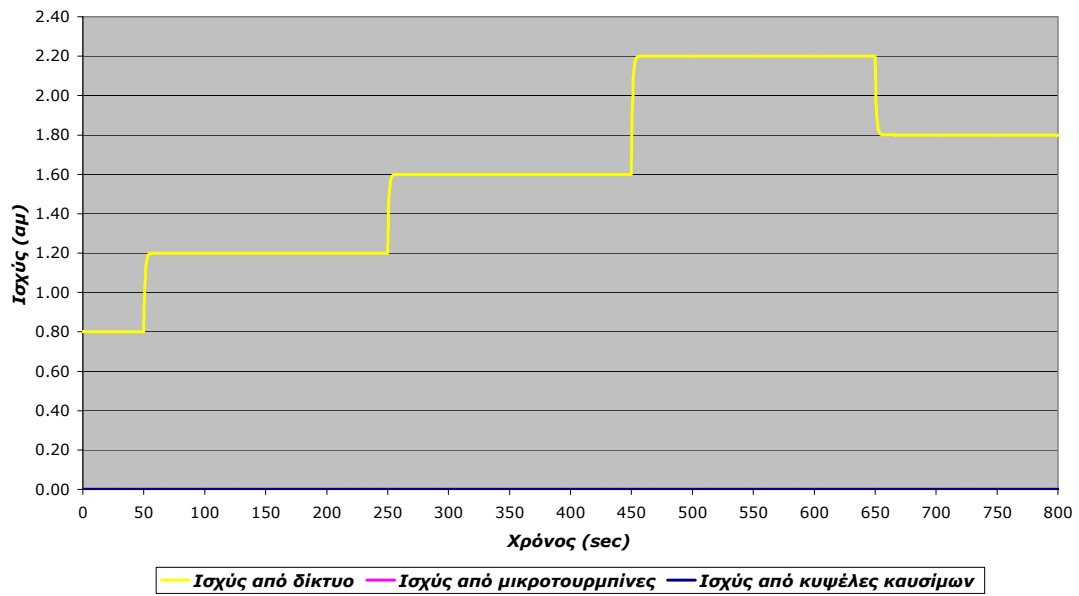
Με την παρουσία τώρα και των μικροπηγών, παρατηρούμε ότι ο τρόπος με τον οποίο αποκρίνεται το δίκτυο στη ζήτηση ισχύος δεν αλλάζει ουσιαστικά, αφού το δίκτυο καλύπτει άμεσα την αργή απόκριση των μικροπηγών. Παρ' όλα αυτά το γεγονός ότι οι μικροπηγές αναλαμβάνουν να εξυπηρετήσουν τώρα το φορτίο, προκαλεί σημαντική μείωση της πτώσης τάσης από τον άπειρο ζυγό στον ζυγό του φορτίου (0.004 αμ) εξαιτίας και της αντίστοιχης μείωσης (μηδενισμού σε μεγάλα χρονικά διαστήματα) στο ρεύμα που ρέει αυτήν τη γραμμή. Αντίστοιχα μικρές πτώσεις τάσεως (σε σχέση με αυτή του φορτίου) έχουμε και από τους άλλους ζυγούς προς το φορτίο, αυτήν τη φορά λόγω των πολύ μικρών γραμμών μεταφοράς που ενώνουν τους ζυγούς και της, κατά συνέπεια, πολύ μικρής σύνθετης αντίστασης που εμφανίζουν αυτές. Σημειώνουμε ότι η γραμμή των 0.5 km καλείται να μεταφέρει το ρεύμα και των δύο μικροπηγών. Δηλαδή το ρεύμα της γραμμής του 1 km (Γραμμή 3) μεταφέρεται (αθροίζεται) στο ρεύμα που

παράγεται από τη μικροπηγή Δ1. Επιπλέον να εξηγήσουμε ότι κατά τη ζήτηση ισχύος 2.2 α.μ., η ισχύς που μπορούν να αποδώσουν συνολικά οι μικροπηγές δεν επαρκεί και έτσι το δίκτυο καλείται να συνεισφέρει ισχύ 0.2 α.μ., από όπου και το αντίστοιχο ρεύμα. Να σημειώσουμε ότι σε κάποιες χρονικές στιγμές παρατηρείται ένα πολύ μικρό ρεύμα που κινείται με φορά προς τον άπειρο ζυγό. Αυτό οφείλεται στο ότι οι μικροπηγές (κυρίως οι κυψέλες καυσίμων) δίνουν ελάχιστη παραπάνω ισχύ (+0.01 αμ περίπου) από αυτήν που ζητείται και αυτή συνεπώς – ως περίσσεια – μεταφέρεται προς τον άπειρο ζυγό. Αποτέλεσμα, σε αυτές τις χρονικές στιγμές, η τάση στο φορτίο να είναι μεγαλύτερη αυτού του ζυγού (πτώση τάσης προς τον άπειρο ζυγό σε τιμές της τάξης του 4<sup>ου</sup> δεκαδικού ψηφίου σε αμ μεγέθη).

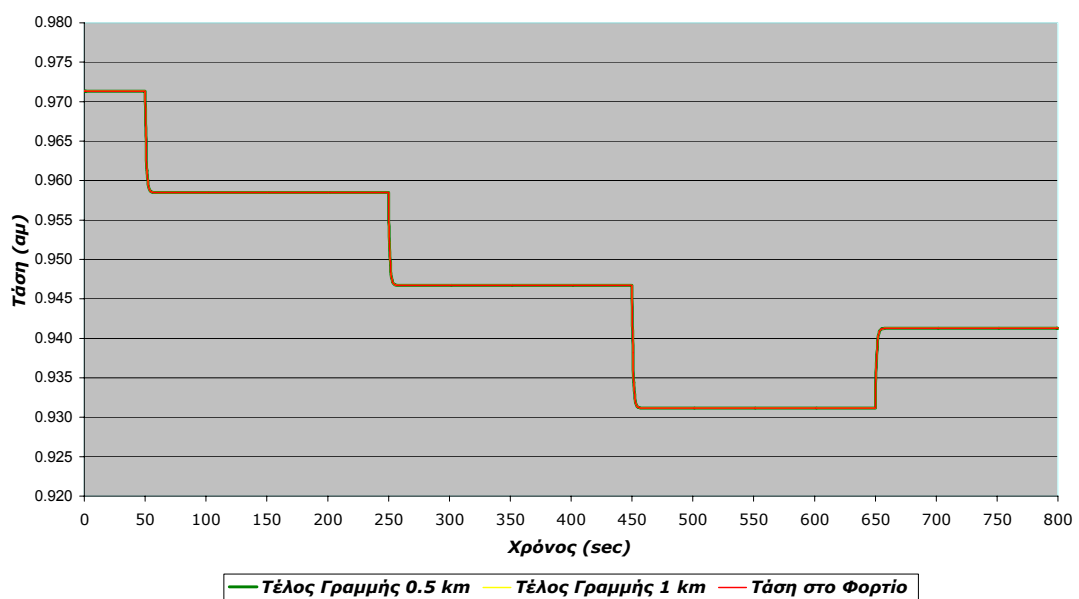
**4.3.α.iii Συμπεριφορά δικτύου κατά την παροχή της ισχύος του φορτίου μόνο από το δίκτυο, για το οποίο αυξάνουμε το μήκος των γραμμών μεταφοράς από 10 χιλιόμετρα σε 50. Κρατάμε τα άλλα μήκη γραμμών σταθερά.**



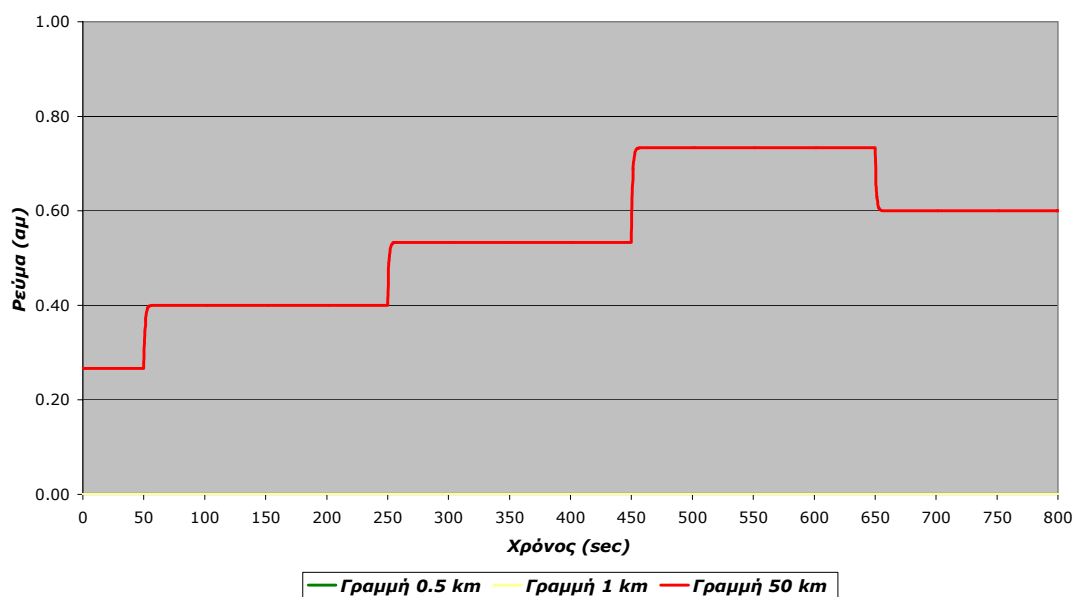
### Κατανομή ενεργού ισχύος



### Τάσεις ζυγών



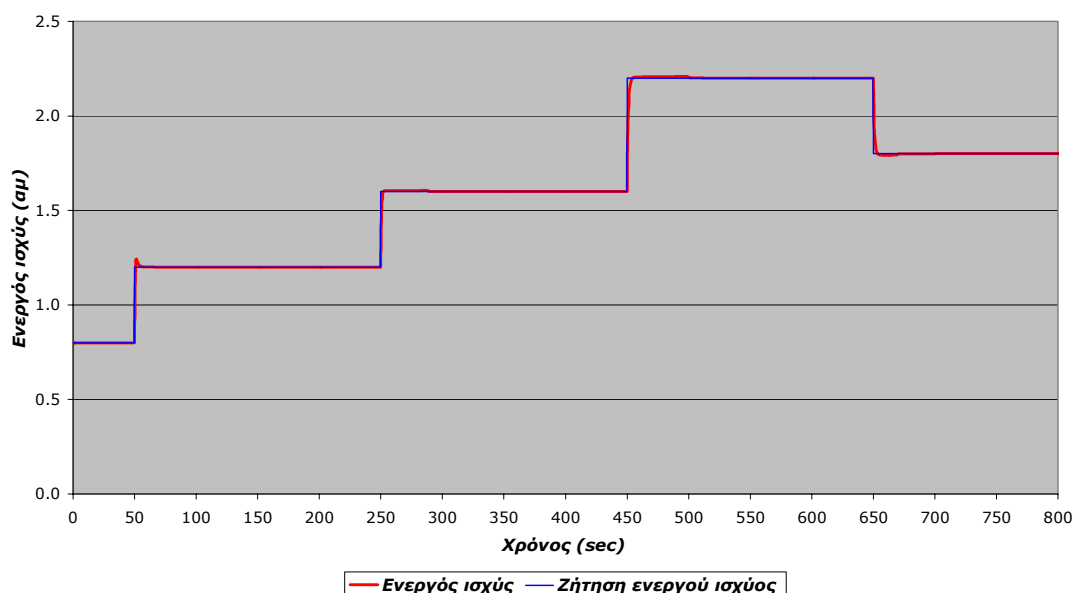
### Ρεύματα γραμμών



Το δίκτυο μας σε αυτήν την περίπτωση μας αλλάζει σημαντικά. Η γραμμή διασύνδεσης του φορτίου με τον άπειρο ζυγό γίνεται 5 φορές μεγαλύτερη (50 km). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να έχουμε μια μεγάλη πτώση τάσης στον ζυγό του φορτίου που φτάνει στις αιχμές του φορτίου σε 0.07 αμ περίπου.

