



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ

---

Διπλωματική Εργασία με τίτλο:

**«Προσομοίωση Δικτύου Μεταφοράς  
Ηλεκτρικής Ενέργειας»  
«Simulation of electrical power transmission  
network»**

**ΣΟΦΙΑ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΔΟΥ**

Επιβλέποντες: **Γ. Σταμούλης**

Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

**N. Ευμορφόπουλος**

Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Βόλος, Φεβρουάριος 2016



# Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Σταμούλη Γεώργιο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ξιφάρá Ιωάννη για την πολύτιμη βοήθειά του και την άψογη συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια της πραγματοποίησης αυτής της εργασίας.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους και την οικογένειά μου για όλη την υποστήριξη και τη βοήθειά τους τόσο στη δημιουργία αυτής της εργασίας όσο και σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Αντικείμενο Διπλωματικής.....	8
<b>1° ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Εισαγωγή στα Συστήματα Ενέργειας.....</b>	<b>10</b>
<b>1.1 Δομή ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας.....</b>	<b>10</b>
1.1.1 Σύστημα Παραγωγής.....	11
1.1.2 Σύστημα Μεταφοράς.....	13
1.1.3 Σύστημα Διανομής.....	15
<b>1.2 Ροή Φορτίου.....</b>	<b>16</b>
<b>1.3 Μοντελοποίηση των Στοιχείων του Σ.Η.Ε.....</b>	<b>17</b>
1.3.1 Μοντελοποίηση Γραμμών Μεταφοράς.....	18
1.3.1.1 Γραμμές μεταφοράς μικρού μήκους.....	19
1.3.1.2 Γραμμές μεταφοράς μεσαίου μήκους.....	20
1.3.1.3 Γραμμές μεταφοράς μεγάλου μήκους.....	23
<b>1.4 Μοντελοποίηση Μετασχηματιστών.....</b>	<b>27</b>
1.4.1 Ιδανικός μετασχηματιστής.....	27
1.4.2 Πραγματικός μετασχηματιστής.....	29
1.4.2.1 Πραγματικός μετασχηματιστής δύο τυλιγμάτων.....	29
1.4.2.2 Πραγματικός μετασχηματιστής τριών τυλιγμάτων.....	35
<b>1.5 Μοντελοποίηση Γεννητριών.....</b>	<b>37</b>
1.5.1 Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας.....	38
1.5.2 Σύγχρονη γεννήτρια έκτυπων πόλων.....	41

<b>2° ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Παρουσίαση Προγράμματος HSpice.....</b>	<b>43</b>
<b>2.1 Εισαγωγή.....</b>	<b>43</b>
<b>2.2 Αρχείο Εισόδου.....</b>	<b>45</b>
2.2.1 Κανόνες γραμμών του αρχείου εισόδου.....	45
2.2.2 Μορφές ανάλυσης.....	50
2.2.3 Υποκυκλώματα.....	53
2.2.4 Εντολές εξόδου.....	53
<b>2.3 Τρέξιμο ενός Αρχείου Εισόδου.....</b>	<b>54</b>
<b>2.4 Αρχεία Εξόδου.....</b>	<b>55</b>
<b>3° ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Προσομοίωση του Ηλεκτρικού Δικτύου της</b>	
<b>Κρήτης.....</b>	<b>58</b>
<b>3.1 Παραδοχές Προσομοίωσης.....</b>	<b>58</b>
<b>3.2 Προσομοίωση – Ανάλυση Ροών Φορτίου.....</b>	<b>59</b>
<b>3.3 Συμπεράσματα.....</b>	<b>62</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>63</b>



## Αντικείμενο Διπλωματικής

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αντικείμενο είναι η ανάλυση ροών φορτίου του δικτύου μεταφοράς της Κρήτης, με το πρόγραμμα προσομοίωσης ηλεκτρικών κυκλωμάτων HSpice. Σκοπός είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων για τη σωστή και ικανοποιητική λειτουργία του συστήματος μεταφοράς, καθώς και προτάσεις βελτιώσεων σε πιθανές περιπτώσεις σφαλμάτων.

Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και περιγράφονται τα ισοδύναμα κυκλώματα των γραμμών μεταφοράς, των μετασχηματιστών και των γεννητριών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας του προγράμματος HSpice.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η προσομοίωση του δικτύου μεταφοράς υψηλής τάσης της Κρήτης και ακολουθούν τα συμπεράσματα αυτής της προσομοίωσης.





# 1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

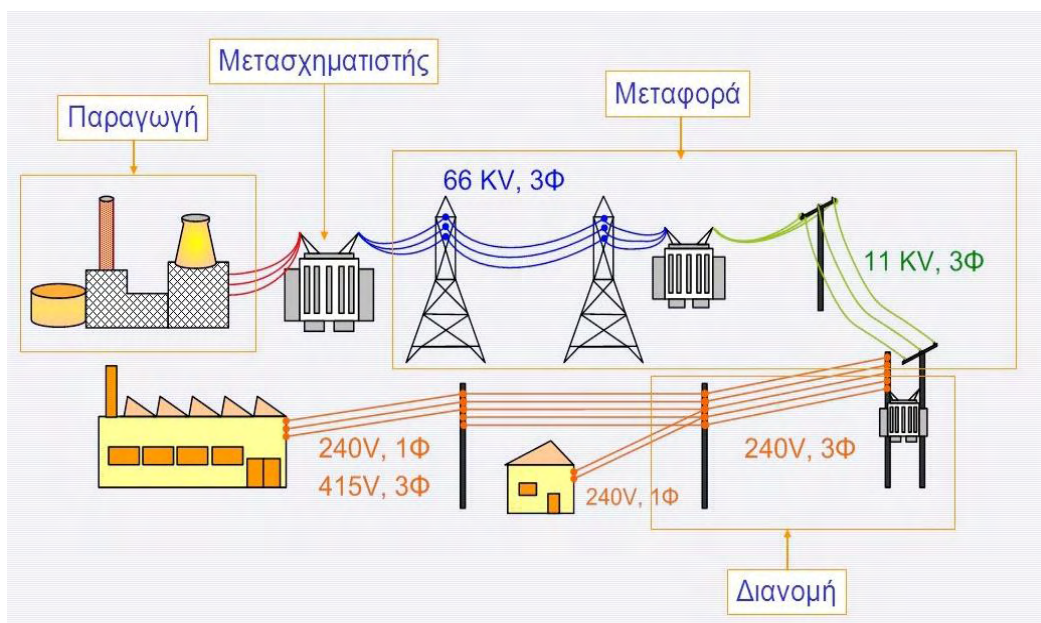
## Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

### 1.1 Δομή ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η ηλεκτρική ενέργεια, αποτελεί την πιο καθαρή και φιλική προς το περιβάλλον μορφή ενέργειας. Η εύκολη μεταβολή των χαρακτηριστικών της (τάση και ένταση), η αποδοτική μεταφοράς της και η μετατροπή της σε άλλες μορφές ενέργειας την έχουν καταστήσει μια ευρέως διαδεδομένη μορφή ενέργειας για την κάλυψη των καταναλωτικών αναγκών σε παγκόσμιο επίπεδο.

Ορίζουμε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε) ως το σύνολο των εγκαταστάσεων παραγωγής, μεταφοράς, διανομής, κατανάλωσης, ελέγχου και ρύθμισης που απαιτούνται για την ασφαλή και ποιοτική εξυπηρέτηση των αναγκών ενός συνόλου καταναλωτών ηλεκτρικής ενέργειας σε τοπικό, εθνικό και σε διεθνές επίπεδο. Δηλαδή, ο σκοπός ενός Σ.Η.Ε. είναι να παρέχει συνεχή, ασφαλή και ποιοτική ηλεκτρική ενέργεια από τα κέντρα παραγωγής στα κέντρα κατανάλωσης.

Προϋπόθεση καλής λειτουργίας είναι να παρέχεται ηλεκτρική ενέργεια όπου υπάρχει ζήτηση, με το ελάχιστο κόστος σε οικονομικό και



Εικόνα 1: Δομή Σ.Η.Ε.

περιβαλλοντικό επίπεδο, και ταυτόχρονα να εξασφαλίζεται σταθερή συχνότητα και τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.

