ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

ΑΝΩΤΑΤΗ ΣΧΟΛΗ ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΗΣ



ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

**ΑΣΠΑΙΤΕ**

**ΤΜΗΜΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &**

**ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Ανάλυση Ροής Ισχύος σε δίκτυα εναλλασσομένου: Συνοπτική Θεωρία και Υπολογισμοί σε MATLAB/MATPOWER.**

**Πτυχιακή Εργασία**

**Φοιτητής: Γιαννακούλα Κωνσταντίνα**

**ΑΜ: 1201501281**

**Κατεύθυνση:** **Εκπαιδευτικών Ηλεκτρολόγων Μηχανικών**

Επιβλέπων Καθηγητής

**Δρ. Δρίτσας Λεωνίδας**

**Αναπληρωτής Καθηγητής**

**Ημερομηνία: (16/07/2021)**

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

ΑΝΩΤΑΤΗ ΣΧΟΛΗ ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΗΣ



ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

**ΑΣΠΑΙΤΕ**

**ΤΜΗΜΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &**

**ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**AC Power Flow Analysis: Concise Theory and Computations in MATLAB/MATPOWER.**

**Degree Thesis**

**Student: Giannakoula Konstantina**

**Registration Number: 1201501281**

**Degree Option: Electrical Engineering Educators**

Supervisor

**Dr. Dritsas Leonidas**

**Associate Professor**

**Date: (16/07/2021)**

**.**

**Γιαννακούλα Κωνσταντίνα**

**Copyright © Γιαννακούλα Κωνσταντίνα, 16/07/2021**

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος, All rights reserved

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τους συγγραφείς και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της ΑΣΠΑΙΤΕ.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

ΑΝΩΤΑΤΗ ΣΧΟΛΗ ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΗΣ



ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

**ΑΣΠΑΙΤΕ**

**ΤΜΗΜΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &**

**ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Ανάλυση Ροής Ισχύος σε δίκτυα εναλλασσομένου: Συνοπτική Θεωρία και Υπολογισμοί σε MATLAB/MATPOWER.**

**Πτυχιακή Εργασία**

Επιβλέπων Καθηγητής

**Δρ. Δρίτσας Λεωνίδας**

**Αναπληρωτής Καθηγητής**

………..……………………… …………………..…………….. ……………………………….……..

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Εξεταστής**  **Βήτα Βασιλική**  **Επίκουρος Καθηγήτρια** | **Εξεταστής**  **Δρίτσας Λεωνίδας**  **Αναπληρωτής Καθηγητής** | **Εξεταστής**  **Οικονόμου Λάμπρος**  **Καθηγητής** |

**Ημερομηνία: (20/07/2021)**

# Λέξεις Κλειδιά

Ανάλυση ροής ισχύος, Δίκτυα εναλλασσομένου, Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, Μη γραμμικό πρόβλημα, Ζυγοί, Γραμμές μεταφοράς, Φορτία, Η εργαλειοθήκη MATPOWER.

# Keywords

Power flow analysis, AC networks, Electrical energy systems, Non-linear problem, Buses, Transmission lines, Loads, MATPOWER toolbox.

# Περίληψη

Στην εργασία αυτή, μας απασχόλησε η ανάλυση ροής φορτίου σε δίκτυα εναλλασσομένου , θεωρητικά ως προς τις βασικές μεθοδολογίες επίλυσης τέτοιων προβλημάτων αλλά και υπολογιστικά με την χρήση του λογισμικού MATPOWER σε περιβάλλον MATLAB. Η ανάλυση ροής φορτίου είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας και οι υπολογιστικές απαιτήσεις για πραγματικά Σ.Η.Ε. είναι αυξημένης πολυπλοκότητας. Είναι συνεπώς απαραίτητη η χρήση εξειδικευμένου λογισμικού για την επίλυσή του ιδιαίτερα για Σ.Η.Ε. μεγάλης κλίμακας. Προσεγγίσαμε, λοιπόν, το συγκεκριμένο θέμα ως εξής:

* Έγινε μια συνοπτική αναφορά στην θεωρία της ανάλυσης ροής φορτίου καθώς επίσης παρατέθηκαν και τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα για την επίλυση των μη γραμμικών εξισώσεων ροής φορτίου.
* Επιλύθηκε ένα ακαδημαϊκό παράδειγμα Σ.Η.Ε. τριών ζυγών χωρίς την χρήση του MATPOWER.
* Έγινε επεξήγηση κάποιων παραδειγμάτων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας στο περιβάλλον του MATLAB/MATPOWER τα οποία ήταν αυξανόμενης δυσκολίας διαδοχικά.
* Υπολογίσαμε και αναλύσαμε τα αποτελέσματα σε παραδείγματα ενεργειακών συστημάτων αυξανόμενης πολυπλοκότητας κάθε φορά, κάνοντας χρήση του λογισμικού MATLAB/MATPOWER.
* Σχολιάσαμε τα δεδομένα του κάθε παραδείγματος και περιεγράφηκε η τοπολογία του.
* Μετά από αύξηση της αέργου ισχύος κατανάλωσης ενός φορτίου, παρατηρήθηκε μείωση του μέτρου της τάσης του αντίστοιχου ζυγού επιβεβαιώνοντας την θεωρία. Με την αύξηση της αέργου ισχύος παρατηρήθηκε επίσης αύξηση των συνολικών απωλειών ισχύος στις γραμμές του συστήματος το οποίο ήταν και το προσδοκώμενο.

# Abstract

In this work, we were concerned with the analysis of power flow in Alternating Current (AC) networks, both theoretically as to the basic methodologies for solving such problems but also used the MATLAB/MATPOWER Toolbox for specific “real life” computations. Power flow analysis is a very important issue in Electric Power Engineering and demands dedicated software for the computations especially for Large Scale Power Networks. We have therefore approached this issue as follows:

* A brief reference was made to the theory of load flow analysis as well as the models used to solve nonlinear load flow equations.
* An academic example was thoroughly presented and its Power Flow analysis was solved without using MATPOWER.
* Examples of power systems of increasing complexity were presented and formulated in the MATLAB/MATPOWER.
* We computed and analyzed the results in various examples of power systems of increasing complexity, using the MATLAB/MATPOWER software.
* We also commented on the data of each example and described its topology.
* After an increase in the reactive power consumption of a load, a decrease in the voltage magnitude of the corresponding bus was observed, confirming the theory. With the increase in reactive power consumption there was also an increase in total power losses on the lines of the system which was also expected.

# Πρόλογος

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αποτελεί μέρος της ακαδημαϊκής μου πορείας για την απόκτηση του πτυχίου του Εκπαιδευτικού Ηλεκτρολόγου Μηχανικού από την ΑΣΠΑΙΤΕ. Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η ανάλυση ροής ισχύος σε δίκτυα εναλλασσομένου ενώ στόχος είναι η εξοικείωσή μας με τις έννοιες και τις υπολογιστικές μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση ροής ισχύος των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και η χρήση του λογισμικού MATLAB/MATPOWER για την διευκόλυνση των απαραίτητων υπολογισμών. Για την βέλτιστη κατανόηση του προβλήματος ασχοληθήκαμε με τρία παραδείγματα αυξανόμενης πολυπλοκότητας κάθε φορά συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τα θεωρητικά αναμενόμενα. Συμπεραίνουμε λοιπόν πως το λογισμικό MATLAB και ιδιαίτερα η εργαλειοθήκη MATPOWER αποτελούν εξαιρετικό μέσω επίλυσης προβλημάτων που σχετίζονται με την ανάλυση ροής φορτίου καθώς το περιβάλλον τους είναι εύχρηστο, ταχύτατο και ιδιαίτερα αξιόπιστο.

Συγκεκριμένα, στο πρώτο κεφάλαιο εισάγονται βασικές αρχές των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Γίνεται ανάλυση της δομής ενός γενικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ενώ ταυτόχρονα εξετάζονται ζητήματα που αφορούν την παραγωγή, την μεταφορά και την διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται η μαθηματική πλαισίωση της θεωρίας και παρουσιάζεται το πρόβλημα της ροής φορτίου. Αναφέρονται επίσης οι υπολογιστικές μεθοδολογίες και μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος αυτού. Τέλος παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο πρόβλημα το οποίο επιλύθηκε χρησιμοποιώντας κάποιες απαραίτητες παραδοχές σε συνδυασμό με την εφαρμογή κατάλληλης μεθοδολογίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στις δυνατότητες της εργαλειοθήκης MATPOWER. Αυτό το λογισμικό αποτελεί μέρος του MATLAB το οποίο σχεδιάστηκε ώστε να επιλύει τις πολύπλοκες εξισώσεις ροής φορτίου. Γίνεται επίσης, περιγραφή της μοντελοποίησης που ακολουθεί το MATPOWER σε σχέση με τα εξαρτήματα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ενώ παράλληλα εξηγείται η διαδικασία για την επίλυση μιας ανάλυσης ροής φορτίου μέσω της εντολής «runpf».

Στο τέταρτο, πέμπτο και έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται παραδείγματα συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αυξημένης πολυπλοκότητας κάθε φορά, γίνεται επεξήγηση των παραδειγμάτων έπειτα το πρόβλημα λύνεται μέσω του MATPOWER, λαμβάνουμε τα αποτελέσματα και εξάγουμε συμπεράσματα.

Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται γενικότερος σχολιασμός των αποτελεσμάτων και προτείνεται περαιτέρω ερευνητική εργασία.

# Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό, με την ολοκλήρωση της πτυχιακής αυτής εργασίας θα ήθελα να αποθέσω τις ευχαριστίες μου. Πρώτο από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον εξαίρετο καθηγητή Δρ. Δρίτσα Λεωνίδα που ανέλαβε την επίβλεψη της εκπόνησης της πτυχιακής μου εργασίας. Κατά την διάρκεια συγγραφής της εργασίας μου υπήρχε πάντα άριστη συνεργασία, στήριξη, κατανόηση και καθοδήγηση από πλευράς του πάντα με στόχο το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τα άλλα δύο μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής, Δρ. Βήτα Βασιλική και Δρ. Οικονόμου Λάμπρο για την προσφορά τους ως καθηγητές μου στην ακαδημαϊκή μου πορεία αλλά και ως εξεταστές που αφιέρωσαν τον απαραίτητο χρόνο για την πτυχιακή μου εργασία.

Ευχαριστώ επίσης όλους τους καθηγητές μου αλλά και όλο το διδακτικό προσωπικό της σχολής για την συνεργασία και τα εφόδια που μου έδωσαν καθ’ όλη την διάρκεια της πενταετούς φοίτησής μου στην ΑΣΠΑΙΤΕ.

Ακόμη ένα ευχαριστώ θα ήθελα να εκφράσω στους συμφοιτητές μου, για τις ανεκτίμητες στιγμές που βιώσαμε και την συμπαράστασή τους στην όλη προσπάθεια της εκπαιδευτικής μας διαδικασίας.

Τέλος, θα ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την πολύτιμη και διαρκή στήριξή τους.