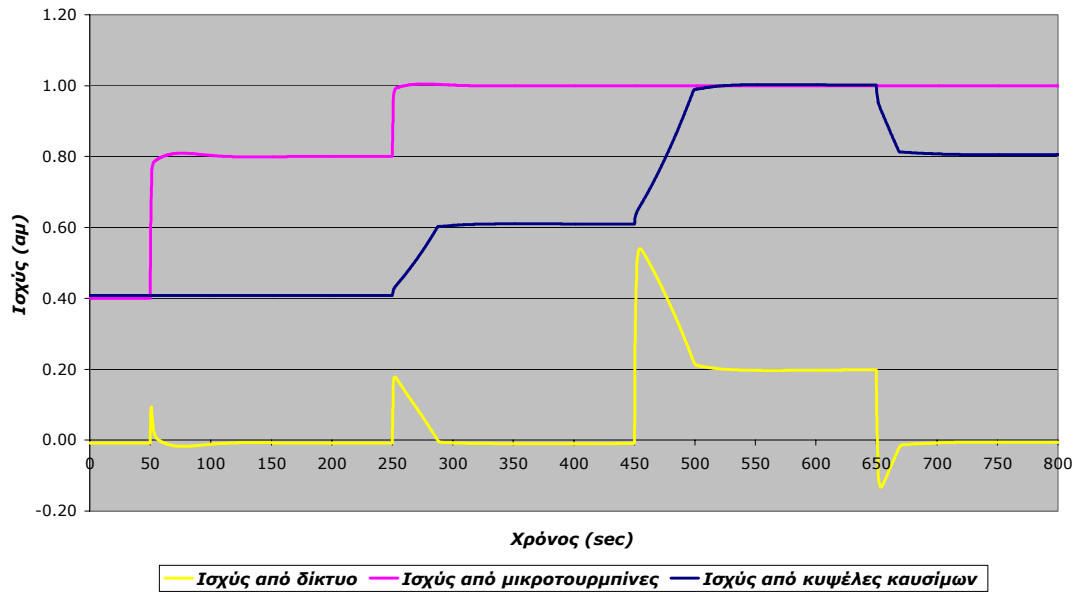
#### 4.3.α.ιv Συμπεριφορά του προαναφερθέντος δικτύου (γραμμή 50 km) με όλες τις πηγές ενέργειας διαθέσιμες

### Ενεργός ισχύς

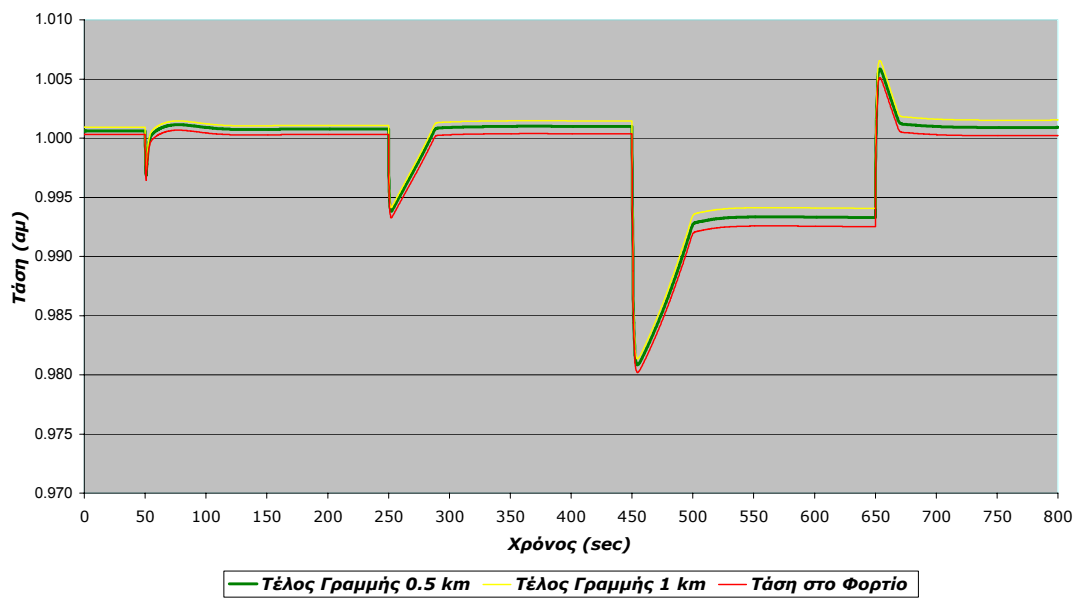




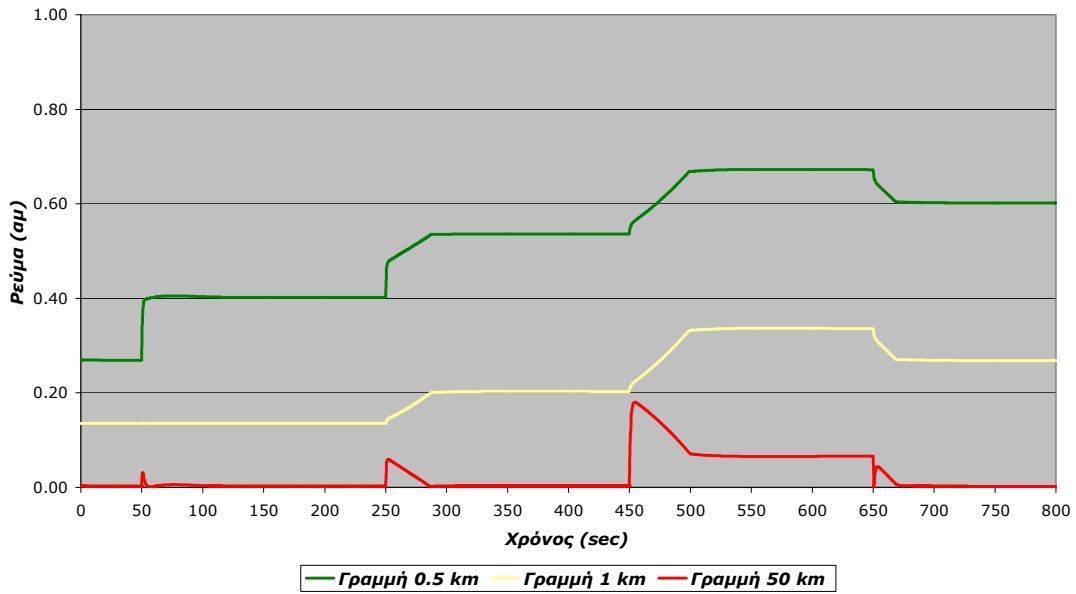
### Κατανομή ενεργού ισχύος



### Τάσεις ζυγών



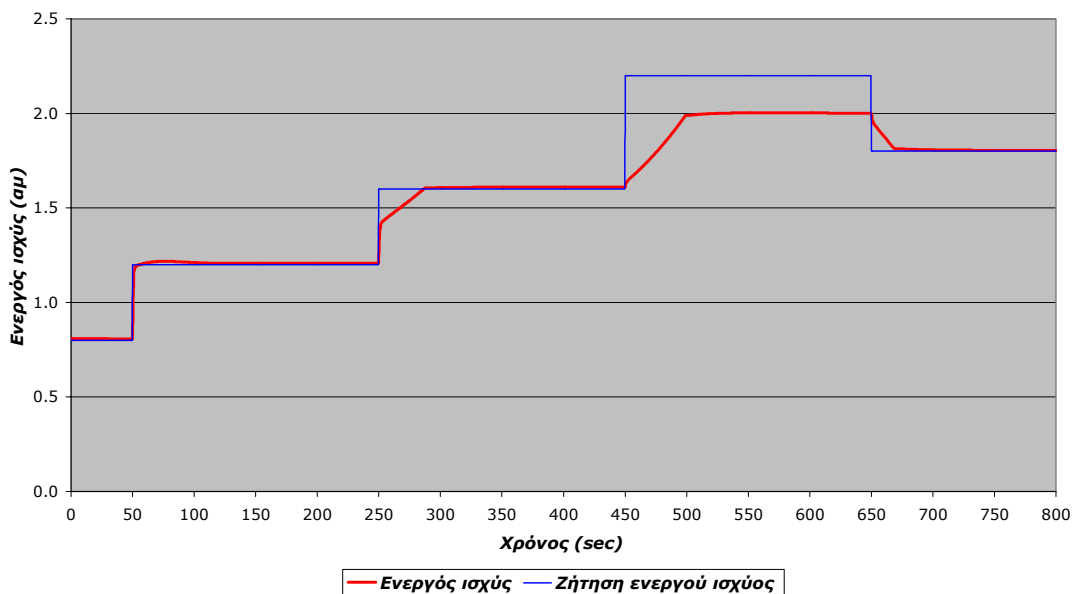
### Ρεύματα γραμμών



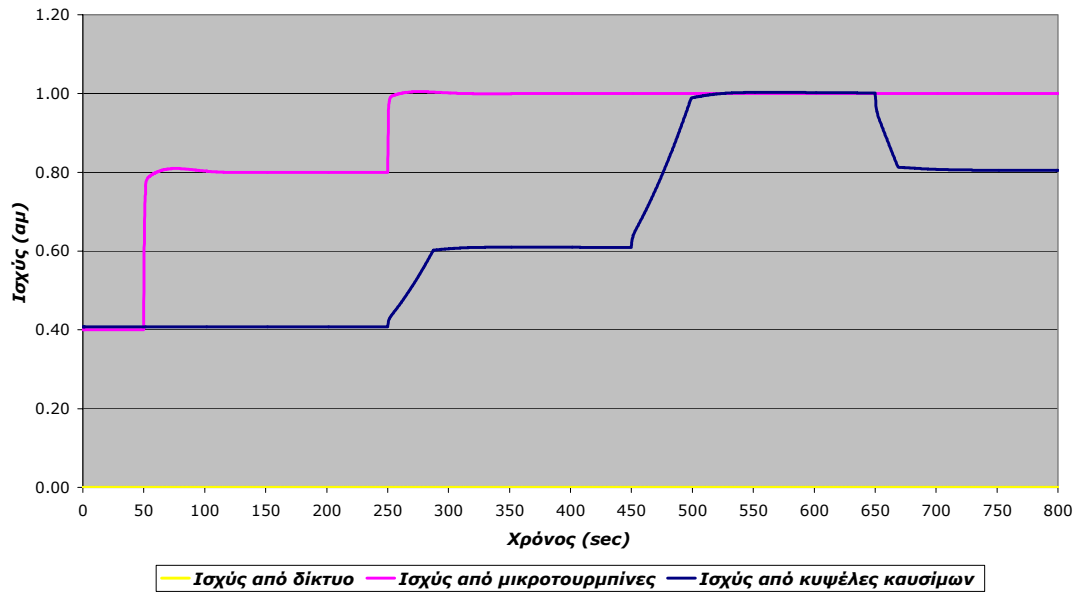
Με όλες τις πηγές διαθέσιμες, το προηγούμενο δίκτυο, ανταποκρίνεται πολύ πιο ομαλά. Αυτή η πιο ομαλή συμπεριφορά αντικατοπτρίζεται στις τάσεις, με μέγιστη πτώση τάσης από τον άπειρο ζυγό στον ζυγό του φορτίου το 0.02 α.μ. Οι πτώσεις τάσης μεταξύ των υπόλοιπων ζυγών παραμένουν ουσιαστικά ανύπαρκτες (σε τιμές της τάξης του 4<sup>ου</sup> δεκαδικού ψηφίου σε αμ μεγέθη).

#### 4.3.α.ν Συμπεριφορά του προαναφερθέντος δικτύου με μόνες διαθέσιμες πηγές ενέργειας τις μικροπηγές (απουσία άπειρου ζυγού).