Τα τμήματα των σύγχρονων Σ.Η.Ε. είναι τα ακόλουθα:

1. Σύστημα παραγωγής.
2. Σύστημα μεταφοράς.
3. Σύστημα διανομής.

Η δομή ενός Σ.Η.Ε. δείχνεται στην εικόνα 1.

Τα Σ.Η.Ε. είναι από τη φύση τους πολύπλοκα συστήματα. Παρά τις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν μεταξύ τους λόγω του μεγέθους τους, του είδους των διαθέσιμων φυσικών πηγών ενέργειας και της γεωγραφικής τους κατανομής, έχουν ομοιότητες στη δομή τους λόγω των τριών διακεκριμένων φάσεων, της παραγωγής, της μεταφοράς και της διανομής.

### 1.1.1 Σύστημα Παραγωγής

Το σύστημα παραγωγής ηλεκτρική ενέργειας, περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής, μαζί με τους απαιτούμενους υποσταθμούς για την ανύψωση της τάσης σε κατάλληλη τιμή (για τα ελληνικά δίκτυα 400KV) και την είσοδό της στο σύστημα μεταφοράς.

Το είδος των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε μια χώρα, εξαρτάται από το είδος των φυσικών πηγών ενέργειας που διαθέτει. Η Ελλάδα εκμεταλλεύεται τα πλούσια αποθέματα σε λιγνίτη που διαθέτει το υπέδαφός της και μέχρι σήμερα το 40-50% της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από λιγνιτικές μονάδες. Ένα ποσοστό της τάξης του 17% προέρχεται από μονάδες φυσικού αερίου, 10% από μονάδες πετρελαίου, 10% από υδροηλεκτρικούς σταθμούς, 6% από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και 7% από τις διασυνδέσεις με χώρες του εξωτερικού. Στα νησιωτικά δίκτυα, τα οποία δεν είναι διασυνδεδεμένα με το ηπειρωτικό δίκτυο, λειτουργούν ως αυτόνομα συστήματα και παράγουν την ηλεκτρική ενέργεια κυρίως μέσω πετρελαϊκών μονάδων.

Οι τύποι σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συμβατικών καυσίμων είναι:

1. Θερμοηλεκτρικοί
  - Ατμοηλεκτρικοί
  - Ντηζελοηλεκτρικοί

- Πυρηνικοί
2. Υδροηλεκτρικοί
- Υδατοπτώσεων
  - Υδάτινου ρεύματος
  - Αντλητικοί



Εικόνα 2: Ελληνικό σύστημα παραγωγής ενέργειας

Όμως τα αποθέματα σε συμβατικά καύσιμα, δεν είναι απεριόριστα. Η διαρκής μείωση των αποθεμάτων των φυσικών πόρων, οδήγησε σε εντονότερη, οικονομικότερη και αποδοτικότερη εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών

ενέργειας, όπως της ηλιακής, της αιολικής, της γεωθερμικής και της παλιρροϊκής ενέργειας.

### 1.1.2. Σύστημα Μεταφοράς

Το σύστημα μεταφοράς ενός Σ.Η.Ε. περιλαμβάνει τον απαραίτητο εξοπλισμό για τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορα επίπεδα υψηλής τάσης, μεταξύ κέντρων παραγωγής και των κέντρων κατανάλωσης, καθώς και για τη διασύνδεση με άλλα Σ.Η.Ε. Πιο συγκεκριμένα περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξης των δικτύων αυτών, τους υποσταθμούς για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας, τους υποσταθμούς για τη διασύνδεση των διαφορετικών Σ.Η.Ε. και τους υποσταθμούς από υψηλή σε μέση τάση για τη διασύνδεση με τα δίκτυα διανομής. Υπάρχουν καταναλωτές που τροφοδοτούνται απευθείας από τα δίκτυα υπομεταφοράς (150KV,66KV) μέσω κατάλληλων υποσταθμών.