Περιεχόμενα

[Λέξεις Κλειδιά 5](#_Toc77349215)

[Keywords 5](#_Toc77349216)

[Περίληψη 6](#_Toc77349217)

[Abstract 7](#_Toc77349218)

[Πρόλογος 8](#_Toc77349219)

[Ευχαριστίες 9](#_Toc77349220)

[Κεφάλαιο 1: Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας 12](#_Toc77349221)

[1.1. Εισαγωγή – Στόχοι Κεφαλαίου 12](#_Toc77349222)

[1.1.1. Ηλεκτρική Ενέργεια 12](#_Toc77349223)

[1.2. Δομή συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας 12](#_Toc77349224)

[1.3. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 13](#_Toc77349225)

[1.4. Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας 14](#_Toc77349226)

[1.5. Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας 15](#_Toc77349227)

[Κεφάλαιο 2: Ανάλυση ροής φορτίου 16](#_Toc77349228)

[2.1. Εισαγωγή 16](#_Toc77349229)

[2.2. Στατικές εξισώσεις ροής φορτίου 17](#_Toc77349230)

[2.3. Το πρόβλημα της ροής φορτίου 20](#_Toc77349231)

[2.4. Κατασκευή του πίνακα αγωγιμοτήτων Ybus 23](#_Toc77349232)

[2.5. Αναλυτική επίλυση ακαδημαϊκού παραδείγματος τριών ζυγών 25](#_Toc77349233)

[2.6. Η υπολογιστική πλευρά του προβλήματος ροής φορτίου 29](#_Toc77349234)

[2.7. Η μέθοδος Gauss 29](#_Toc77349235)

[2.8. Η μέθοδος Gauss-Seidel 30](#_Toc77349236)

[2.9. Η μέθοδος Newton-Raphson 32](#_Toc77349237)

[Κεφάλαιο 3: Περιγραφή της εργαλειοθήκης MATPOWER 36](#_Toc77349238)

[3.1. Εισαγωγή – Στόχοι Κεφαλαίου 36](#_Toc77349239)

[3.2. Εισαγωγή δεδομένων στο MATPOWER 36](#_Toc77349240)

[3.3. Μοντελοποίηση δεδομένων στο MATPOWER 36](#_Toc77349241)

[3.3.1. Γραμμές μεταφοράς 37](#_Toc77349242)

[3.3.2. Γεννήτριες 37](#_Toc77349243)

[3.3.3. Φορτία 37](#_Toc77349244)

[3.3.4. Εγκάρσια στοιχεία 38](#_Toc77349245)

[3.4. Επίλυση εξισώσεων ροής φορτίου στο MATPOWER 38](#_Toc77349246)

[Κεφάλαιο 4: Παράδειγμα ενεργειακού συστήματος τεσσάρων ζυγών 39](#_Toc77349247)

[4.1. Επεξήγηση του παραδείγματος συστήματος τεσσάρων ζυγών 39](#_Toc77349248)

[4.2. Επίλυση μέσω του MATPOWER 44](#_Toc77349249)

[4.3. Συσχέτιση αέργου ισχύος – μέτρου τάσης ζυγού 46](#_Toc77349250)

[4.4. Παρατηρήσεις ως προς την συσχέτιση αέργου ισχύος – μέτρου τάσης ζυγού για το σύστημα τεσσάρων ζυγών. 49](#_Toc77349251)

[4.5. Σύγκριση καταναλισκόμενης αέργου ισχύος με τις συνολικές πραγματικές και άεργες απώλειες των γραμμών του συστήματος. 50](#_Toc77349252)

[4.6. Παρατηρήσεις ως προς την συσχέτιση αέργου ισχύος-συνολικών απωλειών γραμμών του συστήματος τεσσάρων ζυγών. 54](#_Toc77349253)

[Κεφάλαιο 5: Παράδειγμα ενεργειακού συστήματος πέντε ζυγών 55](#_Toc77349254)

[5.1. Επεξήγηση του παραδείγματος συστήματος πέντε ζυγών 55](#_Toc77349255)

[5.2. Επίλυση μέσω του MATPOWER 57](#_Toc77349256)

[Κεφάλαιο 6: Παράδειγμα ενεργειακού συστήματος έξι ζυγών 59](#_Toc77349257)

[6.1. Επεξήγηση του παραδείγματος συστήματος έξι ζυγών 59](#_Toc77349258)

[6.2. Επίλυση μέσω του MATPOWER 61](#_Toc77349259)

[Κεφάλαιο 7: Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα – Μελλοντική έρευνα 63](#_Toc77349260)

[7.1. Ανακεφαλαίωση 63](#_Toc77349261)

[7.2. Συμπεράσματα 63](#_Toc77349262)

[7.3. Μελλοντική έρευνα 63](#_Toc77349263)

[Παράρτημα A: Κώδικες σε περιβάλλον MATLAB 64](#_Toc77349264)

[A.1. Το παράδειγμα τεσσάρων ζυγών σε περιβάλλον MATPOWER 64](#_Toc77349265)

[A.2. Το παράδειγμα πέντε ζυγών σε περιβάλλον MATPOWER 65](#_Toc77349266)

[A.3. Το παράδειγμα έξι ζυγών σε περιβάλλον MATPOWER 66](#_Toc77349267)

[A.4. Το εργαλείο οπτικοποίησης των συστημάτων του MATPOWER 66](#_Toc77349268)

[Κεφάλαιο 8: Αναφορές-Κατάλογοι 70](#_Toc77349269)

[8.1. Αναφορές 70](#_Toc77349270)

[8.2. Κατάλογος Εικόνων 72](#_Toc77349271)

[8.3. Κατάλογος Πινάκων 73](#_Toc77349272)

[8.4. Κατάλογος Γραφικών Απεικονίσεων 73](#_Toc77349273)

# Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

## Εισαγωγή – Στόχοι Κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται βασικές έννοιες σχετικά με τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και την ηλεκτρική ενέργεια γενικότερα. Περιγράφεται η έννοια της ηλεκτρικής ενέργειας ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται τα δομικά στοιχεία που απαρτίζουν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Σκοπός του κεφαλαίου είναι η πλαισίωση του προβλήματος που μας απασχόλησε σε αυτήν την εργασία μέσω κάποιων εισαγωγικών πληροφοριών.

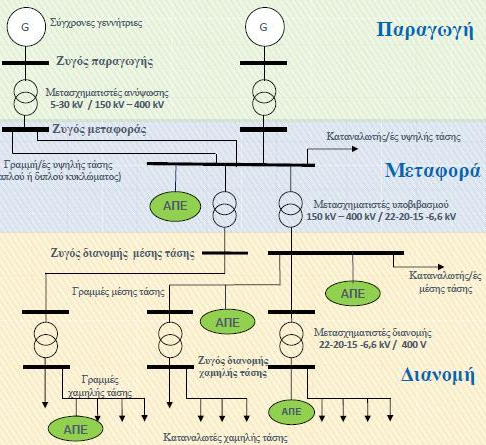
### Ηλεκτρική Ενέργεια

Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μορφή ενέργειας και έχει πληθώρα πλεονεκτημάτων σε σχέση με άλλες μορφές ενέργειας. Το βασικό της χαρακτηριστικό είναι ότι μπορεί να μετατραπεί σε άλλες μορφές ενέργειας με τρόπο αποδοτικό. Είναι μια μορφή ενέργειας που δεν ρυπαίνει κατά την χρήση της ενώ γίνεται προσπάθεια απολιγνιτοποίησης της παραγωγής ώστε να μειωθούν οι περιβαλλοντικές συνέπειες της καύσης των γαιανθράκων. Μεταφέρεται εύκολα σε μεγάλες αποστάσεις με ελάχιστες απώλειες. Αυτά της τα πλεονεκτήματα είχαν ως αποτέλεσμα την ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών παγκοσμίως. Παρόλα αυτά, η ηλεκτρική ενέργεια παρουσιάζει και σαν μειονέκτημα το γεγονός ότι θα πρέπει να καταναλώνεται την στιγμή που παράγεται και αυτό διότι δεν έχουμε ακόμα την δυνατότητα να αποθηκεύσουμε τόσο μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας. Για αυτόν τον λόγο δημιουργήθηκαν τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία συνδέουν την παραγωγή, μέσω των συστημάτων μεταφοράς και διανομής, με τους καταναλωτές.

## Δομή συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ονομάζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων (γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς, διακόπτες κ.λπ.) τα οποία χρησιμοποιούνται για την εξυπηρέτηση του συνόλου των καταναλωτών ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να μπορεί να παράγει αρκετή ηλεκτρική ενέργεια ώστε να καλύπτεται πλήρως η ζήτηση με ασφάλεια και αξιοπιστία. Θα πρέπει δηλαδή ανά πάσα χρονική στιγμή να τηρείται το ενεργειακό ισοζύγιο παραγωγής-ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό φυσικά, θα πρέπει να γίνεται με το χαμηλότερο δυνατό κόστος χωρίς παράλληλα να προκαλούνται περιβαλλοντικές καταστροφές.

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερη πολυπλοκότητα είτε εξυπηρετούν μικρό εύρος γεωγραφικών περιοχών είτε μεγάλο. Αν και το μέγεθος των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας διαφέρει, εμφανίζουν αρκετές ομοιότητες μεταξύ τους. Συγκεκριμένα τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι τριφασικά εναλλασσομένου ρεύματος συχνότητας 50 ή 60 Hz. Για παράδειγμα, σε όλα τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας παρατηρούμε την ύπαρξη διαφορετικών επιπέδων τάσεων τα οποία χωρίζονται μεταξύ τους μέσω μετασχηματιστών. Η δομή των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας προσαρμόζεται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της ζήτησης, όμως όλα τα συστήματα ακολουθούν έναν κοινό άξονα λειτουργίας. Ο άξονας αυτός είναι ότι ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας διακρίνεται στο Σύστημα Παραγωγής και στο Σύστημα Μεταφοράς και Διανομής. Τέλος θα πρέπει να σημειώσουμε πως ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα ή να διασυνδεθεί με γειτονικά συστήματα. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ενδεικτικά ο τρόπος δόμησης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.



**Εικόνα 1** Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας [ Κανέλλος, Φ. (2012)]

## Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ξεκινά από σταθμούς παραγωγής στους οποίους οι διάφορες μορφές ενέργειας μετατρέπονται σε ηλεκτρική. Ανάλογα με την πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας οι σταθμοί παραγωγής διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

* Θερμικοί σταθμοί παραγωγής οι οποίοι μέσω της πυρηνικής σχάσης ή της καύσης λιγνίτη, πετρελαίου, φυσικού αερίου και βιομάζας παράγουν ηλεκτρική ενέργεια.
* Μη θερμικοί σταθμοί παραγωγής οι οποίοι εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια, την αιολική ενέργεια, την υδροδυναμική ενέργεια κ.λπ. για να γίνει η παραγωγή της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Ενώ ανάλογα με τον τρόπο χρήσης τους, διαχωρίζουμε τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε *σταθμούς βάσης* και *σταθμούς αιχμής*. Οι πρώτοι λειτουργούν αδιάλειπτα και είναι αυτοί που καλύπτουν την ζήτηση των καταναλωτών σε πολύ μεγάλο ποσοστό ενώ οι δεύτεροι λειτουργούν σε ώρες μέγιστης ζήτησης. Σταθμοί βάσης είναι συνήθως θερμοηλεκτρικοί σταθμοί ενώ σταθμοί αιχμής είναι εκείνοι που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι παλαιότερα, υπήρχαν μόνο οι κεντρικοί σταθμοί παραγωγής από όπου η ηλεκτρική ενέργεια αποστελλόταν στο σύστημα μεταφοράς και στη συνέχεια στο σύστημα διανομής και τελικά στους καταναλωτές. Αυτό το μοντέλο παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί την *συγκεντρωμένη παραγωγή*. Σήμερα όμως, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται και από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως οι ανεμογεννήτριες ή τα ηλιακά πάνελ τα οποία συνδέονται στην μέση και την χαμηλή τάση. Αυτό το μοντέλο παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί την *διεσπαρμένη παραγωγή* και αυτό διότι συνήθως την συναντάμε κοντά σε σημεία κατανάλωσης.