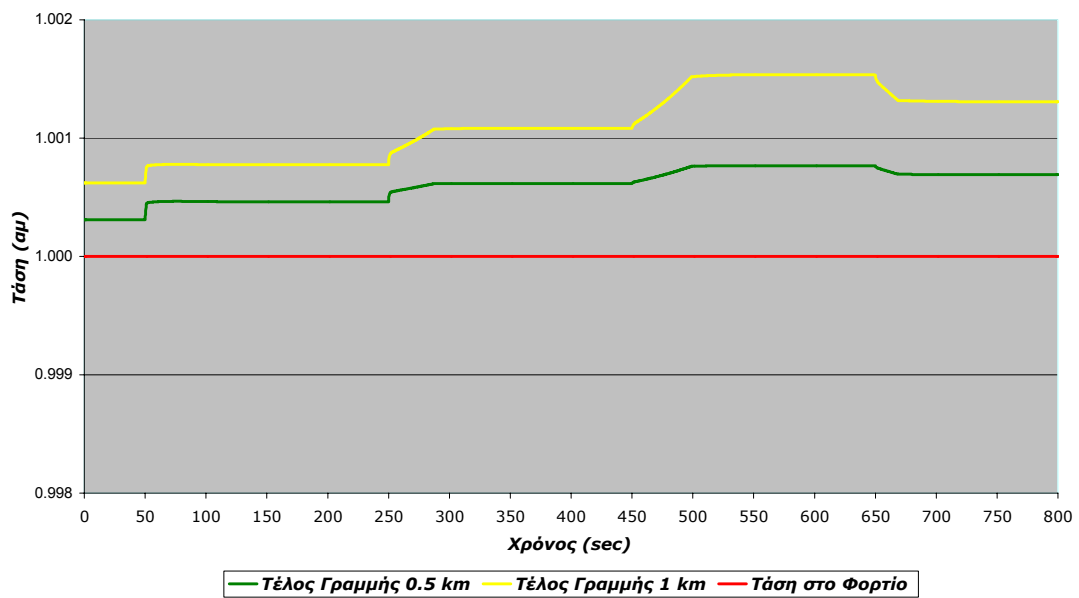
### Ενεργός ισχύς



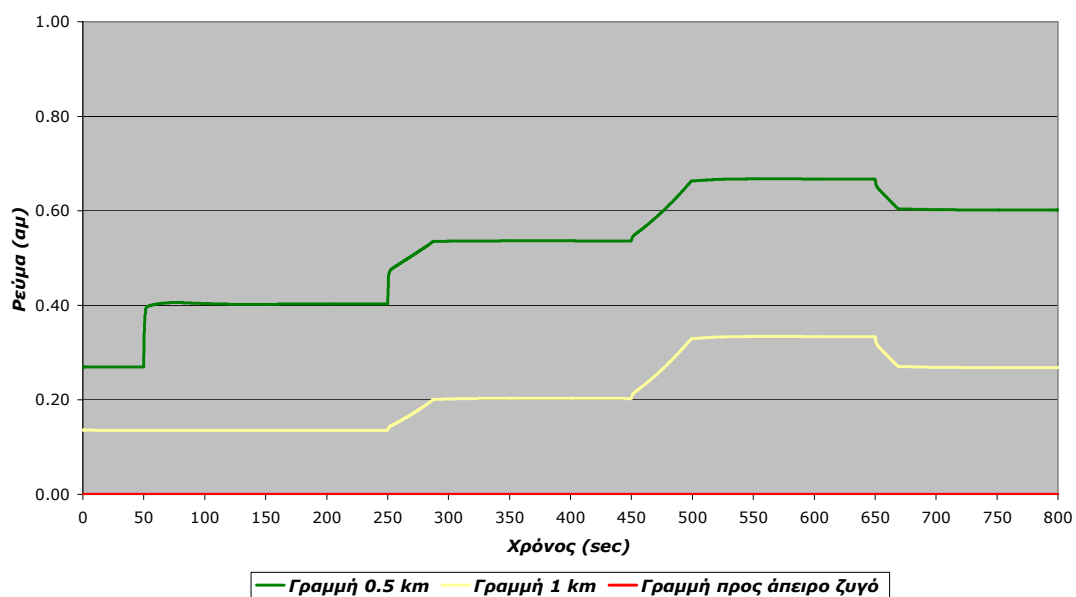
### Κατανομή ενεργού ισχύος



### Τάσεις ζυγών



### Ρεύματα γραμμών

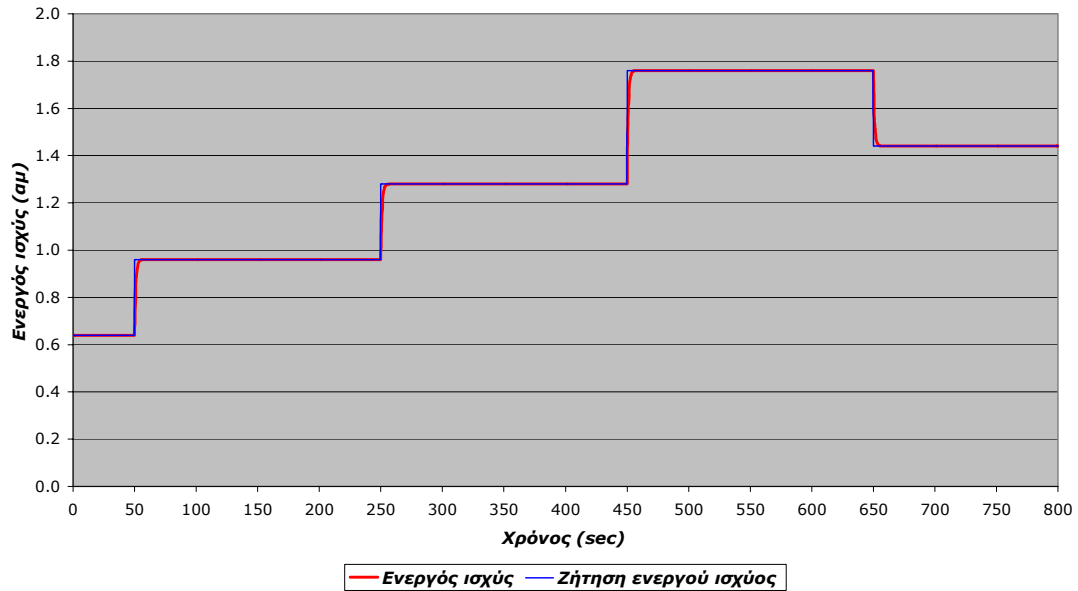


Όταν το δίκτυο λειτουργεί χωρίς την παρουσία του άπειρου ζυγού, το πρώτο που μπορεί κανείς να παρατηρήσει είναι η αδυναμία των μικροπηγών να εξυπηρετήσουν το σύνολο του φορτίου. Πέρα από αυτό η εξυπηρέτηση της ζήτησης ισχύος καθυστερεί λόγω της αργής απόκρισης των μικροπηγών στις αυξήσεις του φορτίου. Οι πτώσεις τάσεις στους ζυγούς είναι πολύ μικρές (μέγιστη περίπου 0.0008 α.μ. από ζυγό σε ζυγό), ενώ η τάση στον ζυγό του φορτίου είναι 1 αμ.

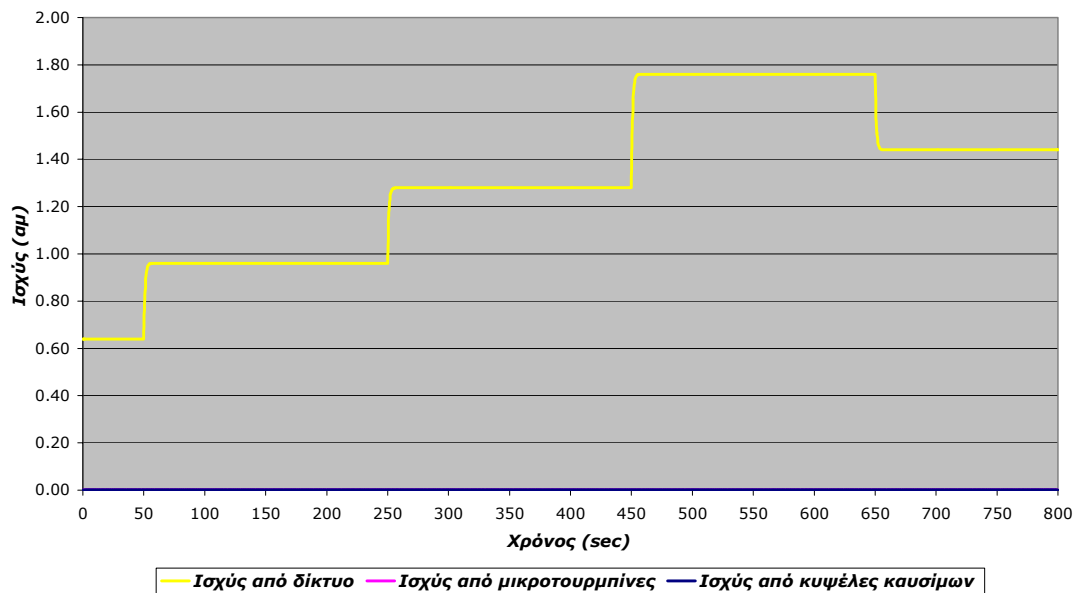
### 4.3.β Επαγωγικό φορτίο (παροχή και άεργου ισχύος από μικροπηγές) Σ.Ι.=0.8

#### 4.3.β.ι Συμπεριφορά του δικτύου κατά την παροχή της απαιτούμενης από το φορτίο ισχύος μόνο από το δίκτυο – απομόνωση μικροπηγών