Λόγοι καλύτερης εξυπηρέτησης, αποδοτικότερης λειτουργίας, καθώς και αυξημένης αξιοπιστίας σε σχέση με τη συνέχεια τροφοδότησης των καταναλωτών, έχουν επιβάλλει στα δίκτυα μεταφοράς τη βροχοειδή διάταξη.

Σε ένα βροχοειδές σύστημα μεταφοράς ο κάθε υποσταθμός συνδέεται με το υπόλοιπο δίκτυο μέσω δύο ή περισσότερων γραμμών μεταφοράς, οπότε σε περίπτωση βλάβης της μίας, τα φορτία των εκάστοτε υποσταθμών συνεχίζουν να τροφοδοτούνται από την παραγωγή μέσω της δεύτερης γραμμής. Αντίθετα, σε ένα ακτινικό σύστημα μεταφοράς, μια ενδεχόμενη βλάβη της γραμμής μεταφοράς έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την αποκοπή των φορτίων των ακόλουθων υποσταθμών από το σύστημα.

Πράγματι σε αντίθεση με την ακτινική, η βροχοειδής διάταξη εξασφαλίζει περισσότερους συνδυασμούς διαδρομών της ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα την καλύτερη διαχείριση και την αποδοτικότερη εξυπηρέτηση φορτίου.

Τα δίκτυα υπομεταφοράς αποτελούν υποσυστήματα των δικτύων μεταφοράς. Σε σχέση με τα δίκτυα μεταφοράς, τα δίκτυα υπομεταφοράς τροφοδοτούνται μέσω υποσταθμών από τους ζυγούς παραγωγής, με επίπεδα τιμών της υψηλής τάσης χαμηλότερα από εκείνα των δικτύων μεταφοράς. Ο ρόλος των συστημάτων υπομεταφοράς είναι ακριβώς ο ίδιος με εκείνο των συστημάτων μεταφοράς με τις διαφορές ότι, μεταφέρουν μικρότερα ποσά ενέργειας, σε μικρότερες αποστάσεις και σε χαμηλότερα επίπεδα τιμών υψηλής τάσης.



Εικόνα 3: Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Το ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς διαθέτει επιπλέον γραμμές των 400kV, καθώς επίσης εναέριες, υπόγειες γραμμές και υποβρύχια καλώδια των 150kV που συνδέουν την Άνδρο και τα νησιά της Δυτικής Ελλάδας, Κέρκυρα, Λευκάδα, Κεφαλονιά και Ζάκυνθο με το διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς, καθώς και μία υποβρύχια διασύνδεση της Κέρκυρας με την Ηγουμενίτσα στα 66kV.

Την 31η Δεκεμβρίου 2013 το διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς αποτελείτο από 11.232χλμ. γραμμών μεταφοράς, όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα. Επίσης, σε 331 Υποσταθμούς και ΚΥΤ του διασυνδεδεμένου συστήματος μεταφοράς ήταν εγκατεστημένοι 732 Μετασχηματιστές και Αυτομετασχηματιστές με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 55.391MVA.

### ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (χλμ. όδευσης)

	400kV	Σ.Ρ. (D.C.) 400kV	150 kV	66 kV	ΣΥΝΟΛΟ
<b>ΕΝΑΕΡΙΕΣ</b>	2.647	107	8.152	39	10.945
<b>ΥΠΟΒΡΥΧΙΕΣ</b>	0,58		140	15	155
<b>ΥΠΟΓΕΙΕΣ</b>	30		101		131
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	2.677	107	8.393	54	11.232

Πίνακας 1: Γραμμές μεταφοράς

### 1.1.3. Σύστημα Διανομής

Με τον όρο «διανομή» της ηλεκτρικής ενέργειας, εννοούμε το σύνολο της υλικοτεχνικής υποδομής (υποσταθμοί, δίκτυα διανομής, διατάξεις διακοπής, ελέγχου και προστασίας) μέσω της οποίας η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στα κέντρα κατανάλωσης μέσης και χαμηλής τάσης. Τα δίκτυα διανομής, παραλαμβάνουν την ηλεκτρική ενέργεια που μεταφέρεται μέσω των δικτύων μεταφοράς από τα κέντρα παραγωγής και τροφοδοτούν τις καταναλώσεις μέσης και χαμηλής τάσης. Δηλαδή, μέσω των δικτύων διανομής, η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται σε όλη την εξυπηρετούμενη περιοχή.