Τέλος σκόπιμο είναι να αναφέρουμε πως το μεγαλύτερο μέρος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από μεγάλους σταθμούς παραγωγής (άνω των 500MW) και το επίπεδο της τάσης στο στάδιο της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας είναι περίπου στα 20kV.

## Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας

Ένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής ενέργειας, όπως προαναφέρθηκε, είναι ότι μπορεί να μεταφέρεται αποδοτικά σε πολύ μεγάλες αποστάσεις. Στον όρο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνονται όλες οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υπερύψηλης τάσης και όλοι οι σταθμοί ανύψωσης και υποβιβασμού τάσης. Σε όλες τις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας το ρεύμα είναι εναλλασσόμενο είτε αυτές οι γραμμές είναι εναέριες είτε υπόγειες. Σπάνια γίνεται χρήση συνεχούς ρεύματος π.χ. σε περιπτώσεις διασύνδεσης με υποθαλάσσια καλώδια. Η μεταφορά, της ηλεκτρικής ενέργειας από τα σημεία παραγωγής ως τους καταναλωτές επιτυγχάνεται μέσω των ηλεκτρικών γραμμών μεταφοράς. Απαραίτητο στοιχείο για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, είναι το να γίνεται με υψηλή τάση και αυτό διότι έτσι μειώνεται το ρεύμα μεταφοράς και συγχρόνως μειώνονται και οι θερμικές απώλειες. Μειώνοντας το ρεύμα μεταφοράς επέρχεται και μείωση της διατομής των αγωγών μεταφοράς με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση υλικών αλλά και χρημάτων. Η ανύψωση της τάσης γίνεται αμέσως μετά την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας σε υποσταθμούς ανύψωσης τάσης και στην Ελλάδα παίρνει τιμές 150/400 kV. Από το σύστημα μεταφοράς επίσης τροφοδοτούνται ορισμένοι μεγάλοι καταναλωτές υψηλής τάσης οι οποίοι διαθέτουν δικό τους υποσταθμό υποβιβασμού τάσης για την κάλυψη των αναγκών τους.

Τα συστατικά στοιχεία του συστήματος μεταφοράς είναι:

* οι αγωγοί, κυρίως από χαλκό και αλουμίνιο, μέσω των οποίων μεταφέρεται η ηλεκτρική ενέργεια
* οι πυλώνες ή πύργοι, οι οποίοι παρέχουν στήριξη στους αγωγούς των εναέριων γραμμών
* οι μονωτήρες, οι οποίοι συγκρατούν τους αγωγούς από τους πυλώνες.
* οι υποσταθμοί γραμμών μεταφοράς, οι οποίοι είναι μέσα ζεύξης διαφόρων σημείων του δικτύου ενώ εκεί γίνεται επίσης και η όποια μεταβολή της τιμής της τάσης.
* τα συστήματα προστασίας και ελέγχου, τα οποία ελέγχουν τις τιμές των ηλεκτρικών μεγεθών κατά μήκος των γραμμών μεταφοράς ώστε να είναι εντός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας και ταυτόχρονα παρέχουν προστασία από ενδεχόμενους κινδύνους. (π.χ. υπερτάσεις)

Μέσω όλης αυτής της διαδικασίας και με τα μέσα που αναφέρθηκαν παραπάνω, οι γραμμές μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας καταλήγουν σε υποσταθμούς υποβιβασμού τάσης από όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής.

Υπεύθυνος για το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ) Α.Ε. ο οποίος φροντίζει για τη λειτουργία, εκμετάλλευση, διασφάλιση της συντήρησης και την ανάπτυξη του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε ολόκληρη τη χώρα. Μεριμνά για την διασύνδεση με τα άλλα δίκτυα για να διασφαλίζεται ο εφοδιασμός της χώρας με ηλεκτρική ενέργεια, επαρκώς, με ασφάλεια, οικονομικά αποδοτικά και αξιόπιστά. Στόχος είναι η βέλτιστη κατανομή του φορτίου στο σύστημα.

## Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας

Η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες διαδικασίες λειτουργίας και ελέγχου έτσι ώστε η ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης να φτάσει τελικά στους καταναλωτές. Και σε αυτό το στάδιο, περιλαμβάνονται γραμμές μεταφοράς (εναέριες και υπόγειες) και υποσταθμοί υποβιβασμού τάσης, ο οποίοι συνδέουν την διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας με το σύστημα μεταφοράς. Οι γραμμές διανομής μέσης τάσης διαθέτουν τρεις αγωγούς φάσεων ενώ οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης φέρουν πέρα από τους τρεις αγωγούς φάσεων επιπλέον έναν ουδέτερο αγωγό. Τα δίκτυα διανομής διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

* Το δίκτυο διανομής μέσης τάσης ή πρωτεύουσα διανομή (20kV) στο οποίο η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από τους υποσταθμούς μεταφοράς προς τους υποσταθμούς διανομής.
* Το δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης ή δευτερεύουσα διανομή (230V- 400V) στο οποίο η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από τους υποσταθμούς διανομής προς τους καταναλωτές.

Τα δίκτυα διανομής εκτείνονται μέχρι τον μετρητή του καταναλωτή από όπου ξεκινά η εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση και τροφοδοτούνται οι συσκευές κατανάλωσης. Τα νησιά τα οποία λόγω απόστασης δεν μπορούν να ενταχθούν στο διασυνδεδεμένο σύστημα της χώρας αποτελούν το αυτόνομο μη διασυνδεδεμένο σύστημα της χώρας. Για την τροφοδοσία των μη-διασυνδεμένων νησιών αλλά και γενικότερα το σύστημα διανομής υπεύθυνος είναι ο Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ) Α.Ε. ο οποίος φροντίζει για την διατήρηση ασφαλούς, αξιόπιστου και αποδοτικού δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή που καλύπτει, λαμβάνοντας μέριμνα και για το περιβάλλον.

# Ανάλυση ροής φορτίου

## Εισαγωγή

Ανάλυση ροής φορτίου είναι η μελέτη της συμπεριφοράς ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο βρίσκεται υπό συγκεκριμένη φόρτιση στην μόνιμη ημιτονοειδή κατάσταση. Σκοπός είναι ο υπολογισμός των τάσεων όλων των ζυγών του δικτύου καθώς επίσης και των ροών ισχύος σε όλες τις γραμμές και τους μετασχηματιστές.

Οι μελέτες ροών φορτίου εμφανίζουν ενδιαφέρον και είναι εξαιρετικά σημαντικές για τον σχεδιασμό ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ή και για τον επανασχεδιασμό ενός ήδη υπάρχοντος. Συγκεκριμένα η ανάλυση ροής φορτίου είναι απαραίτητη σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας για πληθώρα λόγων μερικοί από τους οποίους είναι:

* Ο έλεγχος των τάσεων και ροών, ώστε να διατηρούνται εντός προκαθορισμένων ορίων λειτουργίας (π.χ. θερμικά όρια γραμμών).
* Η μελέτη επιπτώσεων πιθανών διαταραχών (π.χ. γεννήτρια εκτός λειτουργίας, απώλεια γραμμής).
* Η εφαρμογή της βέλτιστης οικονομοτεχνικής λειτουργίας υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης.
* Οι μελέτες ανάπτυξης και επέκτασης του συστήματος παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Τέτοιες μεταβολές ή επεκτάσεις μπορεί να είναι:
  + Σύνδεση νέων μονάδων παραγωγής.
  + Προσθήκη νέων φορτίων και τροφοδοσία αυτών.
  + Όδευση νέων γραμμών μεταφοράς ή επέκταση ήδη υπαρχόντων.
  + Διασύνδεση με άλλα συστήματα.
* Για την εύρεση αρχικών τιμών για άλλες μελέτες.
* Για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση ροής φορτίου αποτελεσματικά θα πρέπει να αντιμετωπίσουμε δύο θέματα.

1. Η μαθηματική περιγραφή του προβλήματος, η οποία επιτυγχάνεται μέσω κατάλληλης διαφοροποίησης των εξισώσεων κόμβων, με την οποία μπορούμε να περιγράψουμε με ακρίβεια τις σχέσεις τάσεων-ισχύων, οδηγούμενοι σε ένα σύστημα μη γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων.
2. Η εφαρμογή μιας αριθμητικής μεθόδου για την επίλυση των εξισώσεων που προκύπτουν. Αυτό το θέμα αντιμετωπίζεται με χρήση επαναληπτικών τεχνικών λόγω της μη γραμμικότητας των εξισώσεων.

Εφόσον ακολουθήσουμε την παραπάνω μεθοδολογία θα προκύψουν οι λύσεις της ανάλυσης ροής φορτίου οι οποίες όμως θα πρέπει να ικανοποιούν τους εξής περιορισμούς:

* Να ακολουθούνται οι δύο κανόνες του Kirchhoff,
* Να μην υπερβαίνονται οι οριακές δυνατότητες των πηγών άεργου ισχύος.
* Να μην υπερβαίνονται τα όρια λήψης των μετασχηματιστών ελέγχου.
* Να μην υπερφορτίζονται οι γραμμές και οι μετασχηματιστές.
* Οι τάσεις των ζυγών να παραμένουν μέσα στα προδιαγεγραμμένα όρια.

Οι περιορισμοί αυτοί θα πρέπει να τηρούνται σε συνθήκες μέγιστου φορτίου όπως επίσης και κατά την διάρκεια απρόσμενων μεταβολών κατάστασης.

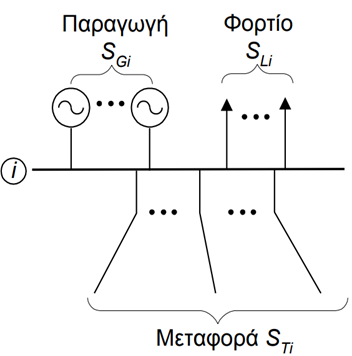
## Στατικές εξισώσεις ροής φορτίου

Η μελέτη των συστημάτων που θα δούμε και σε επόμενα κεφάλαια γίνεται στην ημιτονοειδή μόνιμη κατάσταση και το σύστημα θεωρείται ισοζυγισμένο. Ισοζυγισμένο ονομάζεται το τριφασικό σύστημα στο οποίο ο ουδέτερος δεν διαρρέεται από ρεύμα. Δηλαδή τα ηλεκτρικά φορτία στις τρεις φάσεις είναι ίσα. Για αυτόν τον λόγο για την πραγματοποίηση της ανάλυσης ροής φορτίου γίνεται μελέτη στο μονοφασικό ισοδύναμο του συστήματος.