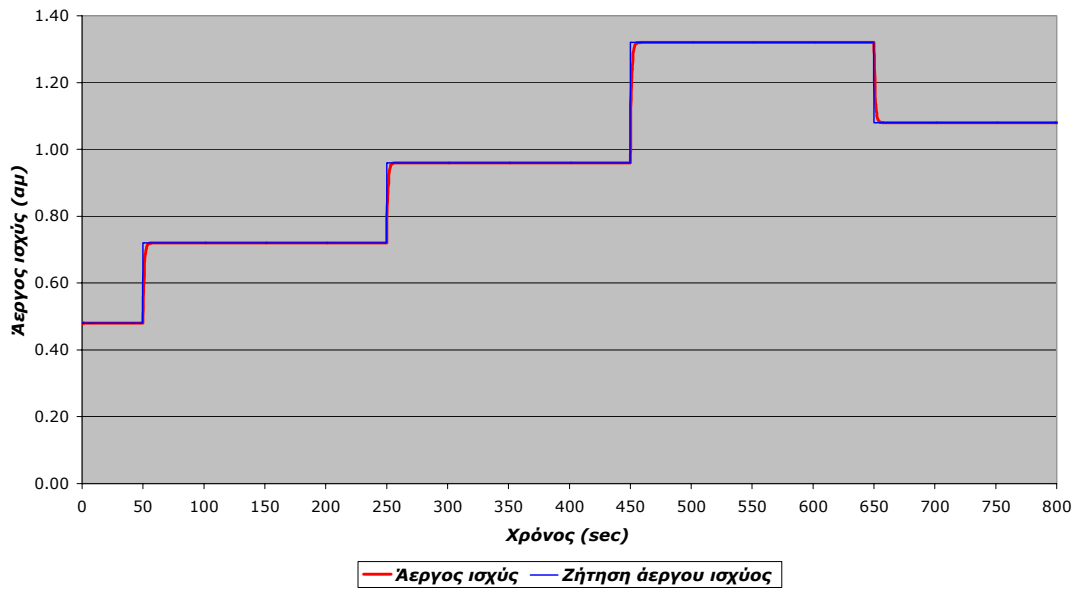
Ενεργός ισχύς



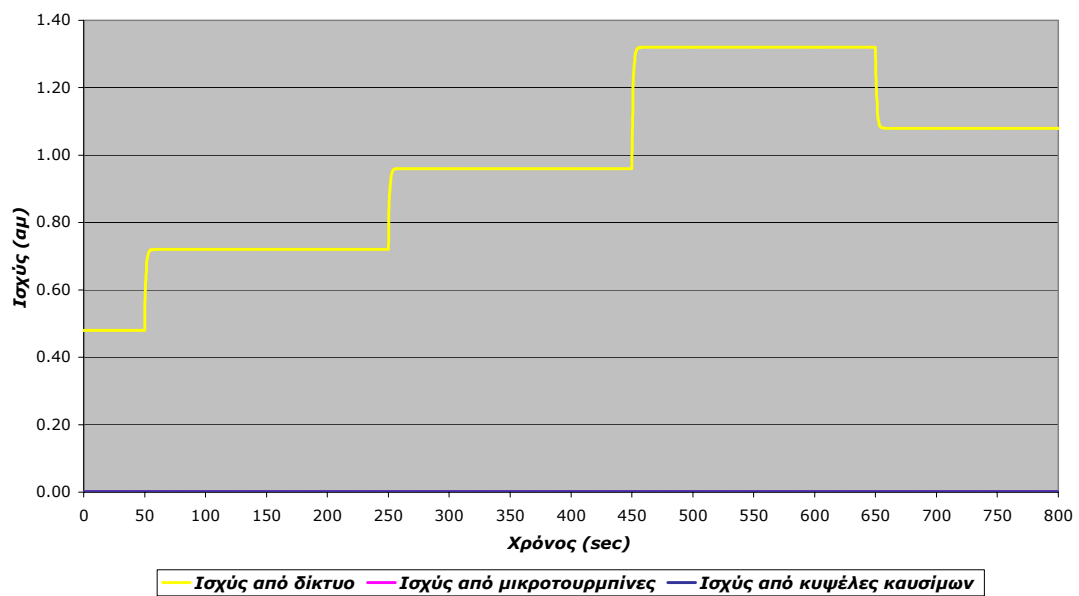
Κατανομή ενεργού ισχύος



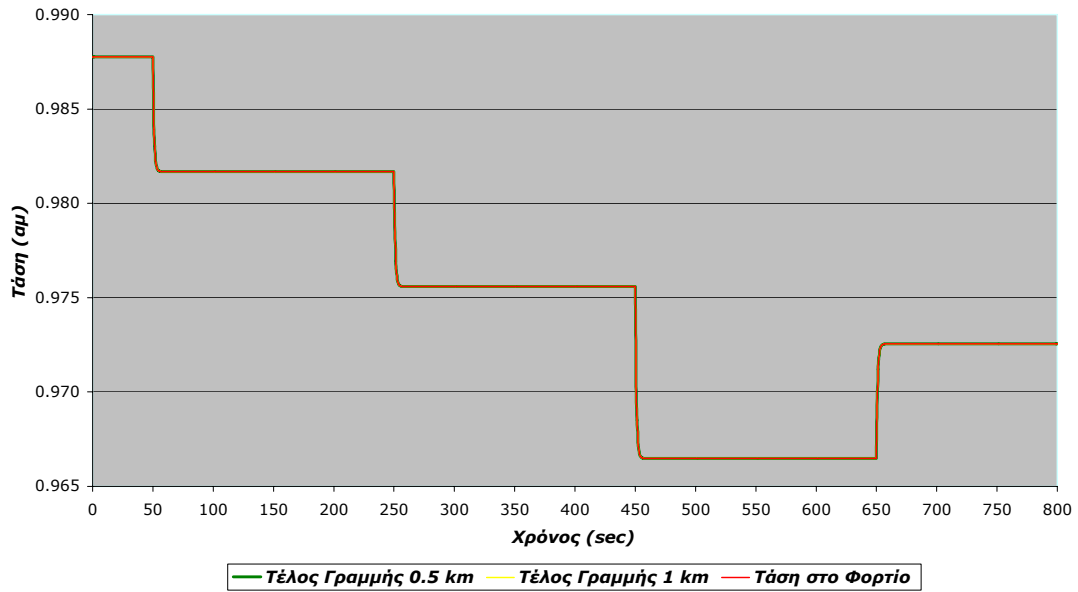
### Άεργος ισχύς



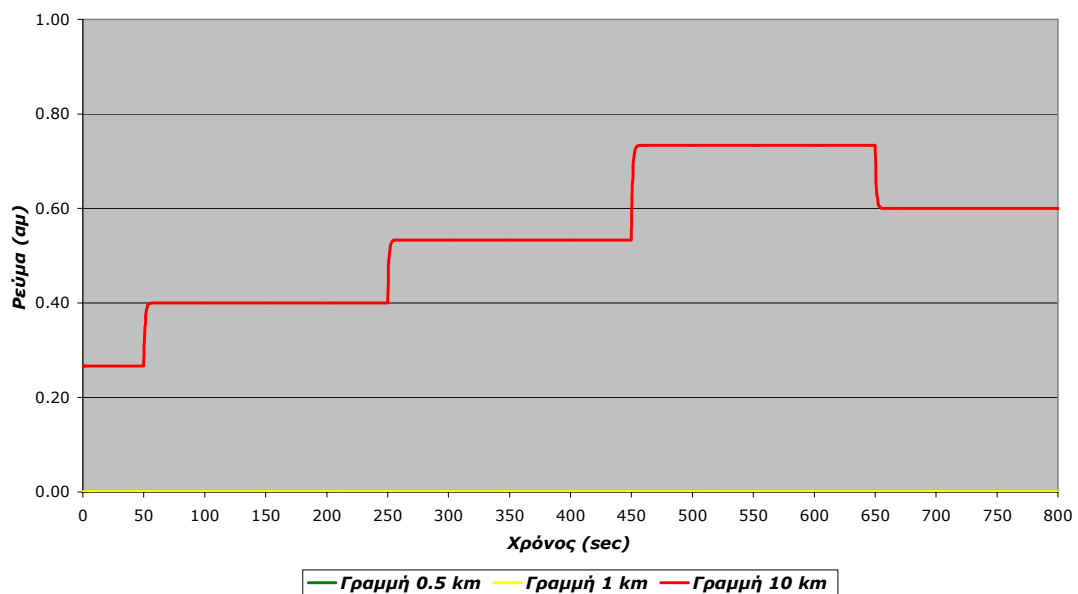
### Κατανομή αέργου ισχύος



### Τάσεις ζυγών



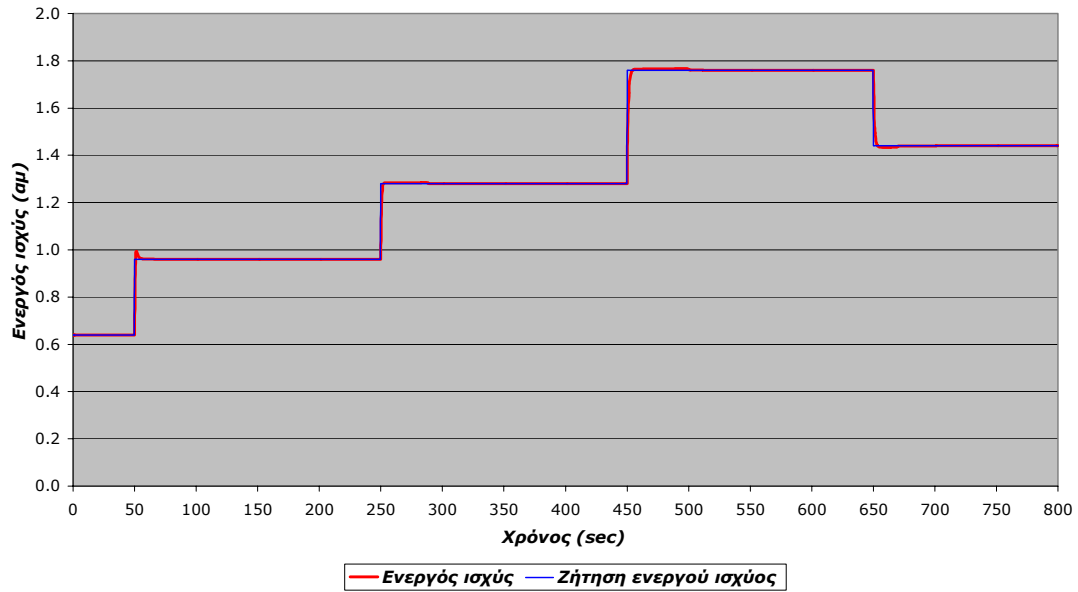
### Ρεύματα γραμμών



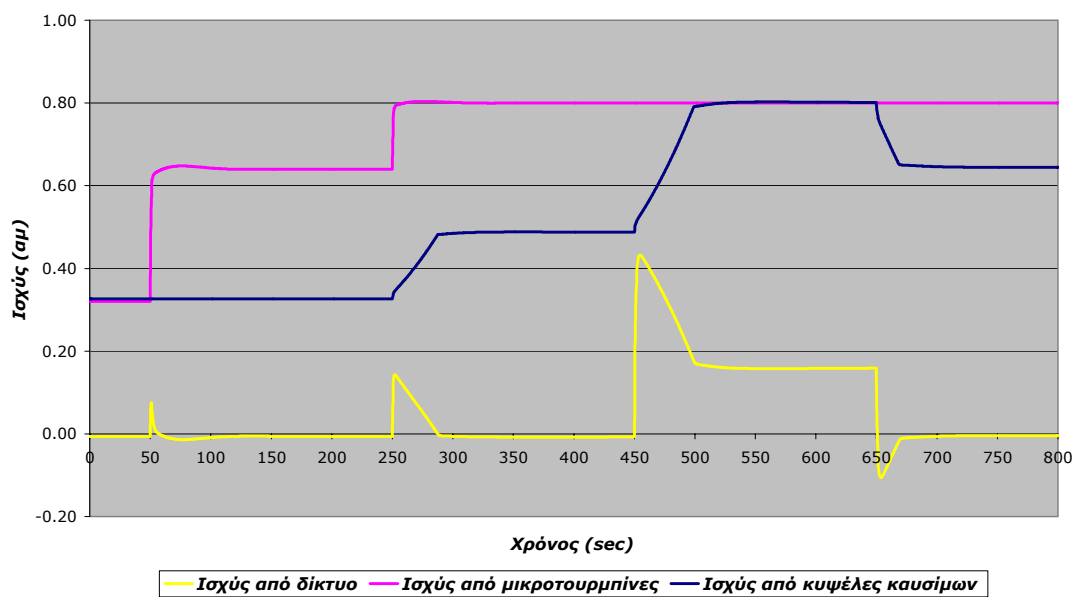
Κατά τη ζήτηση ενεργού και άεργου ισχύος από το φορτίο ( $\Sigma.I.=0.8$ ), παρατηρούμε ότι το δίκτυο ανταποκρίνεται, όπως και για  $\Sigma.I.=1$  άμεσα στην εξυπηρέτηση του φορτίου. Η άεργος παρουσιάζει μια πολύ μικρή διακύμανση (μέγιστη διακύμανση 0.1 α.μ.) που διαρκεί λίγα sec. Οι τάσεις των 3 ζυγών πλην του άπειρου είναι ταυτόσημες. Από τον άπειρο ζυγό προς τον ζυγό του φορτίου παρουσιάζεται μια σημαντική πτώση τάσης που φτάνει το 0.034 αμ. Το ρεύμα της γραμμής των 10 km ακολουθεί ομαλή πορεία και αντίστοιχη αυτής της ισχύος. Συγκρίνοντας την περίπτωση αυτή με την αντίστοιχη για παρουσία μόνο ενεργού φορτίου, παρατηρούμε τη σημαντικά μεγαλύτερη πτώση τάσης (πάνω από διπλάσια) από τον άπειρο στον ζυγό φορτίου, με την παρουσία και άεργου φορτίου.