Ανάλογα με το μέγεθος της τάσης τροφοδοσίας τους, τα δίκτυα διανομής διακρίνονται σε δίκτυα διανομής μέσης τάσης (Μ.Τ.) και σε δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης (Χ.Τ.). Για τον ελλαδικό χώρο οι τιμές Μ.Τ. είναι τα 6,6KV και 22KV. Η τροφοδοσία των δικτύων αυτών γίνεται από τα δίκτυα μεταφοράς, μέσω κατάλληλων υποσταθμών Υ.Τ/Μ.Τ.. Τα δίκτυα Μ.Τ. είναι συνήθως βροχοειδή, αλλά λειτουργούν και ακτινικά.

Το είδος των περιοχών κατανάλωσης (αστικές, βιομηχανικές, κ.λ.π.), όπως και η πυκνότητα των φορτίων και της δόμησης, καθορίζουν τον τύπο των δικτύων Μ.Τ., αν είναι δηλαδή υπόγεια ή εναέρια. Έτσι, στο κέντρο μίας πόλης είναι υπόγεια, ενώ στις υπόλοιπες περιοχές είναι εναέρια.

Τα δίκτυα Χ.Τ. (230/400V), αναχωρούν από τους σταθμούς διανομής Μ.Τ./Χ.Τ. και καταλήγουν μέχρι τα φυσικά όρια των καταναλωτών Χ.Τ.. Έχουν ακτινική δομή και στις πυκνοκατοικημένες περιοχές είναι υπόγεια.

Τα δίκτυα διανομής διαφορετικών χωρών, ακόμα και διαφορετικών πόλεων της ίδιας χώρας, εμφανίζουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα δίκτυα διανομής συνδέονται άμεσα με τα ιδιαίτερα στοιχεία

δόμησης, την πυκνότητα φορτίου, τις ιδιομορφίες των πόλεων, καθώς και με το γενικότερο τρόπο χωροταξικής διαμόρφωσης κάθε χώρας.

## 1.2 Ροή Φορτίου

Ο κύριος προορισμός ενός Σ.Η.Ε είναι να προμηθεύει την πραγματική και άεργο ισχύ τις οποίες ζητούν τα διάφορα φορτία που είναι συνδεδεμένα στο σύστημα.

Η μελέτη και η ανάλυση των ροών φορτίου, σχετίζεται με την επίλυση ενός Σ.Η.Ε. σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Η ανάλυση των ροών φορτίου ή των ροών ισχύος, συνίσταται στην ουσία στον υπολογισμό των τάσεων, κατά μέτρο και γωνία, σε όλους του ζυγούς του συστήματος, έχοντας ως δεδομένα τη ζήτηση της ισχύος και την παραγωγή των γεννητριών, λαμβάνοντας υπόψη τους διάφορους λειτουργικούς περιορισμούς, όπως τα όρια φόρτισης των γραμμών και τα όρια παραγωγής ισχύος των γεννητριών.

Έχοντας γνωστές τις τάσεις, καθώς και τα φορτία των ζυγών σε κάποια δεδομένη χρονική στιγμή, μπορούμε να προσδιορίσουμε τις ροές της ενεργής και της άεργης ισχύος σε όλες τις γραμμές μεταφοράς του Σ.Η.Ε. και μέσω αυτών να κάνουμε τις απαραίτητες ενέργειες, σε περίπτωση ύπαρξης φαινομένων υπερφόρτωσης.