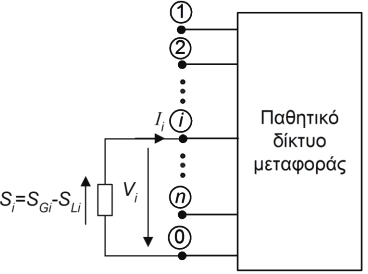
Θεωρώντας τον ζυγό *i* στην γενική του μορφή*,* όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2, βλέπουμε πως σε αυτόν συνδέονται οι γεννήτριες οι οποίες παράγουν μιγαδική ισχύ και φορτία τα οποία καταναλώνουν μιγαδική ισχύ . Επίσης υπάρχουν και οι γραμμές μεταφοράς οι οποίες μεταφέρουν μιγαδική ισχύ . Οι ισχείς αυτές συνδέονται με την σχέση:



Εάν ορίσουμε την έγχυση ισχύος στον ζυγό *i* ,ως την διαφορά μεταξύ της ισχύος παραγωγής και της ισχύος που καταναλώνει το φορτίο και θεωρήσουμε πως αυτή προέρχεται από μια ισοδύναμη πηγή ισχύος, τότε ο ζυγός μπορεί να παρασταθεί όπως στην Εικόνα 3. Όπως καταλαβαίνουμε, το παθητικό δίκτυο μεταφοράς είναι οι γραμμές μεταφοράς και οι μετασχηματιστές του δικτύου ενώ οι ακροδέκτες αντιπροσωπεύουν το n πλήθος των ζυγών. Τέλος βλέπουμε πως γίνεται έγχυση ρεύματος που μεταφράζεται σε ισχύ . Κάνοντας χρήση της μεθόδου των κόμβων προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν την συμπεριφορά του δικτύου στην μόνιμη ημιτονοειδή κατάσταση.



**Εικόνα 2** Γενική μορφή ζυγού (Βοβός & Γιαννακόπουλος 2019)

**Εικόνα 3** Παράσταση συστήματος n ζυγών (Βοβός & Γιαννακόπουλος, 2019)

Όπου:

διάνυσμα διαστάσεων , το οποίο αντιπροσωπεύει τα ρεύματα που εισέρχονται στους ζυγούς.

διάνυσμα διαστάσεων , το οποίο αντιπροσωπεύει τις τάσεις των ζυγών σε σχέση με τον ζυγό αναφοράς, με στοιχεία της μορφής .

πίνακας διαστάσεων , ο οποίος αντιπροσωπεύει τις αγωγιμότητες των ζυγών ,με στοιχεία της μορφής .

Από την εξίσωση διαπιστώνουμε ότι:



Και συνεπώς προκύπτει πως η μεταφερόμενη ισχύς είναι:





Έτσι, η εξίσωση μέσω της μπορεί να εκφραστεί:



Γνωρίζοντας ότι και ότι και λαμβάνοντας τις συζυγείς παραστάσεις των δύο μελών της εξίσωσης προκύπτει ότι:



Όπου: και .

Οι εξισώσεις αυτές μπορούν να περιγράψουν όλους τους ζυγούς σε ένα δίκτυο και ονομάζονται στατικές εξισώσεις ροής φορτίου σε μιγαδική μορφή. Εάν χρησιμοποιήσουμε πολικά μεγέθη όμως οι εξισώσεις αυτές μπορούν να διασπαστούν και να γραφτούν ως εξής:



και



Αυτές είναι οι στατικές εξισώσεις ροής φορτίου σε πραγματική μορφή. Αυτές οι εξισώσεις , , χαρακτηρίζονται από τα παρακάτω:

1. Είναι αλγεβρικές.
2. Είναι μη γραμμικές.
3. Συσχετίζουν τάσεις και ισχείς.
4. Το ισοζύγιο πραγματικής ισχύος εκφράζεται από τη σχέση: 
5. Το ισοζύγιο άεργου ισχύος εκφράζεται από τη σχέση:



1. Οι πραγματικές και άεργες απώλειες είναι συναρτήσεις των μέτρων και των γωνιών των τάσεων, δηλαδή:





1. Οι φασικές γωνίες των τάσεων ζυγών δεν εμφανίζονται ποτέ μόνες τους, αλλά πάντα σαν διαφορές γωνιών .

## Το πρόβλημα της ροής φορτίου

Το πρόβλημα της ροής φορτίου είναι συνδυαστικό καθώς εκτός από γνώσεις γύρω από τα όρια ευστάθειας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας περιέχει έντονο το μαθηματικό στοιχείο. Για την απλοποίηση και την κατανόηση του προβλήματος αρχικά επικεντρωνόμαστε σε έναν γενικό ζυγό όπως αναλύεται παρακάτω.

Κατά την γενική περίπτωση ενός ζυγού *i* μπορούμε να αναγνωρίσουμε τα εξής μεγέθη:

* : η παραγόμενη ενεργός ισχύς.
* : η παραγόμενη άεργος ισχύς.
* : η καταναλισκόμενη ενεργός ισχύς από το φορτίο.
* : η καταναλισκόμενη άεργος ισχύς από το φορτίο.
* : το μέτρο της τάσης του ζυγού.
* : η φασική γωνία τάσης του ζυγού.

Αυτά τα ηλεκτρικά μεγέθη, τα αναγνωρίζουμε σε κάθε ζυγό και συνολικά είναι έξι (6). Έτσι, σε ένα σύστημα *n* ζυγών θα έχουμε 6*n* μεταβλητές οι οποίες μας βοηθούν στην στοιχειοθέτηση του προβλήματος της ανάλυσης ροής φορτίου. Οι μεταβλητές αυτές, μπορούν να διακριθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

* Μεταβλητές διαταραχής: Είναι η καταναλισκόμενη ενεργός και άεργος ισχύς των φορτίων , δηλαδή η και η . Αυτές είναι μεταβλητές οι οποίες δεν μπορούν να βρεθούν υπό τον έλεγχό μας και συνιστούν το διάνυσμα διαταραχής ***p*** το οποίο ορίζεται ως εξής:



* Μεταβλητές ελέγχου: Είναι η παραγόμενη ενεργός και άεργος ισχύς, δηλαδή η και η . Οι μεταβλητές αυτές ονομάζονται έτσι καθώς αποτελούν τα βασικά μέσα για τον έλεγχο του συστήματος. Επίσης, συνιστούν το διάνυσμα ελέγχου ***u*** το οποίο ορίζεται ως εξής:



* Μεταβλητές κατάστασης: Οι τάσεις και οι γωνίες των ζυγών ανήκουν στις μεταβλητές κατάστασης, δηλαδή οι και οι . Οι μεταβλητές αυτές είναι εξαρτημένες από τις μεταβλητές ελέγχου. Αυτές οι μεταβλητές συνιστούν το διάνυσμα κατάστασης ***x*** το οποίο ορίζεται ως εξής:



Έτσι καταλαβαίνουμε πως το θεμιτό είναι τα ισοζύγια ενεργού και άεργου ισχύος να είναι ισορροπημένα. Με βάση τις εξισώσεις και οι 2*n* εξισώσεις ροής φορτίου μπορούν να τεθούν υπό την γενική μορφή:



Όπως παρατηρούμε ο Πίνακας 1 που φαίνεται παρακάτω μας δίνει συγκεντρωτικά τις πληροφορίες που χρειαζόμαστε για την κατανόηση του προβλήματος που καλούμαστε να επιλύσουμε. Οι γνωστές μεταβλητές, λοιπόν είναι 2*n* και είναι η κατανάλωση ενεργού και άεργου ισχύος στους ζυγούς (,) τις οποίες γνωρίζουμε από ιστορικά στοιχεία ή προβλέψεις. Παρατηρούμε επίσης πως οι άγνωστες μεταβλητές είναι 4*n* (,,,) ενώ οι διαθέσιμες εξισώσεις είναι 2*n*. Επομένως δεν μπορούμε να προχωρήσουμε σε επίλυση του συστήματος εκτός αν μειώσουμε τον αριθμό των αγνώστων προκαθορίζοντας κάποιες μεταβλητές. Οι μεταβλητές οι οποίες θα προκαθορίσουμε θα πρέπει να είναι ελέγξιμες από εμάς.

|  |  |
| --- | --- |
| **Για σύστημα *n* ζυγών** | |
| Σύνολο μεταβλητών | 6*n* |
| Γνωστές μεταβλητές | 2*n* |
| Άγνωστες μεταβλητές | 4*n* |
| Διαθέσιμες εξισώσεις | 2*n* |
| Άγνωστες μεταβλητές που προκαθορίζονται | 2*n* |
| Μεταβλητές που προσδιορίζονται | 2*n* |

**Πίνακας 1** Ταξινόμηση μεταβλητών.

Η επιλογή των μεταβλητών που θα προκαθορίσουμε εξαρτάται από το είδος των συσκευών που συνδέονται στον αντίστοιχο ζυγό. Συγκεκριμένα υπάρχουν τρεις κατηγορίες ζυγών:

* *Ζυγός φορτίου*: Στον ζυγό αυτό υπάρχουν μόνο φορτία ενώ απουσιάζει η παραγωγή επομένως αυτόματα μηδενίζονται οι μεταβλητές και. Σε αυτούς τους ζυγούς υπολογίζεται το μέτρο και η φασική γωνία της τάσης και.
* *Ζυγός παραγωγής*: Στον ζυγό αυτό υπάρχουν συνδεδεμένες γεννήτριες στις οποίες ελέγχουμε την παραγόμενη ενεργό ισχύ ,μέσω της μηχανικής ισχύος, και το μέτρο της τάσης ,ρυθμίζοντας το ρεύμα διέγερσης. Σε αυτούς τους ζυγούς υπολογίζεται η παραγόμενη άεργος ισχύς και η φασική γωνία της τάσης .
* *Ζυγός αναφοράς*: Πρόκειται για έναν ζυγό παραγωγής στον οποίο προκαθορίζουμε το μέτρο και την φασική γωνία της τάσης. Συνήθως ορίζουμε το μέτρο της τάσης ίσο με 1pu ενώ την γωνία ίση με 0°. Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε τις φασικές γωνίες των υπόλοιπων ζυγών. Συνήθως ως ζυγός αναφοράς επιλέγεται ο ζυγός με την μεγαλύτερη παραγωγή πραγματικής ισχύος.

Συνοπτικά οι τύποι ζυγών και οι ποσότητες που τους περιγράφουν αναφέρονται στον Πίνακας 2 .

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Τύπος ζυγού** | **Ποσότητες που προκαθορίζονται** | **Ποσότητες που υπολογίζονται** |
| Ζυγός αναφοράς | , | , |
| Ζυγός φορτίου | , | , |
| Ζυγός παραγωγής | , | , |

**Πίνακας 2** Τύποι ζυγών και μεταβλητές

Οι μεταβλητές όμως θα πρέπει να ικανοποιούν τους εξής περιορισμούς:

* 
* 
* 
* 

Εκτός από τους προαναφερθέντες περιορισμούς υπάρχουν και επιπρόσθετοι περιορισμοί στις μεταβλητές ελέγχου για λόγους οικονομικής λειτουργίας του συστήματος.

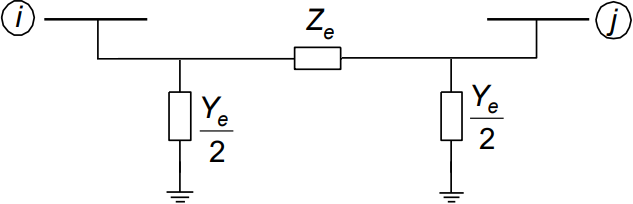
Συμπερασματικά, το πρόβλημα της ροής φορτίου διατυπώνεται ως εξής:

Δοθέντος ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με γνωστό πίνακα αγωγιμοτήτων , γνωστή φόρτιση και συγκεκριμένους περιορισμούς όσον αφορά τις μεταβλητές κατάστασης και ελέγχου, να επιλυθούν οι 2*n* εξισώσεις ροής φορτίου ως προς τις άγνωστες ποσότητες του Πίνακας 2 ,θεωρώντας γνωστές τις ποσότητες που προκαθορίζονται στον ίδιο πίνακα.