**4.3.β.ii Συμπεριφορά του δικτύου κατά την παροχή της ισχύος του φορτίου από όλες τις διαθέσιμες πηγές ενέργειας**

**Ενεργός ισχύς**

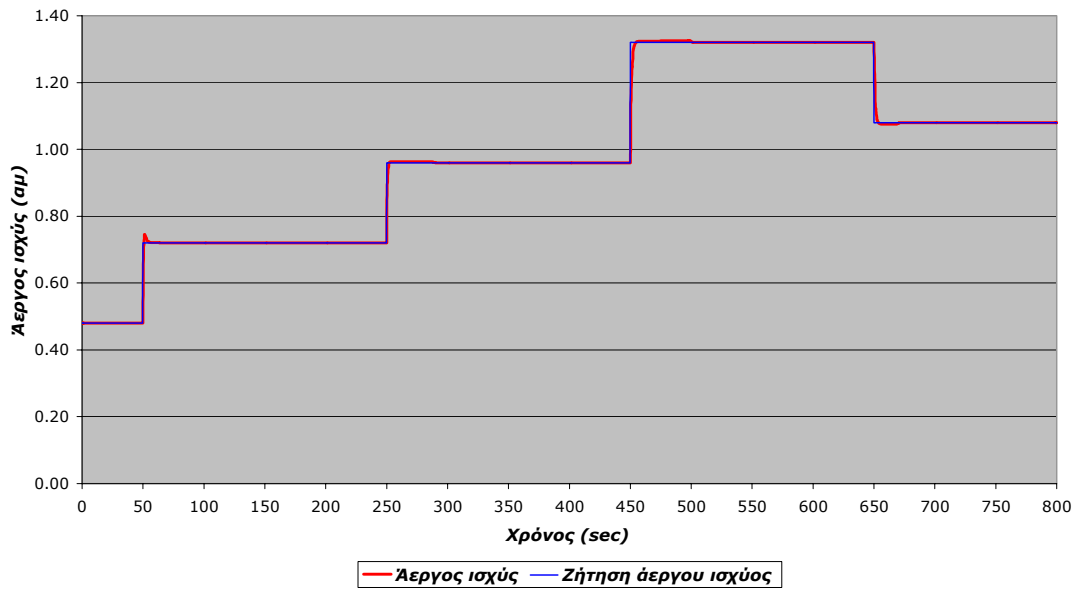


**Κατανομή ενεργού ισχύος**

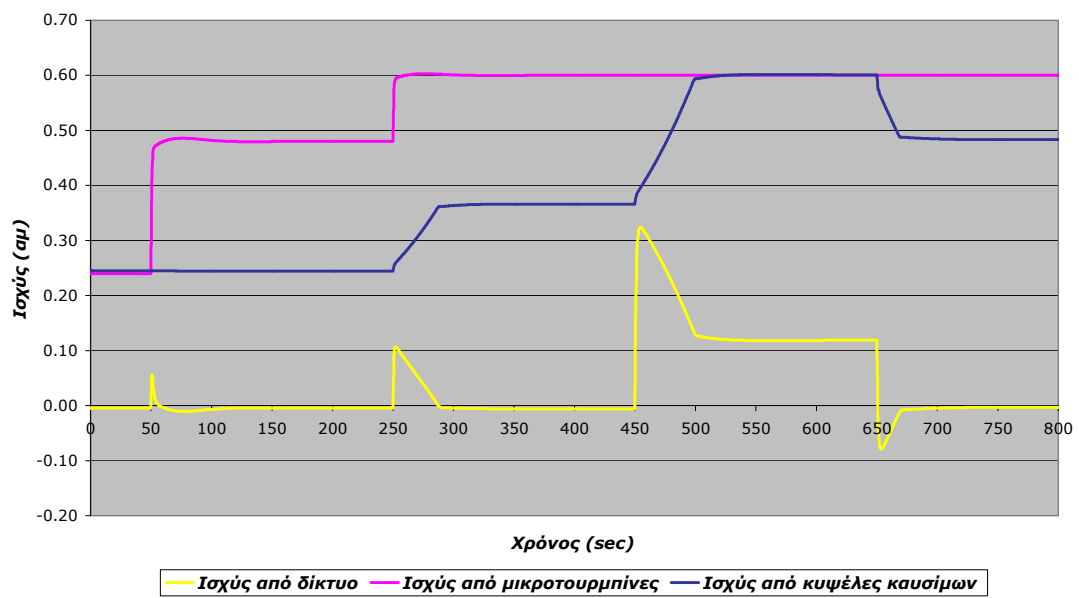




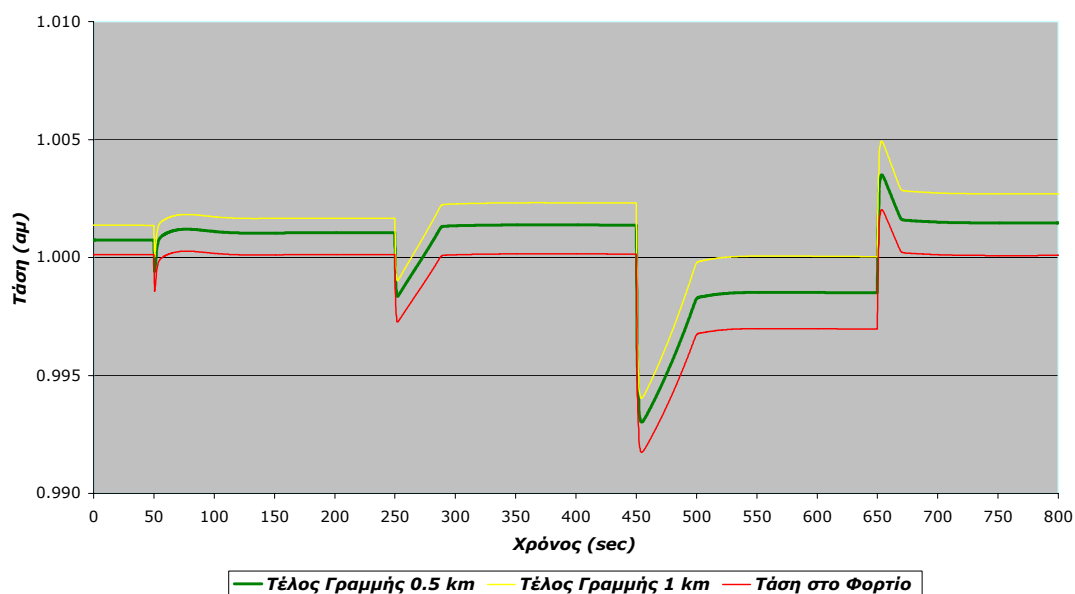
### Άεργος ισχύς



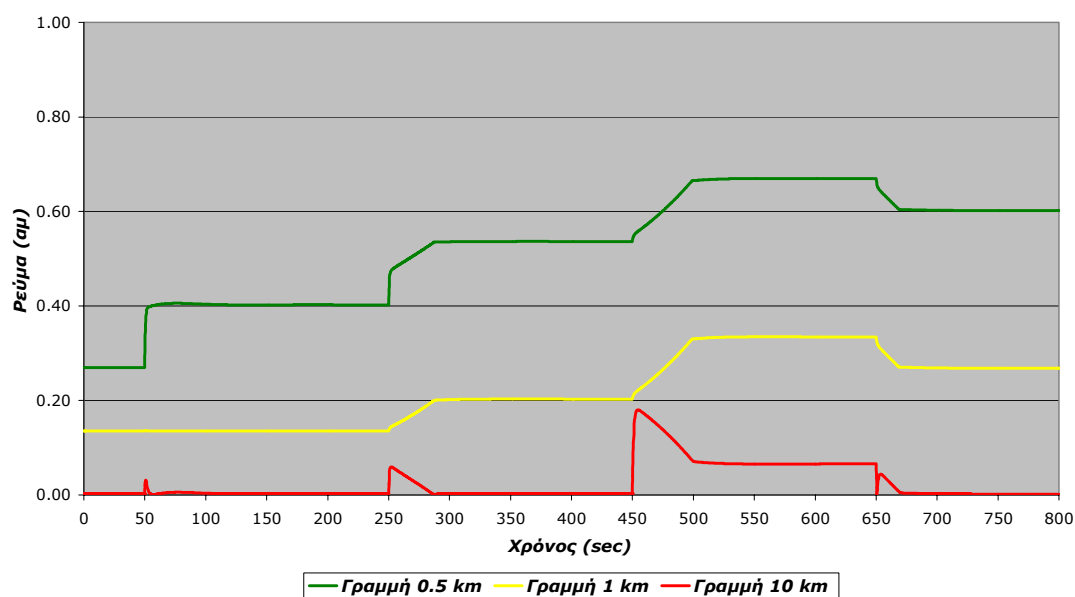
### Κατανομή αέργου ισχύος



### Τάσεις ζυγών



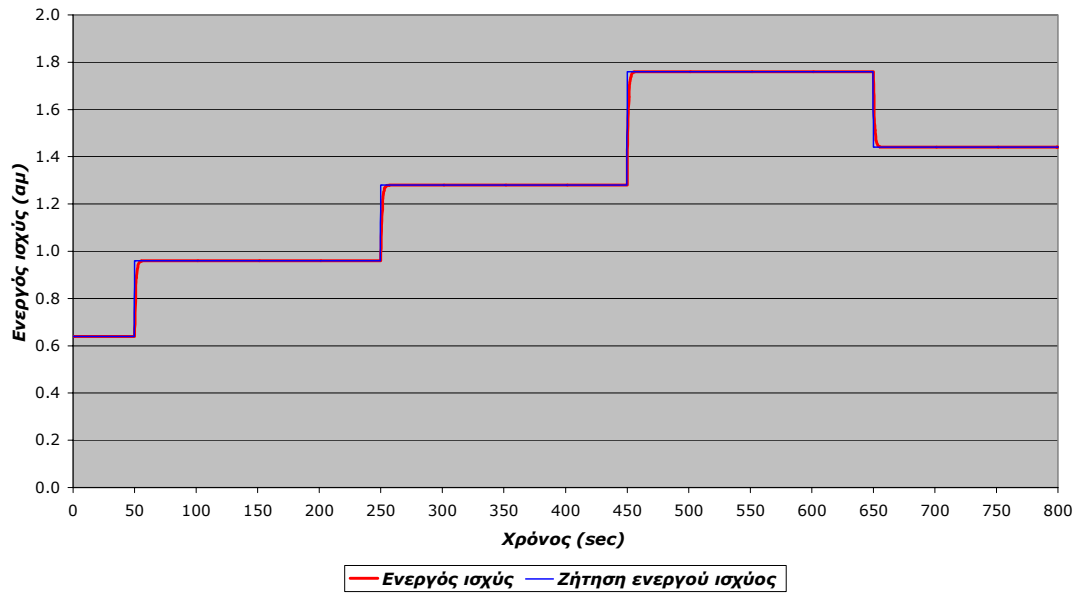
### Ρεύματα γραμμών



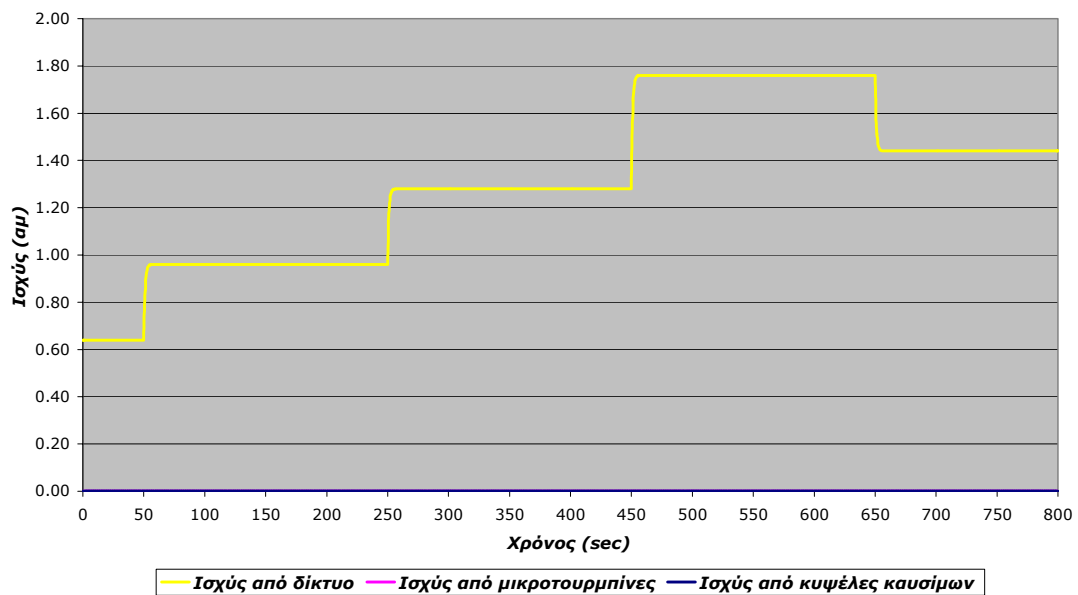
Με την παρουσία τώρα και των μικροπηγών, παρατηρούμε και πάλι ότι ο τρόπος με τον οποίο αποκρίνεται το δίκτυο στη ζήτηση ισχύος δεν αλλάζει ουσιαστικά. Αυτήν τη φορά η πτώση τάσης μεταξύ του ζυγού του φορτίου (και του άπειρου ζυγού) είναι πολύ μικρότερη (μέγιστη 0.008 αμ). Αν εξετάσουμε τις γραφικές του ρεύματος στις γραμμές θα διαπιστώσουμε ότι σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, που όλο το απαιτούμενο για το φορτίο ρεύμα διένυε τη γραμμή των 10 km, τώρα τη γραμμή των 10 km διανύει, κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια, μηδενικό ή έστω πολύ μικρό ρεύμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μικρή (σχεδόν ανύπαρκτη) πτώση τάσης από τον άπειρο ζυγό προς το φορτίο. (Για λόγους που εξηγήσαμε ήδη μπορεί η πτώση τάσης να είναι και προς τον άπειρο ζυγό.)

**4.3.β.iii** Συμπεριφορά δικτύου κατά την παροχή της ισχύος του φορτίου μόνο από το δίκτυο, για το οποίο αυξάνουμε το μήκος των γραμμών μεταφοράς από 10 χιλιόμετρα σε 50. Κρατάμε τα άλλα μήκη γραμμών σταθερά