Οι μελέτες ροών φορτίου είναι πολύ χρήσιμες για διάφορους λόγους. Συγκεκριμένα είναι απαραίτητες για:

- τον έλεγχο των τάσεων και ροών, ώστε να διατηρούνται εντός προκαθορισμένων ορίων λειτουργίας.
- τη μελέτη των επιπτώσεων ενδεχομένων διαταραχών (π.χ. απώλεια γραμμής, γεννήτριας, κλπ.).
- την επιλογή της πλέον οικονομικής λειτουργίας των γεννητριών του συστήματος. Επειδή κατά τη διάρκεια της ημέρας τα φορτία διαρκώς μεταβάλλονται απαιτείται συχνά ο υπολογισμός εκ νέου της παραγόμενης ισχύος κάθε γεννήτριας, ώστε τα φορτία να τροφοδοτούνται με τον πιο οικονομικό τρόπο.
- μελέτες ανάπτυξης και επέκτασης του συστήματος παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Λόγω της πολυπλοκότητας της δομής αλλά και του μεγέθους των Σ.Η.Ε., η ανάλυση των ροών φορτίου περιορίζεται μόνο στο επίπεδο των δικτύων μεταφοράς.



Ο βασικός στόχος της ροής φορτίου, εκτός από τη διασφάλιση της ποιότητας της ενέργειας στις διάφορες καταναλώσεις, είναι και η οικονομική λειτουργία του συστήματος. Δηλαδή, η εξασφάλιση της βέλτιστης λειτουργίας με το μικρότερο δυνατό κόστος.

Η σωστή λειτουργία ενός Σ.Η.Ε., επιβάλλει τη συνεχή και ομαλή τροφοδότηση όλων των φορτίων με τα οποία σε κάθε χρονική στιγμή είναι διασυνδεδεμένο, καλύπτοντας επιπλέον και τις δικές του απώλειες σε πραγματική και άεργη ισχύ. Επιπλέον παρά τις συνεχείς μεταβολές των φορτίων, το μέγεθος και η συχνότητα της τάσης στους διάφορους ζυγούς, θα πρέπει να κυμαίνονται σε κάποια προκαθορισμένα όρια, με βάση τους εκάστοτε ισχύοντες κανονισμούς. Δηλαδή,

$$V_{i,\min} < V_i < V_{i,\max}, (i=1,\dots,n)$$

Όπου,  $n$  = το πλήθος των ζυγών και

$$f_{\min} < f < f_{\max}$$

Η ανάγκη διατήρησης του μεγέθους και της συχνότητας της τάσης στις αντίστοιχες ονομαστικές τιμές, καθώς και η επίδραση την οποία έχουν οι μεταβολές των μεγεθών αυτών στη ροή της ισχύος, επιβάλλουν τον διαρκή έλεγχο τους μέσω κατάλληλων ρυθμιστικών διατάξεων ελέγχου.

Αντίστοιχα όρια ως προς τη μέγιστη παραγωγή σε πραγματικά και άεργο ισχύ, υπάρχουν σε όλες τις γεννήτριες των σταθμών παραγωγής για τη μη ύπαρξη φαινομένων υπερφόρτισης, τα οποία μπορεί να οδηγήσουν σε μόνιμες βλάβες ή και σε διακοπή της τροφοδότησης του φορτίου. Δηλαδή,

$$P_{Gi,\min} < P_{Gi} < P_{Gi,\max}, (i = 1,\dots,n)$$

και

$$Q_{Gi,\min} < Q_{Gi} < Q_{Gi,\max}, (i = 1,\dots,n)$$

Ανάλογα όρια μέγιστης φόρτισης υπάρχουν και στους μετασχηματιστές, καθώς επίσης και στις γραμμές μεταφοράς για να μην υπερβούν τα όρια απωλειών ισχύος και ευστάθειας.

### 1.3 Μοντελοποίηση των Στοιχείων του Σ.Η.Ε.

Η μοντελοποίηση, κύριο συστατικό της ανθρώπινης δραστηριότητας, συνιστά βασικό μεθοδολογικό εργαλείο στην επιστημονική έρευνα. Τα μοντέλα παρέχουν τη δυνατότητα χειρισμού τους, στοιχείο χρήσιμο ιδιαίτερα όταν η

ενασχόληση με τα πραγματικά αντικείμενα είναι αδύνατη. Η ανάπτυξη διαφόρων μοντέλων ακόμη επιτρέπει τη δυνατότητα υπολογισμών, την ανακάλυψη νέων σχέσεων, την οικοδόμηση νέων γνωστικών σχημάτων, την κατάκτηση νέων βεβαιοτήτων και την ανατροπή κάποιων άλλων.