## Κατασκευή του πίνακα αγωγιμοτήτων Ybus

Όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα, για να κατασκευάσουμε τις εξισώσεις ροής φορτίου θα πρέπει να ξέρουμε τον πίνακα του δικτύου. Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας σημαντικό ρόλο παίζουν οι γραμμές μεταφοράς και οι μετασχηματιστές επομένως συμβάλλουν στον σχηματισμό του πίνακα . Παρακάτω θα δούμε πώς ακριβώς συμβάλλουν αυτά τα στοιχεία όταν ακολουθούμε την αλγοριθμική μέθοδο σχηματισμού του πίνακα αγωγιμοτήτων των ζυγών.

Γραμμές μεταφοράς



**Εικόνα 4** Ισοδύναμο "π" γραμμής μεταφοράς (Βοβός & Γιαννακόπουλος, 2019)

Στην Εικόνα 6 Ισοδύναμο "π" γραμμής μεταφοράς (Βοβός & Γιαννακόπουλος, 2019)

παρουσιάζεται το ισοδύναμο «π» κύκλωμα μια γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους η οποία συνδέει τους ζυγούς *i* και *j*. Αυτή η γραμμή μεταφοράς διαμορφώνει τα στοιχεία του πίνακα αγωγιμοτήτων ως εξής:







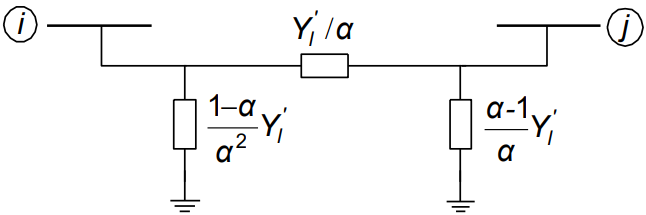


Όπου με δείκτη *old* χαρακτηρίζονται οι τιμές πριν την σύνδεση των δύο ζυγών και με δείκτη *new* χαρακτηρίζονται οι τιμές μετά την σύνδεση των δύο ζυγών. Επίσης όπου:

: Η εν σειρά σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς.

: Η συνολική εγκάρσια αγωγιμότητα της γραμμής μεταφοράς.

Μετασχηματιστές



**Εικόνα 5** Ισοδύναμο "π" μετασχηματιστή με αγωγιμότητα σκέδασης αναφερόμενη στην πλευρά του ζυγού j (Βοβός & Γιαννακόπουλος, 2019)

Στην Εικόνα 7 Ισοδύναμο "π" μετασχηματιστή με αγωγιμότητα σκέδασης αναφερόμενη στην πλευρά του ζυγού j (Βοβός & Γιαννακόπουλος, 2019)

παρουσιάζεται το ισοδύναμο «π» κύκλωμα ενός μετασχηματιστή με σταθερό λόγο μετασχηματισμού ο οποίος συνδέεται μεταξύ των ζυγών *i* και *j.* Η αγωγιμότητα σκέδασης του μετασχηματιστή είναι ως προς την πλευρά του ζυγού j. Επομένως, τα στοιχεία του πίνακα αγωγιμοτήτων διαμορφώνονται ως εξής:









Όπου:

Η αγωγιμότητα σκέδασης του μετασχηματιστή ως προς τον ζυγό j.

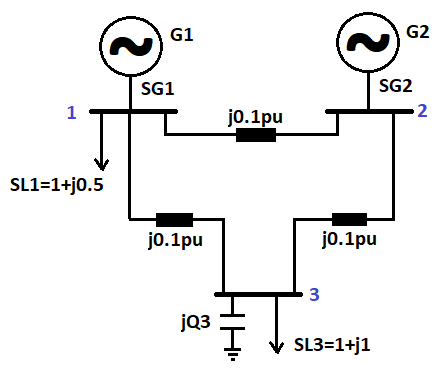
Ο σταθερός λόγος μετασχηματισμού.

## Αναλυτική επίλυση ακαδημαϊκού παραδείγματος τριών ζυγών

Όπως έχουμε προαναφέρει, η επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου χαρακτηρίζεται από αυξημένη πολυπλοκότητα όταν πρόκειται να λυθούν από τον ανθρώπινο παράγοντα. Επομένως στο παράδειγμα που ακολουθεί θα γίνουν κάποιες απλοποιήσεις ώστε να οι απαιτούμενοι υπολογισμοί να μπορούν να πραγματοποιηθούν χωρίς την χρήση κάποιου λογισμικού. Οι παραδοχές που κάνουμε είναι οι εξής:

* Όλες οι αντιστάσεις των γραμμών μεταφοράς θεωρούνται αμελητέες.
* Τα φορτία των γραμμών είναι αρκετά μικρά ώστε να προκύπτουν μικρές γωνίες ισχύος και να ισχύει ότι . Αυτή η παραδοχή οδηγεί σε γραμμικοποίηση των εξισώσεων ροών φορτίου για ευκολότερη διαχείριση από εμάς.

Από την Εικόνα 6 , βλέπουμε πως οι αντιδράσεις των γραμμών είναι *j*0.1 pu. Σαν βάση ισχύος θεωρήσαμε τα 50 MVA ενώ τα μέτρα των τάσεων σε όλους τους ζυγούς είναι ίσα με 1 pu. Τα δεδομένα ισχύος παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.



**Εικόνα 6** Μονογραμμικό διάγραμμα συστήματος τριών ζυγών (Βοβός & Γιαννακόπουλος, 2019

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Ζυγός** | **Πραγματικό φορτίο (pu)** | **Άεργο**  **φορτίο (pu)** | **Πραγματική παραγωγή (pu)** | **Άεργος παραγωγή (pu)** |
| 1 |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |

Να υπολογιστούν:

1. Οι παραγωγές αέργου ισχύος.
2. Οι ισχύς που ρέουν στις γραμμές.
3. Οι πραγματικές και άεργες απώλειες.

Λύση

1. Ο πίνακας αγωγιμοτήτων του δικτύου της Εικόνα 6 είναι:



Εφαρμόζουμε τις στατικές εξισώσεις ροής φορτίου και για κάθε ζυγό.

**Ζυγός 1:**

Πραγματική ισχύς





Άεργος ισχύς





Ομοίως προκύπτουν και οι παρακάτω εξισώσεις για τον ζυγό 2 και 3.

**Ζυγός 2:**





**Ζυγός 3:**





Για να υπολογίσουμε τις άγνωστες ποσότητες *δ2*και *δ3* θα λύσουμε το σύστημα εξισώσεων και . Όμως, επειδή ισχύει ότι οι γωνίες είναι πολύ μικρές αρκετά ώστε να ισχύει . Επομένως οι εξισώσεις αυτές μπορούν να γραφτούν ως εξής:

Για την εξίσωση





Για την εξίσωση



Άρα αντικαθιστώντας την τιμή της *δ3* στην εξίσωση λαμβάνουμε την τιμή της *δ2.*



Άρα:



Αντικαθιστώντας τις τιμές των και στις εξισώσεις , και λαμβάνουμε ότι:



1. Γνωρίζοντας πλέον όλες τις τάσεις των ζυγών μπορούμε να υπολογίσουμε και την ροή ισχύος στις γραμμές μεταφοράς. Οι πραγματικές απώλειες έχουν αμεληθεί επομένως έχουμε:

Ροή πραγματικής ισχύος







Ροή αέργου ισχύος







1. Οι πραγματικές απώλειες είναι μηδενικές από εκφώνηση. Οι άεργες απώλειες προσδιορίζονται ως η διαφορά συνολικής παραγωγής – συνολικής κατανάλωσης. Έτσι έχουμε:



## Η υπολογιστική πλευρά του προβλήματος ροής φορτίου

Όπως έγινε φανερό από το προηγούμενο παράδειγμα η ανάλυση ροής φορτίου μπορεί να γίνει αρκετά περίπλοκη ειδικά σε περιπτώσεις συστημάτων με πληθώρα ζυγών άρα και παραμέτρων. Έτσι λοιπόν, αναπτύχθηκαν κάποιες αριθμητικές επαναληπτικές μέθοδοι για την επίλυση των μη γραμμικών εξισώσεων ροής φορτίου. Τέτοιες μέθοδοι υπάρχουν αρκετές όμως έχουν ως κοινό στοιχείο τον τρόπο προσέγγισης του προβλήματος. Ακολουθεί η διαδικασία επίλυσης σε βήματα:

1. Κάνουμε μια αρχική εκτίμηση για τα μέτρα και τις γωνίες των τάσεων των ζυγών του δικτύου.
2. Εφαρμόζουμε την επαναληπτική διαδικασία που μας υποδεικνύει η εκάστοτε μέθοδος και έτσι προκύπτουν νέες βελτιωμένες τιμές.
3. Η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται μέχρι οι νέες τιμές να αποκλίνουν ελάχιστα από τις προηγούμενές τους. Θα πρέπει δηλαδή να ικανοποιείται ένα κριτήριο σύγκλισης το οποίο εξαρτάται από την υπολογιστική μέθοδο που χρησιμοποιούμε.
4. Για να συμπληρωθούν οι υπολογισμοί, θα πρέπει να προσδιοριστεί η ισχύς του ζυγού αναφοράς αλλά και η ροή ισχύος στις γραμμές μεταφοράς.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν κάποιες γνωστές μέθοδοι για την επίλυση των μη γραμμικών εξισώσεων που βρίσκουν εφαρμογή στα προβλήματα ροής φορτίου που πραγματευόμαστε.

## Η μέθοδος Gauss

Αρχικά θα αναφερθούμε στην μέθοδο Gauss ως εισαγωγή καθώς από αυτήν απορρέει η μέθοδος Gauss-Seidel την οποία θα αναπτύξουμε σε επόμενη ενότητα η οποία χρησιμοποιείται αρκετά για προβλήματα ανάλυσης ροής φορτίου.

Σε αυτήν την μέθοδο, οι εξισώσεις ροής φορτίου γράφονται στην εναλλακτική μορφή :



Στη συνέχεια η εξίσωση χρησιμοποιείται, ενώ αρχικά κάνουμε μια αυθαίρετη εκτίμηση για την ζητούμενη ρίζα, ώστε να βρεθεί μια λύση που να προσεγγίζει την πραγματική. Ο αλγόριθμος Gauss χρησιμοποιεί την αυθαίρετη λύση για τον προσδιορισμό μιας καλύτερης μέσω επαναληπτικής διαδικασίας . Η επαναληπτική διαδικασία αυτή εκφράζεται από την σχέση:



Σε περίπτωση που η βελτίωση ανάμεσα σε δύο διαδοχικές επαναλήψεις γίνει μικρότερη από ένα προκαθορισμένο όριο ανοχής (*ε*) η επαναληπτική διαδικασία σταματά. Δηλαδή όταν ισχύει ότι:



Τα μειονεκτήματα αυτού του αλγορίθμου είναι ότι δεν συγκλίνει πάντοτε ή εάν συγκλίνει το κάνει με έναν σχετικά αργό ρυθμό καθώς χρειάζονται πολλές επαναλήψεις μέχρι την προσέγγιση της ρίζας της εξίσωσης.