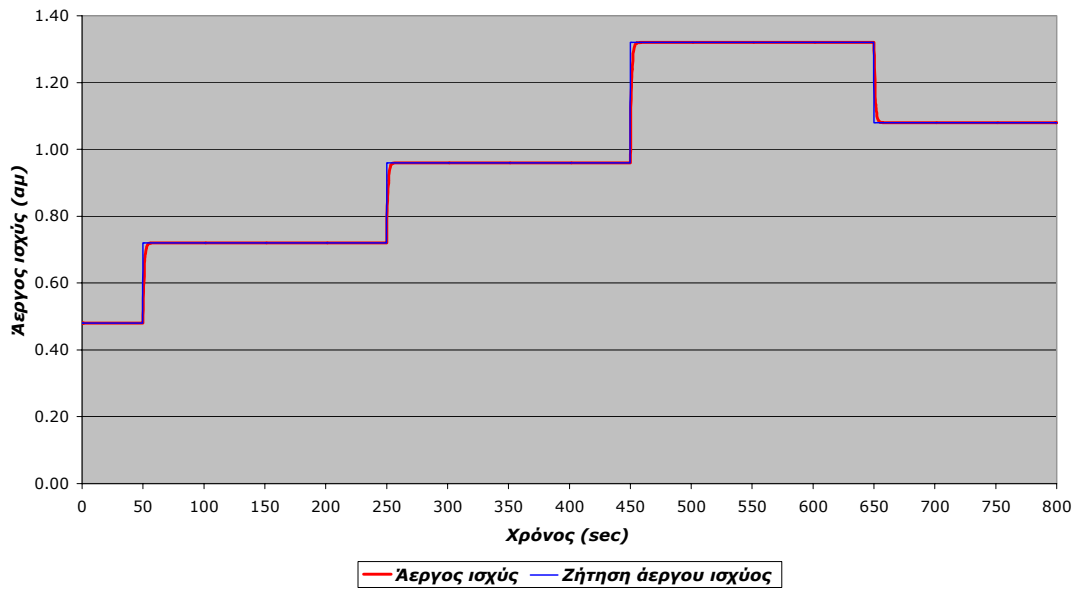
**Ενεργός ισχύς**



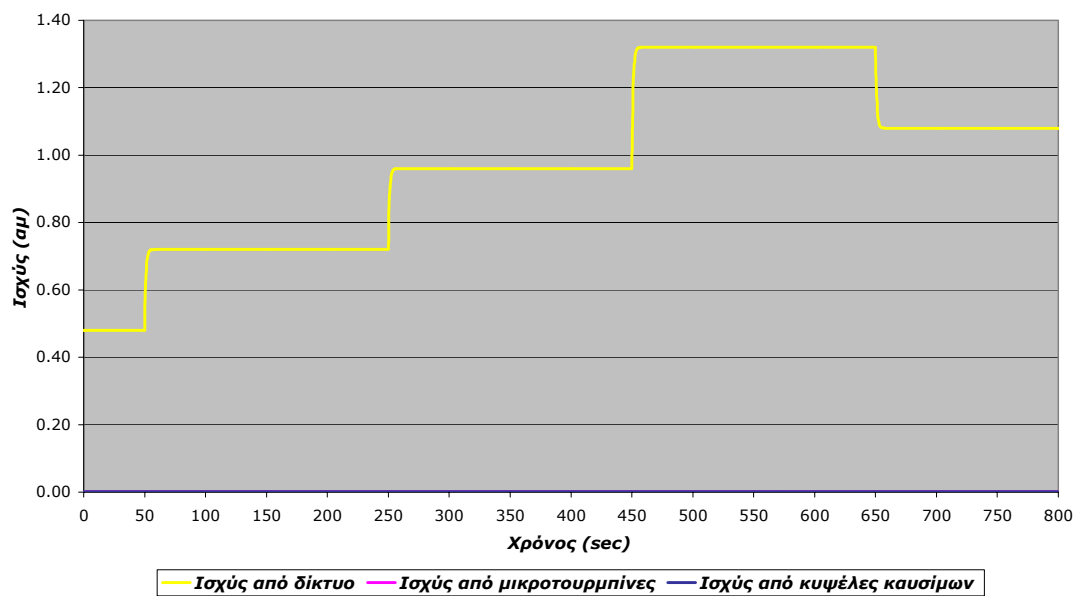
**Κατανομή ενεργού ισχύος**



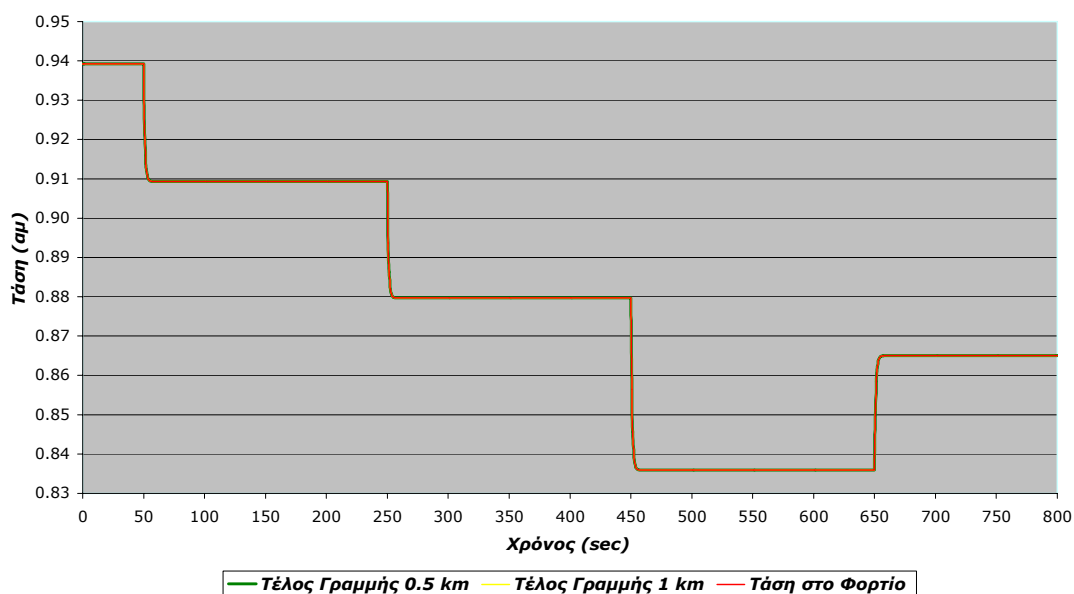
### Άεργος ισχύς



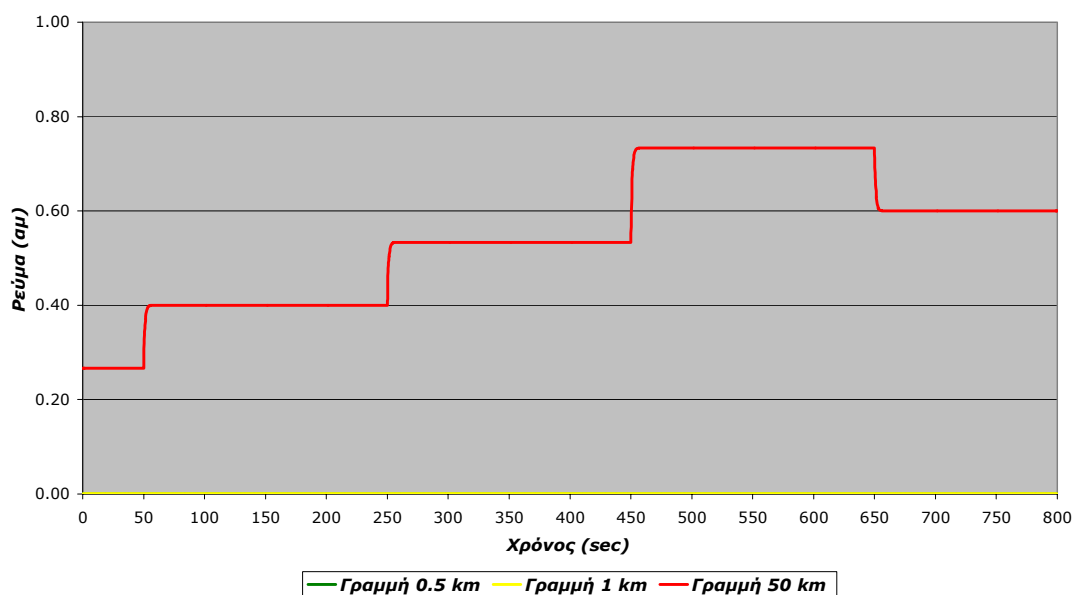
### Κατανομή αέργου ισχύος



### Τάσεις ζυγών



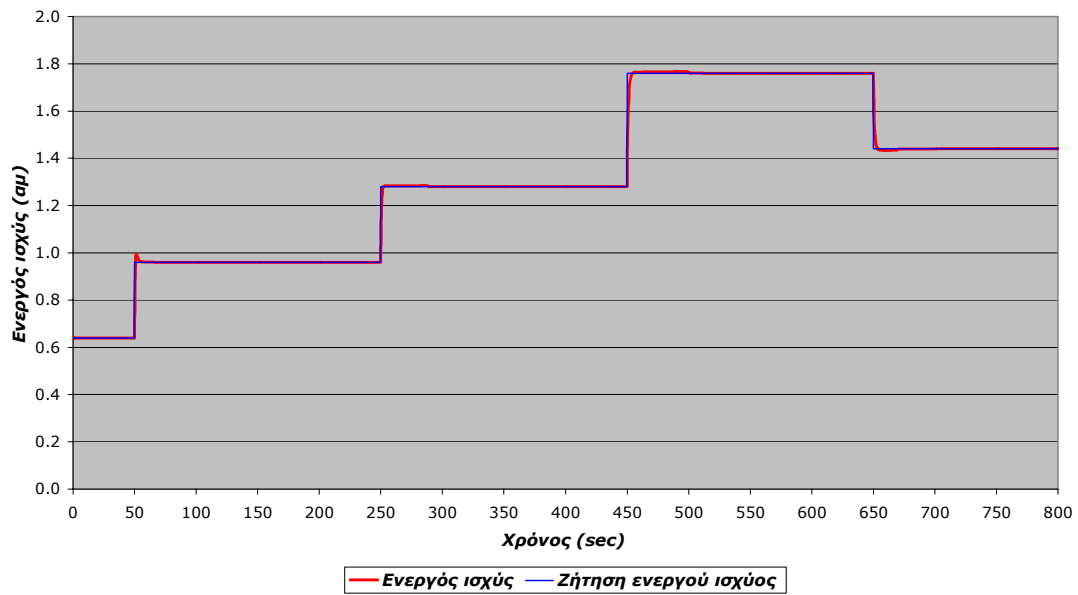
### Ρεύματα γραμμών



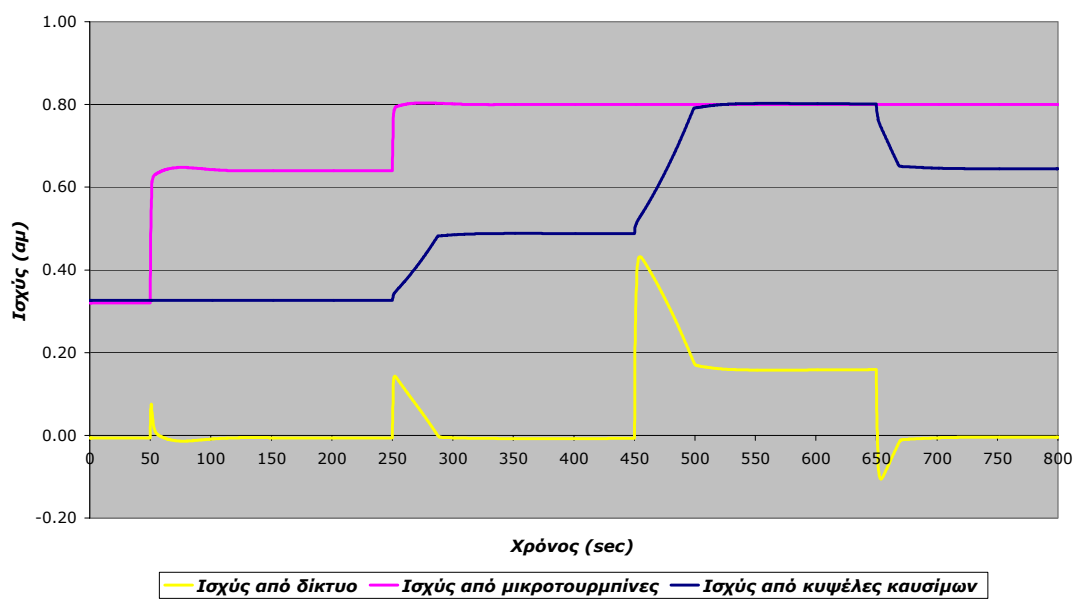
Η μεταβολή της γραμμής από 10 km σε 50 km, με την απουσία των μικροπηγών, έχει καθοριστικές συνέπειες για το δίκτυο τοπικά, μια και η πτώση τάσης είναι εξαιρετικά μεγάλη (φτάνει το 0.165 αμ). Αντιστοίχως μεγάλες είναι προφανώς οι απώλειες στη γραμμή που συνδέει το φορτίο με τον άπειρο ζυγό.

**4.3.β.iv Συμπεριφορά του προαναφερθέντος δικτύου (γραμμή 50 km) με όλες τις πηγές ενέργειας διαθέσιμες**

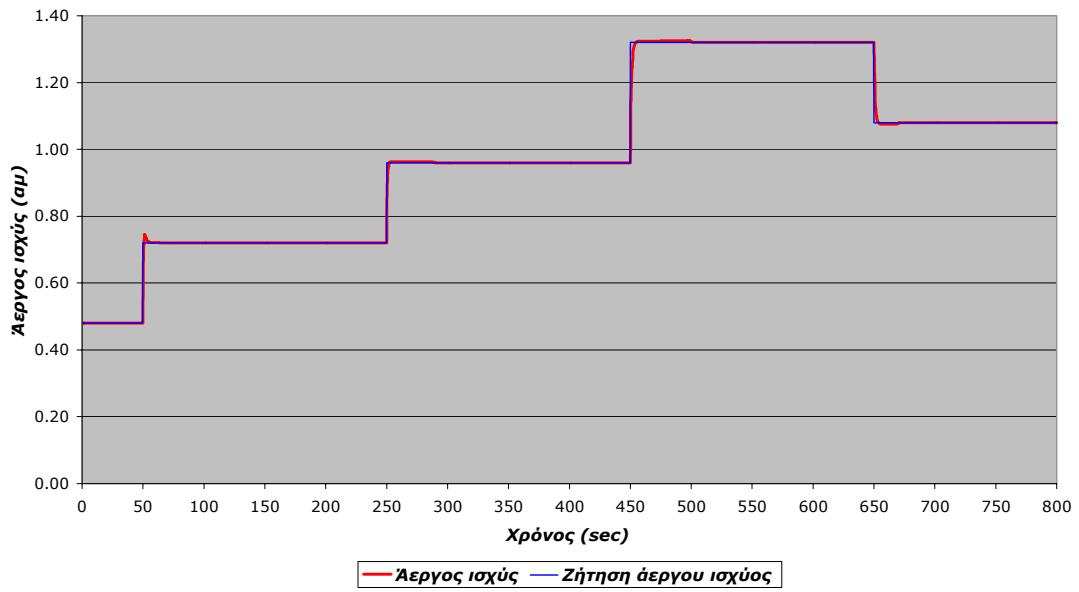
**Ενεργός ισχύς**



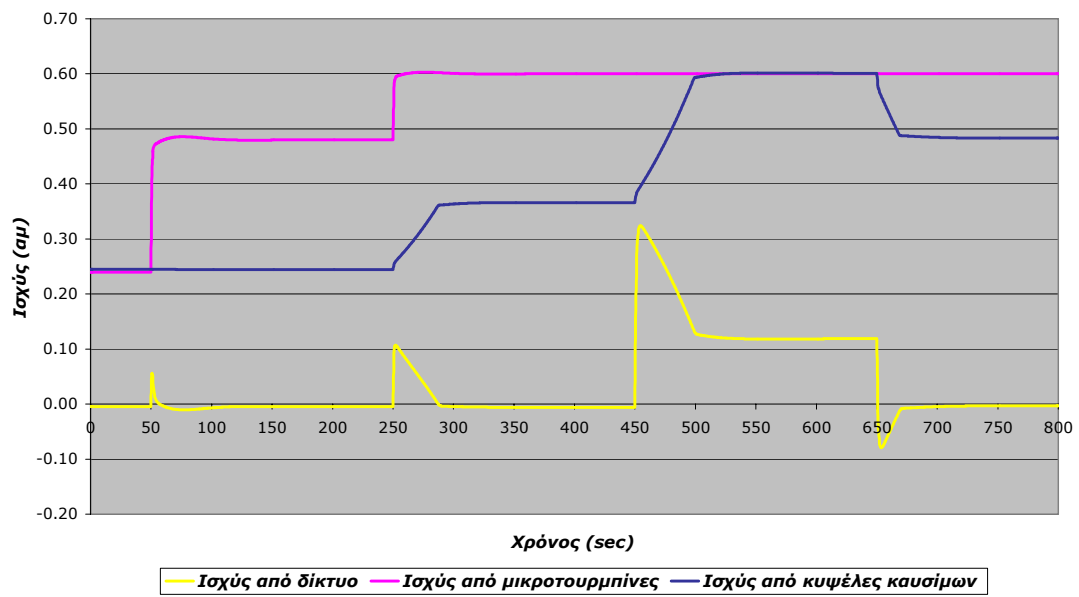
**Κατανομή ενεργού ισχύος**



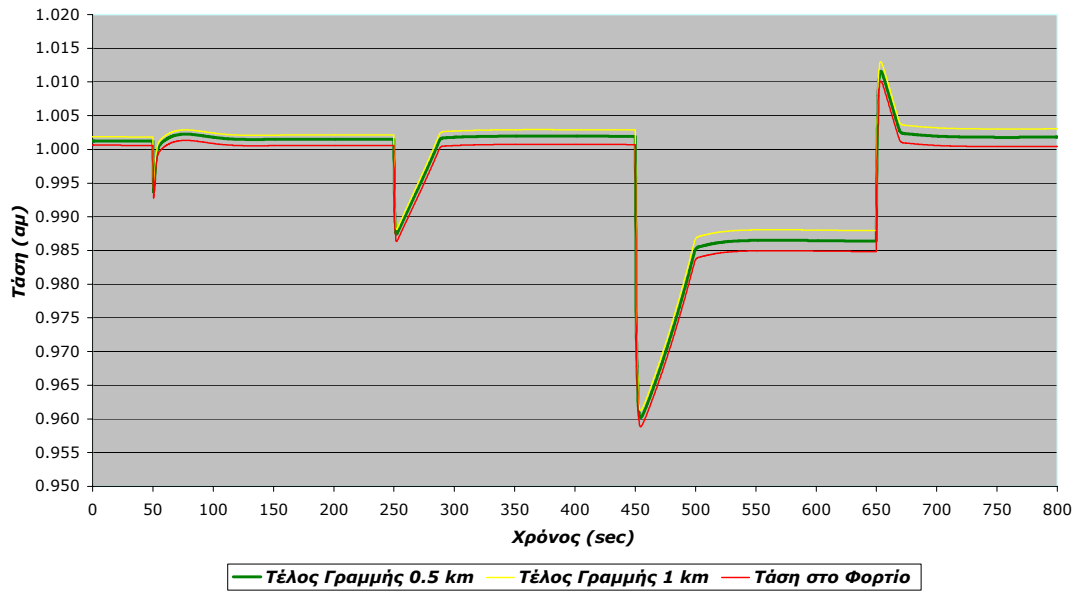
### Άεργος ισχύς



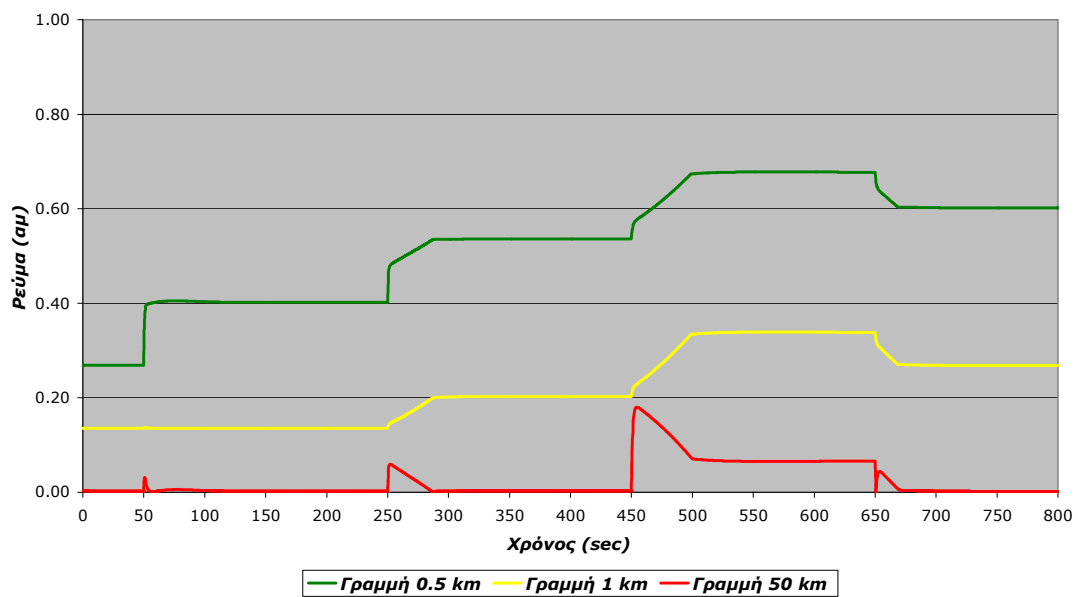
### Κατανομή αέργου ισχύος



### Τάσεις ζυγών



### Ρεύματα γραμμών

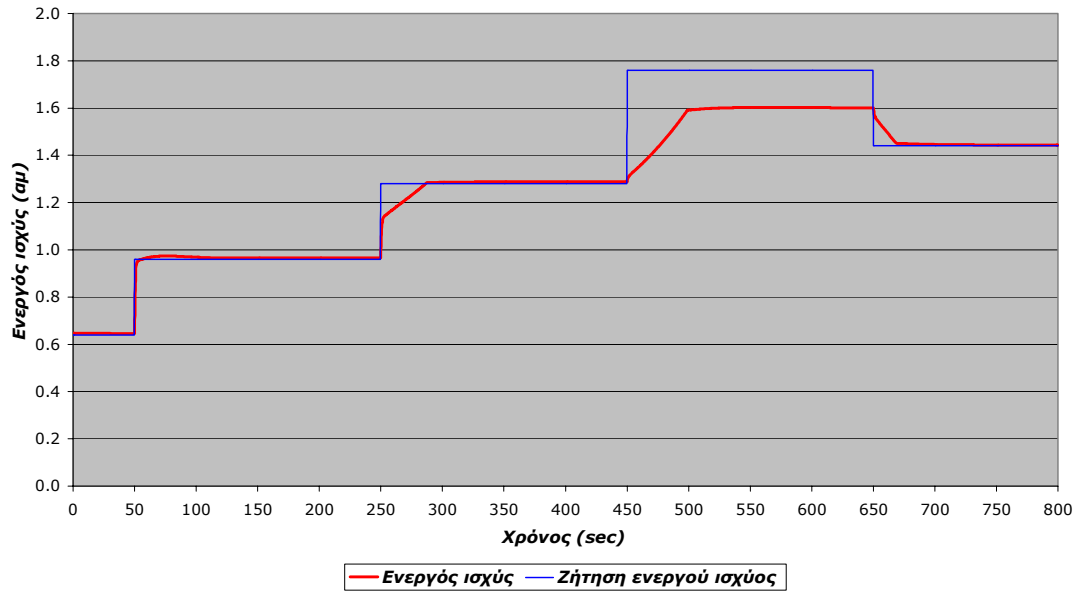


Η είσοδος των μικροπηγών στο δίκτυο έχει πολύ θετικά αποτελέσματα. Το σύστημα επανακτά ανεκτές τιμές τάσεων για τον ζυγό του φορτίου (μέγιστη πτώση τάσης 0.04 αμ).

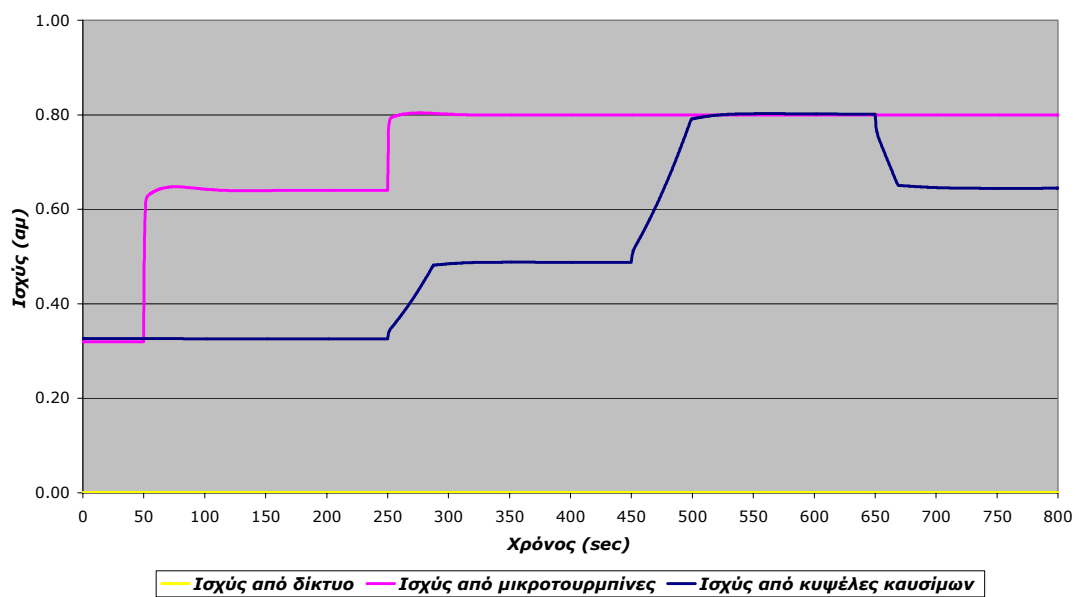


**4.3.β.ν Συμπεριφορά του προαναφερθέντος δικτύου με μόνες διαθέσιμες πηγές ενέργειας τις μικροπηγές (απουσία άπειρου ζυγού).**

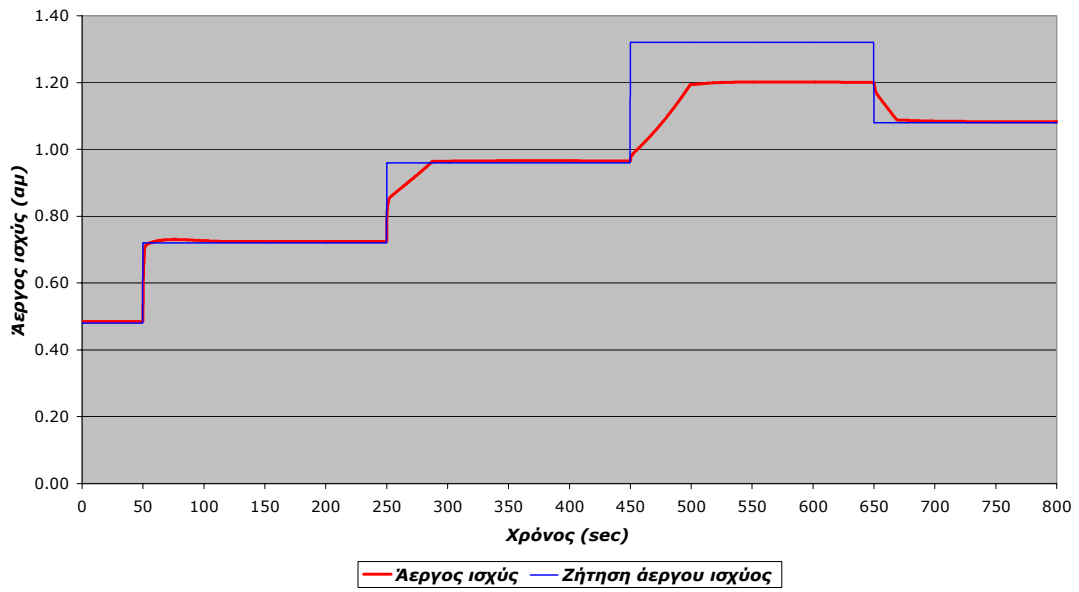
**Ενεργός ισχύς**



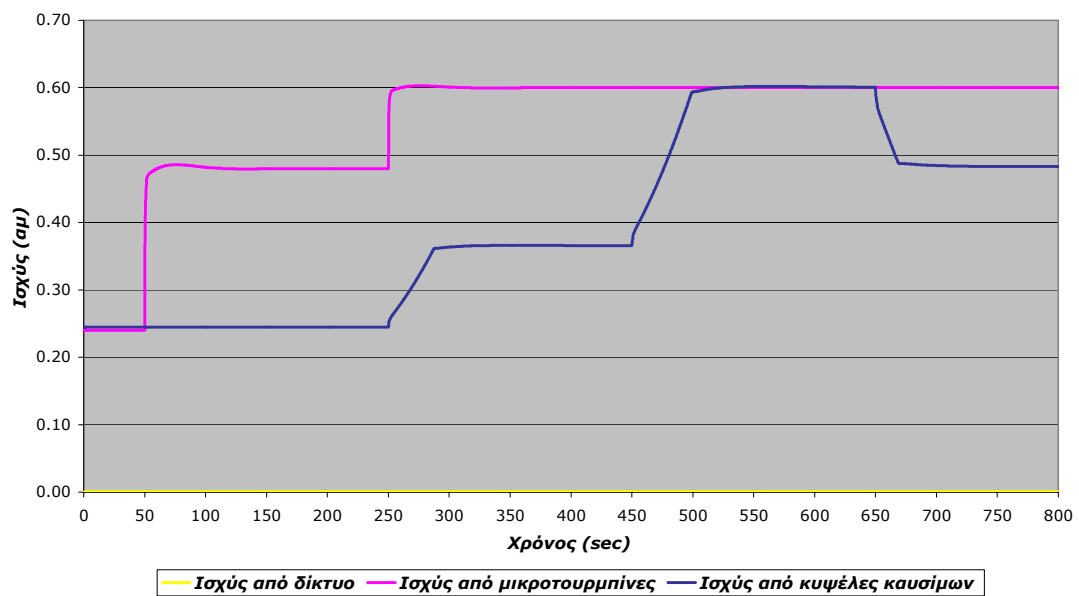
**Κατανομή ενεργού ισχύος**



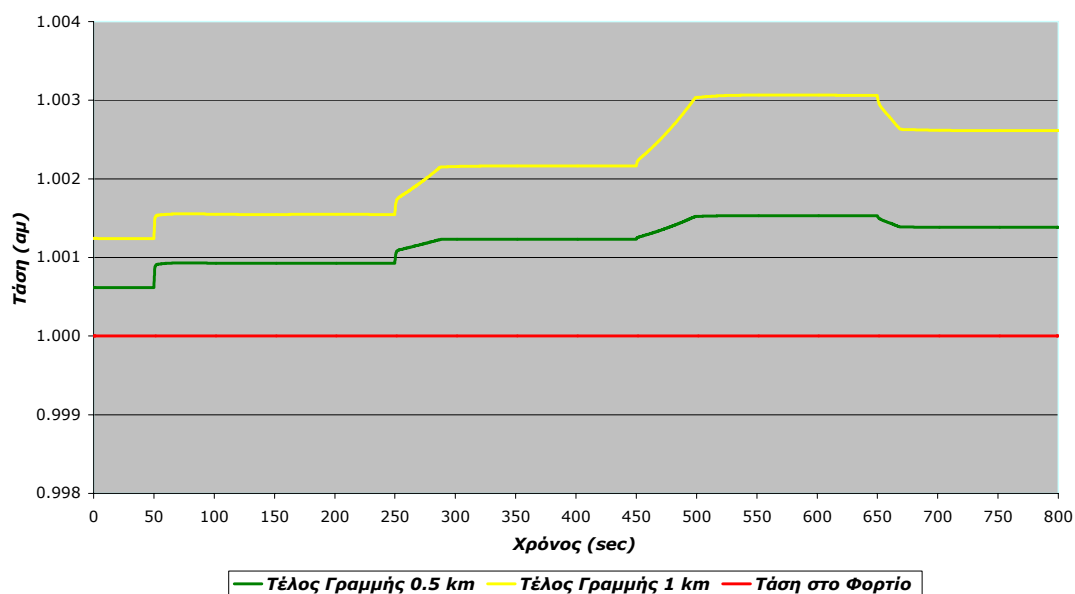
### Άεργος ισχύς



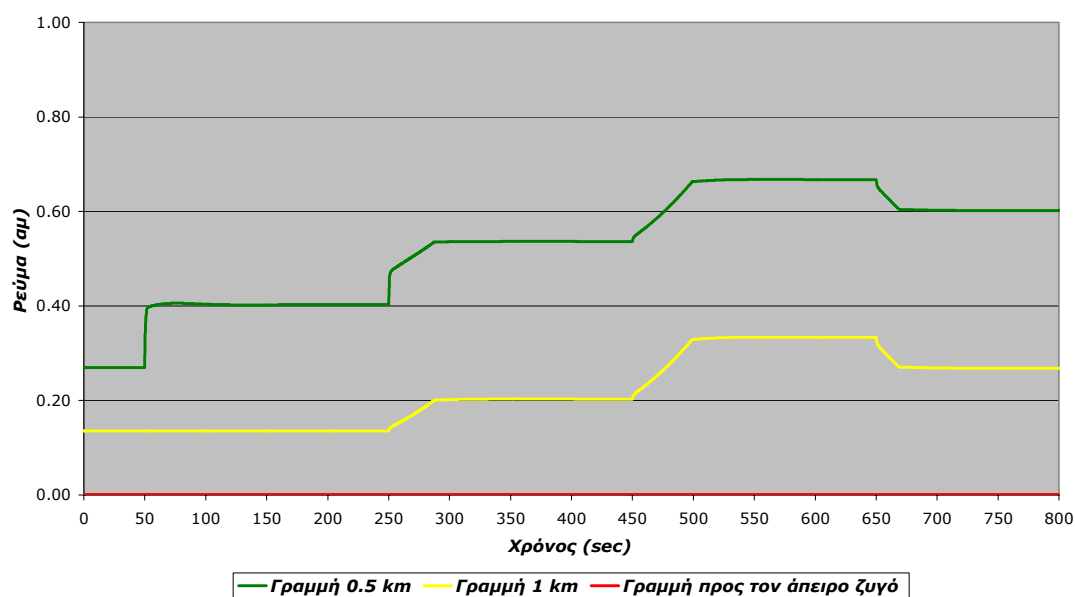
### Κατανομή αέργου ισχύος



### Τάσεις ζυγών



### Ρεύματα γραμμών



Κατά τη λειτουργία του δικτύου και πάλι χωρίς την παρουσία του άπειρου ζυγού, το πρώτο που μπορεί κανείς να παρατηρήσει είναι η αδυναμία των μικροπηγών να εξυπηρετήσουν το σύνολο του φορτίου. Πέρα από αυτό, η απόκριση της ισχύος (ενεργού και άεργου) παραμένει όπως σε όλες τις περιπτώσεις. Επίσης οι πτώσεις τάσεις στους ζυγούς είναι πολύ μικρές (μέγιστη περίπου 0.0015 α.μ. από ζυγό σε ζυγό. Η τάση στον ζυγό του φορτίου είναι 1 αμ.

#### 4.4 Συμπεράσματα

Από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε, μια γενική εκτίμηση για την παρουσία της διανεμημένης παραγωγής είναι ότι βρισκόμενη σε απόσταση πολύ μικρή από το φορτίο, ουσιαστικά δίπλα σε αυτό, δρα θετικά στην αξιοπιστία του συστήματος, τοπικά, αλλά και στην ποιότητα της ενέργειας που παρέχεται στους καταναλωτές.