## Η μέθοδος Gauss-Seidel

Η μέθοδος αυτή αποτελεί βελτιωμένη μορφή της προηγούμενης και είναι μια από τις απλούστερες επαναληπτικές μεθόδους για την ανάλυση ροής φορτίου. Ακριβώς επειδή είναι μια απλή μέθοδος έχει και μεγάλη παιδαγωγική σημασία. Πλέον χρησιμοποιείται για την ανάλυση μικρών ενεργειακών συστημάτων αλλά και σε πολυπλοκότερα ώστε να βρεθεί μια αρχική προσεγγιστική λύση η οποία στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθεί από την μέθοδο Newton-Raphson για την προσέγγιση μιας καλύτερης λύσης.

Το πλεονέκτημα της μεθόδου Gauss-Seidel σε σχέση με την μέθοδο Gauss είναι ότι η σύγκλιση γίνεται ταχύτερα και αυτό διότι για τον υπολογισμό της μεταβλητής *xi* στην επανάληψη ν+1, χρησιμοποιούμε τις ήδη βελτιωμένες τιμές που ήδη έχουν υπολογιστεί στην ίδια επανάληψη. Ο επαναληπτικός αλγόριθμος έχει αυτήν την μορφή:



Πρακτικά, οι εξισώσεις ροής φορτίου για αριθμό επαναλήψεων *i=1,2,3…,n* γράφονται ως εξής:



Επομένως:



Έτσι, ο αλγόριθμος Gauss-Seidel, μέσω της διαμορφώνεται ως εξής:



Κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής, τα είδη των ζυγών αντιμετωπίζονται με διαφορετικό τρόπο. Παρακάτω αναλύεται ο τρόπος διαχείρισης των ζυγών:

* Ζυγός αναφοράς: Η τάση του ζυγού είναι προκαθορισμένη άρα και γνωστή επομένως δεν χρειάζεται να γίνει κάποιος υπολογισμός. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η επαναληπτική διαδικασία να εφαρμόζεται για *i≠1*.
* Ζυγός φορτίου: Στο είδος του ζυγού αυτού έχουμε γνωστά τα μεγέθη *Pi  και Qi* επομένως με την εφαρμογή της εξίσωσης μπορούμε να υπολογίσουμε βελτιωμένες τιμές για το μέτρο και την φασική γωνία της τάσης.
* Ζυγός παραγωγής: Στον ζυγό αυτόν δεν γνωρίζουμε την ποσότητα *Qi* , επομένως δεν μπορούμε να υπολογίσουμε απευθείας τις βελτιωμένες τιμές τάσης. Σε έναν τέτοιο ζυγό, για να διατηρήσουμε μια σταθερή τιμή τάσης πρέπει να έχουμε και σταθερή άεργο ισχύ έγχυσης. Έτσι, θα εκφράσουμε έμμεσα την *Qi* από τις πιο πρόσφατες τιμές των τάσεων των ζυγών και μέσω της εξίσωσης έχουμε:



Για να είναι αποδεκτή η λύση αυτή για την άεργο ισχύ θα πρέπει να βρίσκεται εντός των προκαθορισμένων ορίων που υποδεικνύεται από την σχέση . Στην περίπτωση που λάβουμε τιμή αέργου ισχύος μεγαλύτερη από το όριο αυτόματα θεωρούμε πως αυτή η τιμή είναι η μέγιστη για τον ζυγό αυτό. Αντίστοιχα, στην περίπτωση που η λύση για την άεργο ισχύ είναι μικρότερη από την ελάχιστη επιτρεπτή, αυτόματα θεωρούμε πως η τιμή που βρήκαμε είναι η ελάχιστη τιμή αέργου ισχύος για τον ζυγό. Στις δύο περιπτώσεις αυτές όπως είναι κατανοητό δεν μπορούμε να διατηρήσουμε σταθερή τιμή .Έτσι, έχοντας προκαθορίσει έμμεσα την άεργο ισχύ σε έναν ζυγό, ο ζυγός αυτός συμπεριφέρεται σαν ζυγός φορτίου και τον αντιμετωπίζουμε πλέον σαν τέτοιο.

## Η μέθοδος Newton-Raphson

Παρόλο που η μέθοδος Gauss-Seidel είναι αρκετά απλή δεν εφαρμόζεται πλέον σε μεγάλα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας διότι συγκλίνει βραδέως. Αντίθετα η μέθοδος Newton-Raphson συγκλίνει εξίσου γρήγορα για μικρά και μεγάλα συστήματα και πλέον προτιμάται για την επίλυση μεγάλων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας παρόλη την αυξημένη πολυπλοκότητά της σε σχέση με εκείνη της μεθόδου Gauss-Seidel.

Στην μέθοδο αυτή, για μια εξίσωση ,κάνουμε μια αρχική εκτίμηση , αν είναι το σφάλμα της εκτίμησης αυτής τότε η λύση της εξίσωσης θα πρέπει να είναι:



Μετά από εφαρμογή του αναπτύγματος Taylor και υποθέτοντας ότι το σφάλμα Δx είναι αρκετά μικρό, οι όροι δευτέρας και ανώτερης τάξης μπορούν να αμεληθούν και έχουμε:



Από την εξίσωση μπορούμε να προσεγγίσουμε το σφάλμα ως εξής:



Προσθέτοντας κάθε φορά το υπολογιζόμενο σφάλμα στην αρχική εκτίμηση λαμβάνουμε την βελτιωμένη λύση . Ο επαναληπτικός αλγόριθμος Newton-Raphson εκφράζεται ως εξής:



Η επαναληπτική διαδικασία τερματίζεται όταν το σφάλμα είναι μικρότερο από ένα όριο ανοχής ε. Το σύστημα εξισώσεων:



Μπορούμε να το εκφράσουμε ως εξής:



Ή υπό την μορφή πινάκων:



Έτσι, για σύστημα εξισώσεων, ο αλγόριθμος Newton-Raphson, προσθέτοντας το σφάλμα σε κάθε επανάληψη διαμορφώνεται ως εξής:



Ο πίνακας **J** ονομάζεται Ιακωβιανός πίνακας και πρέπει να υπολογίζεται σε κάθε επανάληψη μέχρις ότου τα σφάλματα να είναι κάτω από το επιτρεπτό όριο.

Πρακτικά, οι εξισώσεις ροής φορτίου για αριθμό επαναλήψεων *i=1,2,3…,n* γράφονται ως εξής:





Ακολουθώντας την διαδικασία που περιγράψαμε προηγουμένως για την μέθοδο αυτή, λαμβάνουμε ότι:



Ή συνοπτικά:



Οπότε:



Ο αλγόριθμος Newton-Raphson συνεπώς, εκφράζεται ως εξής:



Όπου:



Τα στοιχεία των διανυσμάτων και για αριθμό επαναλήψεων *i=1,2,3…,n* ορίζονται ως εξής:



Όπου:



Η επαναληπτική διαδικασία τερματίζεται όταν για όλους τους ζυγούς του δικτύου ισχύει ότι:



Κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής, τα είδη των ζυγών αντιμετωπίζονται με διαφορετικό τρόπο. Παρακάτω αναλύεται ο τρόπος διαχείρισης των ζυγών:

* Ζυγός αναφοράς: Η τάση του ζυγού είναι προκαθορισμένη άρα και γνωστή επομένως δεν χρειάζεται να γίνει κάποιος υπολογισμός.
* Ζυγός φορτίου: Στο είδος του ζυγού αυτού με την εφαρμογή των εξισώσεων και μπορούμε να υπολογίσουμε βελτιωμένες τιμές για το μέτρο και την φασική γωνία της τάσης.
* Ζυγός παραγωγής: Στον ζυγό αυτό, είναι γνωστή και προκαθορισμένη η τιμή της τάσης *Vi* επομένως και το σφάλμα εκμηδενίζεται. Συνεπώς, μπορούμε να διαγράψουμε την στήλη αυτή του Ιακωβιανού πίνακα καθώς αποτελούν παράγωγο μιας σταθεράς. Ο πίνακας αυτός όμως θα πρέπει να είναι τετραγωνικός επομένως θα χρειαστεί να διαγραφεί και μια γραμμή. Λόγω του ότι δεν γνωρίζουμε την παραγωγή αέργου ισχύος γίνεται απαλοιφή της σχέσης . Η νέα τιμή της φασικής γωνίας της τάσης υπολογίζεται με την εφαρμογή των εξισώσεων και . Σε κάθε επανάληψη θα πρέπει να γίνεται έλεγχος της τιμής της αέργου ισχύος έτσι ώστε να βρίσκεται εντός των ορίων. Στην περίπτωση που λάβουμε τιμή αέργου ισχύος μεγαλύτερη από το όριο αυτόματα θεωρούμε πως αυτή η τιμή είναι η μέγιστη για τον ζυγό αυτό. Αντίστοιχα, στην περίπτωση που η λύση για την άεργο ισχύ είναι μικρότερη από την ελάχιστη επιτρεπτή, αυτόματα θεωρούμε πως η τιμή που βρήκαμε είναι η ελάχιστη τιμή αέργου ισχύος για τον ζυγό. Στις δύο περιπτώσεις αυτές όπως είναι κατανοητό δεν μπορούμε να διατηρήσουμε σταθερή τιμή .Έτσι, ο ζυγός αυτός συμπεριφέρεται σαν ζυγός φορτίου και τον αντιμετωπίζουμε πλέον σαν τέτοιο.

# Περιγραφή της εργαλειοθήκης MATPOWER

## Εισαγωγή – Στόχοι Κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό θα δούμε κάποιες βασικές λειτουργίες της εργαλειοθήκης MATPOWER έτσι ώστε να υπάρχει εξοικείωση με το λογισμικό αυτό αλλά και την βέλτιστη κατανόηση της χρήσης του για το πρόβλημα της ανάλυσης ροής φορτίου. Γενικά το MATPOWER πρόκειται για μια δωρεάν, ανοιχτού κώδικά εργαλειοθήκη, κατάλληλη για την προσομοίωση και την επίλυση της ροής ισχύος αλλά και της βέλτιστης ροής ισχύος σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Το MATPOWER έχει τεράστια εκπαιδευτική αλλά και ερευνητική σημασία καθώς είναι αποδοτικό διατηρώντας ταυτόχρονα ευκολία στη χρήση καθιστώντας το έτσι κατανοητό και εύκολα τροποποιήσιμο.

Η κύρια λειτουργία του MATPOWER ,με την οποία ασχολούμαστε στην πτυχιακή αυτή εργασία, είναι η επίλυση ροής ισχύος σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Το λογισμικό αυτό, περιέχει έναν μεγάλο αριθμό έτοιμων παραδειγμάτων μοντέλων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είτε αυτούσια είτε τροποποιημένα σύμφωνα με τα δικά μας δεδομένα. Τέτοια παραδείγματα θα εξετάσουμε στα επόμενα κεφάλαια.

## Εισαγωγή δεδομένων στο MATPOWER

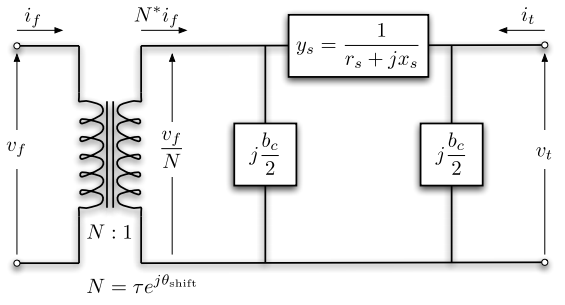
Σε περίπτωση που επιθυμούμε να τροποποιήσουμε ένα ήδη υπάρχον σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ή να προσομοιώσουμε ένα νέο, θα πρέπει τα δεδομένα που εισάγουμε να είναι σε μορφή πινάκων τα οποία θα αποτελούν ένα αρχείο και αφού φορτώσουμε το αρχείο θα μπορεί να γίνει η επεξεργασία τους. Τα δεδομένα αυτά, φορτώνονται μέσω της εντολής >> mpc = loadcase(casefilename); .Επομένως οι πίνακες που εισέρχονται σαν δεδομένα είναι η χρησιμοποιούμενη βάση ισχύος (baseMVA) η οποία είναι ένα διάνυσμα 1×1, τα στοιχεία των ζυγών (bus), τα στοιχεία των γραμμών (branch), τα στοιχεία των γεννητριών (gen) και προαιρετικά το κόστος γεννητριών (gencost). Τα δεδομένα αυτά είναι διαφορετικά από το ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας στο άλλο γεγονός που τα κάνει μοναδικά. Γνωρίζοντας τα δεδομένα αυτά και εφόσον τα εισάγουμε στο MATPOWER εκτελούνται οι κατάλληλες διεργασίες και λαμβάνουμε αποτελέσματα για την ανάλυση ροής φορτίου με την οποία ασχολούμαστε. Συγκεκριμένα η ανάλυση ροής ισχύος γίνεται μέσω της εντολής >> results = runpf(casedata);.

## Μοντελοποίηση δεδομένων στο MATPOWER

Τα δεδομένα όπως αναφέραμε και νωρίτερα, είναι σε μορφή πινάκων λόγω του πλεονεκτήματος της γλώσσας προγραμματισμού του MATLAB να διαχειρίζεται μήτρες και διανύσματα αποτελεσματικά. Για την ανάλυση ροής ισχύος στην μόνιμη ημιτονοειδή κατάσταση, η εργαλειοθήκη MATPOWER κάνει χρήση των συνηθισμένων μοντέλων, όπως αυτά που αναλύσαμε στο Κεφάλαιο 2, για την επίλυση του συστήματος ώστε να λυθούν οι στατικές εξισώσεις ροής φορτίου της μορφής .Στη συνέχεια θα αναλύσουμε την μοντελοποίηση που κάνει το MATPOWER για να προσομοιώσει τα συστατικά στοιχεία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να γίνει η εύρεση των τάσεων όλων των ζυγών και η ροή ισχύος στις γραμμές μεταφοράς. Τέλος για να κατανοήσουμε το περιβάλλον του λογισμικού αυτούn αλλά και τα αποτελέσματα τα οποία λαμβάνουμε, θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα μέτρα όλων των ποσοτήτων εκφράζονται στο ανά μονάδα σύστημα και οι γωνίες των μιγαδικών ποσοτήτων είναι εκφρασμένες σε ακτίνια.

### Γραμμές μεταφοράς

Για την μοντελοποίηση των γραμμών μεταφοράς εναλλασσομένου ρεύματος, μετασχηματιστών αλλά και των μετασχηματιστών ρύθμισης το MATPOWER χρησιμοποιεί το ισοδύναμο «π» μοντέλο γραμμής μεταφοράς σε σειρά με μια σύνθετη αντίσταση με συνολική χωρητικότητα φόρτισης σε σειρά με έναν μετασχηματιστή ρύθμισης όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



**Εικόνα 7** Μοντέλο γραμμής μεταφοράς του MATPOWER (Ray D. Zimmerman,Carlos E. Murillo-Sanchez 2020)

Όπου:

*τ* : το μέγεθος του ονομαστικού λόγου μετασχηματισμού.

*θshifts* : η γωνία αλλαγής φάσης.

### Γεννήτριες

Οι γεννήτριες μοντελοποιούνται από το MATPOWER ως μια μιγαδική έγχυση ισχύος σε έναν συγκεκριμένο ζυγό. Για έναν γενικό ζυγό *i* ισχύει ότι:



Η μιγαδική έγχυση σε έναν ζυγό αποτελεί ένα διάνυσμα . Οι τιμές του πραγματικού μέρους της μιγαδικής έγχυσης αλλά και οι τιμές του φανταστικού μέρους της μιγαδικής έγχυσης συμπληρώνονται στον πίνακα με τα στοιχεία των γεννητριών, δηλαδή τον πίνακα gen. Αυτά τα δεδομένα καταχωρούνται από εμάς σε MW και MVar όμως στην συνέχεια μετατρέπονται οι τιμές αυτές στο ανά μονάδα σύστημα για να υλοποιηθούν οι κατάλληλοι υπολογισμοί. Μια γεννήτρια με αρνητική έγχυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση ενός αποσπώμενου φορτίου.

### Φορτία

Με παρόμοιο τρόπο το MATPOWER μοντελοποιεί τα σταθερά φορτία που υπάρχουν στο εκάστοτε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, τα σταθερά φορτία αντιμετωπίζονται ως μια σταθερή ποσότητα πραγματικής και αέργου ισχύος που καταναλώνεται πάνω σε έναν ζυγό. Γενικά, για έναν ζυγό *i*, ισχύει ότι:



Η μιγαδική κατανάλωση ισχύος σε έναν ζυγό αποτελεί ένα διάνυσμα . Όπως και στις γεννήτριες τα δεδομένα ισχύος καταχωρούνται από εμάς στον αντίστοιχο πίνακα των ζυγών (bus) σε MW ή MVar ανάλογα την περίπτωση και στην συνέχεια γίνεται η μετατροπή τους στο ανά μονάδα σύστημα.

### Εγκάρσια στοιχεία

Ένα εγκάρσια διασυνδεμένο στοιχείο, όπως ένας πυκνωτής ή ένα πηνίο, αναπαρίσταται ως μια σταθερή εμπέδηση ως προς τη γη σε έναν ζυγό. Η σύνθετη αγωγιμότητα ενός εγκάρσιου στοιχείου σε έναν γενικό ζυγό *i* δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:



Η συνολική σύνθετη αγωγιμότητα των εγκάρσιων στοιχείων σε όλους τους ζυγούς αποτελεί ένα διάνυσμα και τα δεδομένα συμπληρώνονται στον πίνακα που μας παρέχει πληροφορίες για τους ζυγούς (bus matrix).

## Επίλυση εξισώσεων ροής φορτίου στο MATPOWER

Αρχικά, στο MATPOWER επιλέγεται ένας ζυγός με μια γεννήτρια ως ζυγός αναφοράς και θεωρείται πως η τάση του ζυγού αυτού έχει μέτρο ίσο με 1 pu και γωνία 0 rad. Ενώ η τάση του ζυγού είναι γνωστή, η έγχυση πραγματικής ισχύος στον ζυγό αυτό θεωρείται άγνωστη ώστε να αποφύγουμε την υπερβολική διευκρίνηση του προβλήματος.

Για την επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου στο MATPOWER, αρχικά γίνεται ο προσδιορισμός του πίνακα αγωγιμοτήτων Ybus. Στον πίνακα αυτό, ενσωματώνονται οι σταθερές σύνθετες αντιστάσεις του μοντέλου ενώ ο ίδιος ο πίνακας είναι διαστάσεων . Ο πίνακας αυτός επίσης. Συσχετίζει το ρεύμα των ζυγών με τις τάσεις μέσω της εξής σχέσης:



Στην συνέχεια, οι εγχύσεις των γεννητριών και οι καταναλώσεις των φορτίων στους ζυγούς σχηματίζουν τις AC εξισώσεις του ισοζυγίου ισχύος, οι οποίες στο MATPOWER εκφράζονται ως μια περίπλοκη μορφή πίνακα:



Εφόσον έχει γίνει ο προσδιορισμός των εξισώσεων ροής φορτίου, θα πρέπει να εκτελεστεί η εντολή runpf (run power flow). Έτσι, γίνεται κλήση μιας συνάρτησης η οποία δημιουργεί μια δομή που σαν όρισμα έχει τα δεδομένα του συστήματος το οποίο θέλουμε να επιλύσουμε (casedata). Τα αποτελέσματα επιστρέφονται πληκτρολογώντας >> results = runpf (casefata); . Εσωτερικά, η runpf εκτελεί μια σειρά από μετατροπές στα δεδομένα του προβλήματος και γίνεται κλήση κατάλληλης ρουτίνας για την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου. Όλοι οι υπολογισμοί γίνονται με τα νέα τροποποιημένα δεδομένα ενώ πριν λάβουμε τα αποτελέσματα γίνεται και πάλι μετατροπή των αποτελεσμάτων στην αρχική μορφή.

# 

# Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα – Μελλοντική έρευνα

## Ανακεφαλαίωση

Ανακεφαλαιώνοντας, στην εργασία αυτή αρχικά έγινε εισαγωγή στην έννοια των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια, στο δεύτερο κεφάλαιο, έγινε σύντομη αναφορά στις μεθόδους επίλυσης του προβλήματος της ανάλυσης ροής ισχύος και επιλύθηκε ένα παράδειγμα τριών ζυγών. Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάστηκε η εργαλειοθήκη MATPOWER και έγινε εξοικείωση με το περιβάλλον του. Στο κεφάλαιο 4, στο οποίο δόθηκε σημαντική βαρύτητα επεξηγήθηκε και επιλύθηκε η περίπτωση case4gs η οποία αφορά σύστημα τεσσάρων ζυγών με την βοήθεια του MATPOWER. Στο ίδιο κεφάλαιο εξετάσθηκε η συσχέτιση της αέργου ισχύος με το μέτρο τάσης ζυγού αλλά και η συσχέτιση της αέργου ισχύος με τις συνολικές απώλειες των γραμμών του συστήματος. Τέλος στα Κεφάλαια 5 και 6 έγινε μια παρουσίαση και επεξήγηση των συστημάτων πέντε (case5) και έξι (case6ww) ζυγών αντίστοιχα ενώ συγχρόνως και αυτά επιλύθηκαν με την χρήση του MATPOWER.

## Συμπεράσματα

Με το πέρας της εργασίας αυτής μπορούμε να εξάγουμε και κάποια γενικά συμπεράσματα σχετικά με την ανάλυση ροής ισχύος σε δίκτυα εναλλασσομένου. Πιο ειδικά, μέσα από το Κεφάλαιο 2, έγινε κατανοητό πως η ανάλυση ροής ισχύος είναι ένα πρόβλημα πολλών παραμέτρων το οποίο ναι μεν μπορεί να λυθεί χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες μεθόδους και γνώσεις μαθηματικών αλλά στην πράξη είναι αρκετά δύσκολο να υλοποιηθεί ειδικά για συστήματα πολλών ζυγών. Όπως είδαμε και από το παράδειγμα τριών ζυγών που επιλύθηκε χωρίς την χρήση κάποιου λογισμικού χρειάστηκαν αρκετές παραδοχές ώστε το πρόβλημα να είναι προσιτό προς λύση από τον ανθρώπινο παράγοντα. Πόσο μάλλον σε περιπτώσεις συστημάτων περισσότερων ζυγών ή σε ρεαλιστικά συστήματα τα οποία απαρτίζονται από εκατοντάδες ζυγούς. Έτσι μέσα από τα επόμενα κεφάλαια είδαμε πως με την χρήση του εργαλείου MATPOWER μπορούμε να λάβουμε πληθώρα την λύση που αναζητούμε εύκολα και γρήγορα είτε για συστήματα μερικών ζυγών είτε για μεγαλύτερα. Επιπλέον, συμπεραίνουμε πως η απεριόριστη αύξηση κατανάλωσης άεργου ισχύος σε έναν ζυγό επιφέρει επιβάρυνση σε όλο το σύστημα και κατ’ επέκταση αστάθεια τάσης ενώ σε περίπτωση που ξεπεραστεί το όριο αντοχής έχουμε κατάρρευση του δικτύου. Τέλος παρατηρήσαμε πως η αύξηση της καταναλισκόμενης αέργου ισχύος από ένα φορτίο αρκεί για να φορτίσει τις γραμμές μεταφοράς σε σημείο τέτοιο όπου οι συνολικές απώλειες ισχύος να αυξάνονται ραγδαία.