Η τάση στο φορτίο με την παρουσία της διανεμημένης παραγωγής είναι με μειωμένες διακυμάνσεις και πάντα πιο κοντά στην ονομαστική τιμή, που παρέχει ο άπειρος ζυγός και στην οποία λειτουργούν από τις προδιαγραφές τους οι ηλεκτρικές συσκευές των καταναλωτών.

Αποφεύγονται αστοχίες του συστήματος σε μεγάλα φορτία.

Λόγω της έτσι κι αλλιώς αυξημένης ικανότητας μεταφοράς της παραδοσιακής γραμμής (αφού είναι σχεδιασμένη για να εξυπηρετεί το σύνολο του φορτίου), η ζήτηση ισχύος μπορεί να αυξηθεί σημαντικά, χωρίς να είναι απαραίτητη η ενίσχυση του υπάρχοντος δικτύου με επιπλέον γραμμές.

Οι απώλειες για τη μεταφορά της ενέργειας μειώνονται ραγδαία.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αντιστάθμιση άεργου ισχύος για τον έλεγχο της τάσης.

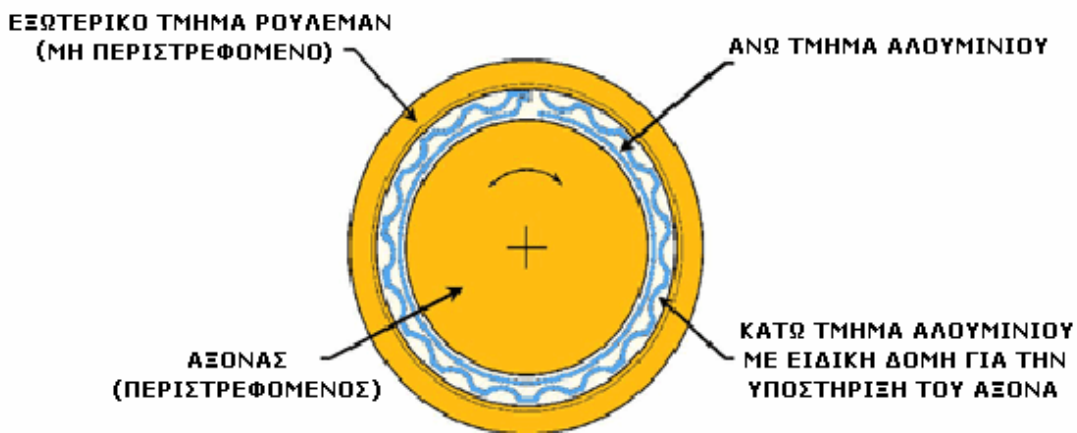
Η παρουσία του δικτύου βέβαια παραμένει αναγκαία, για την κάλυψη των αιχμών του φορτίου ή για μη προβλέψιμα μεγάλα φορτία. Επιπλέον, σε περίπτωση αστοχίας κάποιας ή κάποιων εκ των μικροπηγών, ή διακοπή της λειτουργίας τους για λόγους συντήρησης, το δίκτυο θα μπορέσει να εξυπηρετήσει το φορτίο, χωρίς προβλήματα και μέχρι να αποκατασταθεί η λειτουργία των μικροπηγών. Η παρουσία του δικτύου είναι επιπλέον απαραίτητη για τον συγχρονισμό των τάσεων που παράγονται από τις μικροπηγές.

Σε περίπτωση που υπάρχει ανάγκη για απομονωμένη λειτουργία, θα πρέπει να υπάρχει σημαντικός πλεονασμός παραγωγής ισχύος από τις μικροπηγές για να επιτευχθεί αξιοπιστία όμοια με αυτή του παραδοσιακού ακτινωτού δικτύου.

## 5. Παράρτημα

### 5.1 Ρουλεμάν airfoil

Τα ρουλεμάν χρησιμοποιούνται μεταξύ των περιστρεφόμενων και των στάσιμων μερών των στροβιλοκίνητων μηχανών. Τα ρουλεμάν σφαιρών και κυλίνδρων χρησιμοποιούνται συνήθως στις μηχανές στροβίλων. Αυτά τα ρουλεμάν απαιτούν ένα σύστημα λίπανσης λαδιού που παρέχει ένα λεπτό στρώμα λιπαντικού μέσου μεταξύ των κινούμενων μερών του ρουλεμάν. Χωρίς λιπαντικό μέσο, η επαφή μετάλλου με μέταλλο θα ανάγκαζε τη μηχανή να σταματήσει σιγά-σιγά, αυξάνοντας σημαντικά τη θερμοκρασία. Η χρήση των oil-free (χωρίς λάδι) ρουλεμάν αφαιρεί την ανάγκη της ύπαρξης του συστήματος λαδιού που μειώνει έτσι το βάρος, τη συντήρηση, και την πολυπλοκότητα της μηχανής. Οι μελέτες έχουν παρουσιάσει πιθανή μείωση 15% στο βάρος μηχανών.



Η oil-free λειτουργία επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης των ρουλεμάν αέρα, φύλλων αλουμινίου (airfoil). Αυτά τα ρουλεμάν στηρίζουν έναν περιστρεφόμενο άξονα με δύο κύρια στοιχεία: ένα φύλλο αλουμινίου (top foil) στον περιστρεφόμενο (εσωτερικό) άξονα και ένα φύλλο αλουμινίου με καμπυλόγραμμα επαναλαμβανόμενα σχήματα (bump foil) στο σταθερό τμήμα του ρουλεμάν. Το πρώτο φύλλο αλουμινίου παρέχει μια ανθεκτική σε έξυση επιφάνεια για πολλαπλές ενάρξεις και στάσεις και συλλαμβάνει τον αέρα για την υποστήριξη του ρουλεμάν. Το δεύτερο φύλλο αλουμινίου (bump foil) παρέχει την υποστήριξη για το πρώτο φύλλο αλουμινίου (top foil) και μπορεί να προσαρμοστεί για την απαραίτητη ακαμψία του ρουλεμάν.

Αυτή η τεχνολογία έχει χρησιμοποιηθεί για αρκετά χρόνια στις χαμηλής θερμοκρασίας εφαρμογές όπως οι κεφαλές ανάγνωση/γραφής στους μαγνητικούς δίσκους των υπολογιστών, αλλά και οι μηχανές που διατηρούν την πίεση στις καμπίνες εμπορικών αεροσκαφών. Οι πρόσφατες πρόοδοι στον σχεδιασμό των ρουλεμάν, στα υψηλής θερμοκρασίας επιστρώματα επιφάνειας και της χρήσης υπολογιστών για μοντελοποιήσεις επιτρέπουν νέες εφαρμογές αυτών των ρουλεμάν.

Τα ρουλεμάν αέρα φύλλων αλουμινίου είναι υδροδυναμικά ρουλεμάν που κατά μία έννοια «αυτενεργούν» και χρησιμοποιούν τον περιβαλλοντικό αέρα ως λιπαντικό αντί λαδιού. Και ο αέρας και το λάδι είναι ρευστά που μπορούν να εκτελέσουν την εργασία του χωρισμού των κινούμενων μερών μετάλλων. Οι πολύ υψηλές ταχύτητες περιστροφής των αξόνων των μηχανών στροβίλων (>10000 ΣΑΛ) επιτρέπουν την αντικατάσταση του λαδιού με τον αέρα. Με αυτές τις ταχύτητες, τα

ρουλεμάν αέρα φύλλων αλουμινίου διατηρούν το λεπτό στρώμα αέρα μεταξύ των κινούμενων μερών αντλώντας ουσιαστικά αέρα μεταξύ των περιστρεφόμενων και των στάσιμων επιφανειών. Ο αέρας σύρεται μέσα και προσκολλάται στην επιφάνεια των ρουλεμάν, ανεξάρτητα από το πόσο γρήγορα κινούνται αυτά.

Η άντληση του αέρα μεταξύ των κινούμενων επιφανειών δημιουργεί πίεση αέρα, ικανή να στηρίζει ένα σημαντικό σε βάρος φορτίο. Σε υψηλές ταχύτητες, ένα πολύ λεπτό στρώμα του αέρα, με πάχος λίγο μικρότερο από  $2,5 \cdot 10^{-3} \text{cm}$ , μπορεί να υποστηρίξει δεκάδες ως εκατοντάδες κιλά.

Μέχρι σήμερα, τα ρουλεμάν αέρα φύλλων αλουμινίου χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές που λειτουργούν σε θερμοκρασίες κάτω από τα  $200^\circ\text{C}$ . Ένα εμπόδιο για τη χρήση τους σε υψηλότερες θερμοκρασίες ήταν η ανάγκη για ένα επιστρώμα στον άξονα με αντοχή στην υψηλή θερμοκρασία. Κατά τη διάρκεια της εκκίνησης και του τερματισμού, το ρουλεμάν και ο άξονας έρχονται σε επαφή· επαφή που διαρκεί έως ότου η ταχύτητα περιστροφής να είναι τέτοια, ώστε να αντλεί στο εσωτερικό των ρουλεμάν την απαραίτητη ποσότητα αέρα. Για να μειωθεί η επένδυση, ένα ξηρό επιστρώμα λιπαντικών εφαρμόζεται στο φύλλο αλουμινίου και τον άξονα. Οι περισσότερες εφαρμογές που χρησιμοποιούν ρουλεμάν φύλλου αλουμινίου χρησιμοποιούν ένα πολυμερές επιστρώμα όπως το τεφλόν που έχει χρήση για θερμοκρασίες περίπου  $200^\circ\text{C}$ . Το ερευνητικό κέντρο της NASA Glenn καινοτόμησε δημιουργώντας τα νέα επιστρώματα επιφάνειας που έχουν ωθήσει αυτό το ανώτερο όριο θερμοκρασίας από περίπου  $200^\circ\text{C}$  σε θερμοκρασία άνω των  $650^\circ\text{C}$ .

Με την εμφάνιση νέων τεχνολογιών, τα ρουλεμάν αέρα φύλλων αλουμινίου είναι τώρα έτοιμα για περιβάλλοντα υψηλότερων θερμοκρασιών.

Ένα παράδειγμα των νέων αυτών δυνατοτήτων είναι ένα πρόγραμμα της NASA κατά το οποίο χρησιμοποιήθηκε ένας στροβιλοσυμπιεστής 150 HP που τροποποιήθηκε για να λειτουργήσει χρησιμοποιώντας τα ρουλεμάν αέρα φύλλων αλουμινίου. Ο στροβιλοσυμπιεστής λειτούργησε με μια θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου  $1200^\circ\text{F}$  και ταχύτητα περιστροφής άξονα πάνω από 60.000 ΣΑΛ. Αυτός ο oil-free στροβιλοσυμπιεστής ήταν σε θέση να εκτελέσει πάνω από 100.000 κύκλους εκκινήσεων/τερματισμών χωρίς καμία αποτυχία.

Τα ρουλεμάν αέρα φύλλων αλουμινίου υπερέρχουν τώρα όπου απαιτούνται υψηλή θερμοκρασία και ρουλεμάν υψηλών ταχυτήτων περιστροφής. Η δοκιμή του στροβιλοσυμπιεστή έδειξε ότι αυτά τα ρουλεμάν είναι κατάλληλα να λειτουργήσουν στο καυτό τμήμα των μηχανών στροβίλων χωρίς ανάγκη για ψύξη.

## 5.2 Lower Heating Value (LHV)

Το υδρογόνο (όπως και όλα τα καύσιμα) έχει μια θερμική ικανότητα που μπορεί να αποδώσει κατά την καύση του. Οι θερμικές αξίες εκφράζονται ως χαμηλή ή ως υψηλή θερμική αξία (Lower Heating Value ή Higher Heating Values, LHV ή HHV αντίστοιχα). Και οι δύο αυτές τιμές εκφράζουν πάντα το ποσό της θερμότητας που απελευθερώνεται κατά την καύση. Η διαφορά μεταξύ του LHV και του HHV είναι απλά το ένα το παράγωγο νερό βρίσκεται σε υγρή μορφή (HHV), ή σε αέρια (LHV). Εξαιτίας του γεγονότος ότι η εξάτμιση του νερού απαιτεί επιπλέον ενέργεια η LHV είναι πάντα λιγότερη από την HHV. Ενδεικτικά αναφέρουμε τις HHV και LHV του υδρογόνου σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας:

LHV  $\text{H}_2$ :  $2.9 \text{ kWh/m}^3$   
HHV  $\text{H}_2$ :  $3.5 \text{ kWh/m}^3$

## Βιβλιογραφία

- (1) Dynamic models for Micro-Turbines and Fuel Cells - Robert Lasseter - IEEE (2001)
- (2) Advanced Microturbine Systems Program plan for fiscal years 2000 through 2006 - U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Power Technologies (March 2000)
- (3) Industrial Applications for Micropower : A Market Assessment - Prepared for: Office of Industrial Technologies, U.S. Department of Energy, Washington DC and Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge TN - Resource Dynamics Corporation (November 1999)
- (4) Analyzing the Reliability Impact of Distributed Generation - Richard E. Brown (SM) Lavelle A. A. Freeman (M), ABB Power T&D Company, Inc. - IEEE (2001)
- (5) System impact studies for DG projects under development in the US - IEEE PES summer meeting panel discussion on "Modeling new forms of generations and storage for stability analysis" - X. Henry Chao ABB Electric systems Consulting - IEEE (2001)
- (6) An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulations - J. Padullés, G.W. Ault, J.R. McDonald - Journal of Power Sources 86 (2000)
- (7) Development of models for analyzing the load-following performance of microturbines and fuel cells - Y. Zhu, K. Tomsovic - Electric Power Systems Research 62 (2002)
- (8) Fuel Cell Handbook, 5<sup>th</sup> edition - By EG&G Services, Parsons Inc. - Science Applications International Corporation - US Department of Energy (2000)
- (9) Fuel Cell Systems Explained - James Larminie, Andrew Dicks - Wiley (2001)
- (10) Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές - Μιχ. Παπαδόπουλος (ΕΜΠ) - (1997)
- (11) Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας - Βασιλείου Κ. Παπαδιά (ΕΜΠ) (1991-1992)
- (12) Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, Ασύμμετρες και μεταβατικές καταστάσεις - Βασιλείου Κ. Παπαδιά (ΕΜΠ) (1991-1992)