## Μελλοντική έρευνα

Η εργασία αυτή θα μπορούσε να επεκταθεί μελλοντικά καθώς πραγματεύεται ένα εύρος ενεργειακών τομέων. Συγκεκριμένα θα μπορούσε κανείς να μελετήσει συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με μεγαλύτερο αριθμό ζυγών επομένως και πολυπλοκότερα. Επίσης, εκτός από την ανάλυση ροής ισχύος η εργασία αυτή θα μπορούσε να σταθεί έναυσμα για μελέτη συστημάτων στην βέλτιστη οικονομική λειτουργία (runopf). Τέλος, έχοντας διαπιστώσει πως η άνευ ορίων αύξηση της αέργου ισχύος κατανάλωσης σε έναν ζυγό επηρεάζει όλο το σύστημα σε σημείο που η ευστάθειά του αμφισβητείται, θα μπορούσε να γίνει μελέτη για την αντιστάθμιση της αέργου ισχύος.

# Αναφορές-Κατάλογοι

## Αναφορές

|  |  |
| --- | --- |
| [1] | Ν. Βοβός και Γ. Γιαννακόπουλος, Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Θεσσαλονίκη: ΖΗΤΗ, 2019. |
| [2] | Ν. Βοβός και Γ. Γιαννακόπουλος, Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Θεσσαλονίκη: ΖΗΤΗ, 2008. |
| [3] | Ν. Βοβός και Γ. Γιαννακόπουλος, Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων ηλεκτρικής Ενέργειας, Θεσσαλονίκη: ΖΗΤΗ, 2019. |
| [4] | D. Glover, T. Overbye and M. Sarma, Power System Analysis and Design, SI EDITION. |
| [5] | A. Wood και B. Woolenberg, Power Generation, Operation and Control. |
| [6] | I. Dobson, H. Glavitsch, C.-C. Liu και K. Vu, «Voltage Collapse in Power Systems,» *IEEE Circuits and Devices Magazine,* May 1992. |
| [7] | Κ. Βουρνάς και Γ. Κονταξής, Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ, 2001. |
| [8] | D. Kothari και I. Nagrath, Modern Power Systems Analysis, New York: McGraw-Hill, 2008. |
| [9] | W. Stevenson, Elements of power System Analysis, McGraw-Hill, 1994. |
| [10] | «Α.Δ.Μ.Η.Ε.,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.admie.gr. [Πρόσβαση 10 04 2021]. |
| [11] | R. Zimmerman και C. Murillo-Sanchez, «https://matpower.org,» 08 10 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://matpower.org/docs/MATPOWER-manual-7.1.pdf. [Πρόσβαση 25 04 2021]. |
| [12] | «Δ.Ε.Δ.Δ.Η.Ε.,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.deddie.gr. [Πρόσβαση 10 04 2021]. |
| [13] | «Ρ.Α.Ε.,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.rae.gr. [Πρόσβαση 10 04 2021]. |
| [14] | Π. Γεωργιλάκης, Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, ΚΑΛΛΙΠΟΣ, 2015. |
| [15] | Π. Ντοκόπουλος, Δ. Λαμπρίδης και Γ. Παπαγιάννης, Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, Αθήνα: ΖΗΤΗ, 2006. |
| [16] | B. Weedy και B. Cory, Μεταφορά και Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ν. Καλλιόπουλος, Επιμ., Εκδοτικός Όμιλος Ίων, 2001. |
| [17] | M. Anumaka, «Power Flow Study on Alternating Current(Ac) Power System,» *INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIVE TECHNOLOGY AND RESEARCH,* 07 2014. |
| [18] | N. Lal και S. Mubeen, «A Review on Load Flow Analysis,» *INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIVE RESEARCH & DEVELOPMENT,* 11 2014. |
| [19] | R. Zimmerman, C. Murillo-Sanchez και R. Thomas, «MATPOWER: Steady-State Operations Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education,» *IEEE Transactions on power systems,* 2010. |
| [20] | «Immersive Analytics,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://immersive.erc.monash.edu. [Πρόσβαση 15 06 2021]. |
| [21] | «GitHub,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://github.com/aayushGaur/stac. [Πρόσβαση 01 07 2021]. |
| [22] | Π. Μαλατέστας, Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2015. |

## Κατάλογος Εικόνων

[**Εικόνα 1** Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας [ Κανέλλος, Φ. (2012)] 13](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_16Jul21_Final.docx#_Toc77355838)

[**Εικόνα 2** Γενική μορφή ζυγού (Βοβός & Γιαννακόπουλος 2019) 17](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_16Jul21_Final.docx#_Toc77355839)

[**Εικόνα 3** Παράσταση συστήματος n ζυγών (Βοβός & Γιαννακόπουλος, 2019) 18](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_16Jul21_Final.docx#_Toc77355840)

[**Εικόνα 4** Ισοδύναμο "π" γραμμής μεταφοράς (Βοβός & Γιαννακόπουλος, 2019) 23](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_16Jul21_Final.docx#_Toc77355841)

[**Εικόνα 5** Ισοδύναμο "π" μετασχηματιστή με αγωγιμότητα σκέδασης αναφερόμενη στην πλευρά του ζυγού j (Βοβός & Γιαννακόπουλος, 2019) 24](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_16Jul21_Final.docx#_Toc77355842)

[**Εικόνα 6** Μονογραμμικό διάγραμμα συστήματος τριών ζυγών (Βοβός & Γιαννακόπουλος, 2019 25](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_16Jul21_Final.docx#_Toc77355843)

[**Εικόνα 7** Μοντέλο γραμμής μεταφοράς του MATPOWER (Ray D. Zimmerman,Carlos E. Murillo-Sanchez 2020) 37](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_16Jul21_Final.docx#_Toc77355844)

[**Εικόνα 8** Δεδομένα παραδείγματος τεσσάρων ζυγών του MATPOWER 39](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_16Jul21_Final.docx#_Toc77355845)

[**Εικόνα 9** Μονογραμμικό διάγραμμα παραδείγματος τεσσάρων ζυγών 43](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_16Jul21_Final.docx#_Toc77355846)

[**Εικόνα 10** Script σε περιβάλλον MATLAB για την εμφάνιση της γραφικής Qd-V 48](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_16Jul21_Final.docx#_Toc77355847)

[**Εικόνα 11** Μη ύπαρξη λύσης για Qd=615.35 MVAr από το MATPOWER 49](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_16Jul21_Final.docx#_Toc77355848)

[**Εικόνα 12** Script σε περιβάλλον MATLAB για την εμφάνιση της γραφικής Qd-Plosses και Qd-Qlosses 52](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_16Jul21_Final.docx#_Toc77355849)

[**Εικόνα 13** Δεδομένα παραδείγματος πέντε ζυγών του MATPOWER 55](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_16Jul21_Final.docx#_Toc77355850)

[**Εικόνα 14** Μονογραμμικό διάγραμμα παραδείγματος πέντε ζυγών 56](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_16Jul21_Final.docx#_Toc77355851)

[**Εικόνα 15** Δεδομένα παραδείγματος έξι ζυγών του MATPOWER 59](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_16Jul21_Final.docx#_Toc77355852)

[**Εικόνα 16** Μονογραμμικό διάγραμμα παραδείγματος έξι ζυγών 60](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_16Jul21_Final.docx#_Toc77355853)

[**Εικόνα 17** Το σύστημα case4gs σε περιβάλλον MATLAB/MATPOWER. 64](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_16Jul21_Final.docx#_Toc77355854)

[**Εικόνα 18** Το σύστημα case5 σε περιβάλλον MATLAB/MATPOWER. 65](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_16Jul21_Final.docx#_Toc77355855)

[**Εικόνα 19** Το σύστημα case6ww σε περιβάλλον MATLAB/MATPOWER. 66](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_16Jul21_Final.docx#_Toc77355856)

[**Εικόνα 20** Αρχική της ιστοσελίδας οπτικοποίησης. 67](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_16Jul21_Final.docx#_Toc77355857)

[**Εικόνα 21** Εργαλείο οπτικοποίησης παραδειγμάτων του MATPOWER 67](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_16Jul21_Final.docx#_Toc77355858)

[**Εικόνα 22** Μονογραμμικό διάγραμμα case9 MATPOWER 68](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_16Jul21_Final.docx#_Toc77355859)

[**Εικόνα 23** Δεδομένα ζυγού 5 μέσω του εργαλείου οπτικοποίησης 69](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_16Jul21_Final.docx#_Toc77355860)

## Κατάλογος Πινάκων

[**Πίνακας 1** Ταξινόμηση μεταβλητών. 21](#_Toc77334776)

[**Πίνακας 2** Τύποι ζυγών και μεταβλητές 22](#_Toc77334777)

[**Πίνακας 3** Δεδομένα ζυγών (mpc.bus) Matpower manual 40](#_Toc77334778)

[**Πίνακας 4** Δεδομένα γεννητριών (mpc.gen) Matpower manual 41](#_Toc77334779)

[**Πίνακας 5** Δεδομένα κλάδων (mpc.branch) Matpower manual 42](#_Toc77334780)

[**Πίνακας 6** Σύνοψη συστήματος τεσσάρων ζυγών 44](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_15Jul21.docx#_Toc77334781)

[**Πίνακας 7** Σύνοψη ζυγών συστήματος τεσσάρων ζυγών 45](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_15Jul21.docx#_Toc77334782)

[**Πίνακας 8** Σύνοψη γραμμών συστήματος τεσσάρων ζυγών 45](#_Toc77334783)

[**Πίνακας 9** Μετρήσεις και αποτελέσματα συσχέτισης Qd-V 47](#_Toc77334784)

[**Πίνακας 10** Μετρήσεις αέργου ισχύος-απωλειών γραμμών συστήματος 51](#_Toc77334785)

[**Πίνακας 11** Σύνοψη συστήματος πέντε ζυγών 57](#_Toc77334786)

[**Πίνακας 12** Σύνοψη ζυγών συστήματος πέντε ζυγών 58](#_Toc77334787)

[**Πίνακας 13** Σύνοψη γραμμών συστήματος πέντε ζυγών 58](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_15Jul21.docx#_Toc77334788)

[**Πίνακας 14** Σύνοψη συστήματος έξι ζυγών 61](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_15Jul21.docx#_Toc77334789)

[**Πίνακας 16** Σύνοψη γραμμών συστήματος έξι ζυγών 62](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_15Jul21.docx#_Toc77334790)

[**Πίνακας 15** Σύνοψη ζυγών συστήματος έξι ζυγών. 62](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_15Jul21.docx#_Toc77334791)

## Κατάλογος Γραφικών Απεικονίσεων

[**Figure 1** Συσχέτιση αέργου ισχύος-μέτρου τάσης για τον ζυγό 2 48](file:///C:\Users\konst\Desktop\Giannakoula_Ptyxiaki_15Jul21.docx#_Toc77334837)

[**Figure 2,3** Διαγράμματα συσχέτισης Qd-Qlosses και Qd-Plosses 53](#_Toc77334838)