Ένα μοντέλο δεν αποτελεί ποτέ ένα ακριβές αντίγραφο του πραγματικού φαινομένου ή αντικειμένου, αλλά αναπαριστά κάποια ή κάποιες πτυχές της δομής, των ιδιοτήτων ή της συμπεριφοράς αυτού που μελετάται.

Ένα μοντέλο αποτελείται από μια συλλογή οντοτήτων που έχουν σαφώς προκαθορισμένες ιδιότητες και μπορούν να συσχετιστούν μεταξύ τους με καλώς προσδιορισμένους κανόνες ή σχέσεις.

Σκοπός του μοντέλου είναι να προσομοιώσει με ακρίβεια τις ουσιαστικές πτυχές ενός συγκεκριμένου χώρου της πραγματικότητας, να λάβει αποφάσεις ευκολότερα μέσα από την προσομοίωση διάφορων σεναρίων και να προβλέψει και να ελέγξει μελλοντικά γεγονότα με βάση παρελθοντικές παρατηρήσεις.

### 1.3.1. Μοντελοποίηση Γραμμών Μεταφοράς

Οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν το συνδετικό κρίκο ανάμεσα στους σταθμούς παραγωγής και στους υποσταθμούς και στο δίκτυο διανομής. Μέσω αυτών παραλαμβάνεται η ηλεκτρική ενέργεια από τις μονάδες παραγωγής και δίδεται στα κέντρα κατανάλωσης.

Λόγω της λειτουργίας των γραμμών μεταφοράς σε υψηλή (150KV) και υπερυψηλής (400KV) τάσης που λειτουργούν οι γραμμές μεταφοράς χρειάζονται προστατευτικά μέτρα για την ασφάλεια του ανθρώπου. Γι' αυτό το λόγο οι γραμμές μεταφοράς χωρίζονται σε εναέριες και υπόγειες.

Το μήκος μιας γραμμής μεταφοράς, αποτελεί τον καθοριστικό παράγοντα για τη μοντελοποίησή της. Έτσι, έχουμε τις εξής κατηγορίες:

- Μικρού μήκους, με μήκος  $< 80\text{km}$ .
- Μεσαίου μήκους, με μήκος  $80\text{km} \leq \text{μήκος} < 240\text{km}$ .
- Μεγάλου μήκους, με μήκος  $\geq 240\text{km}$ .

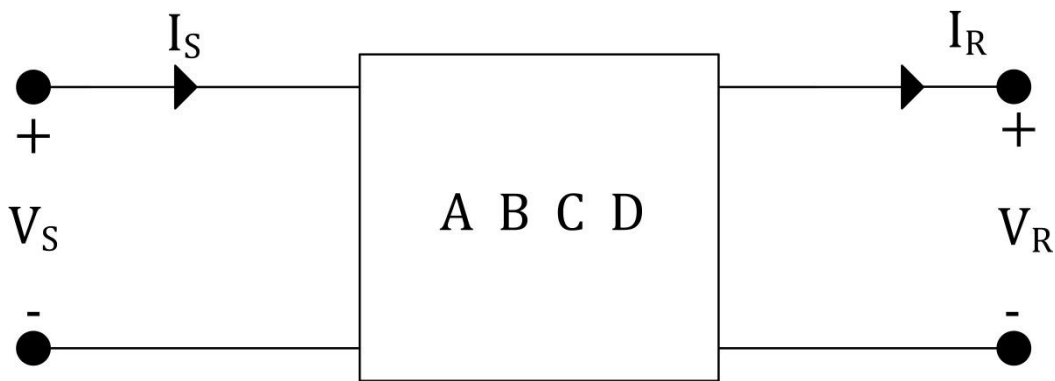
Για τη μοντελοποίηση των γραμμών μεταφοράς χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα κυκλωματικά μοντέλα.

Οι γραμμές μεταφοράς απεικονίζονται ως δίθυρα κυκλώματα, όπως φαίνεται στο σχήμα 1, με δεδομένα τα χαρακτηριστικά της τάσης και του ρεύματος και από την παραγωγή και από την κατανάλωση.

Για την ανάλυση των στοιχείων της γραμμής χρησιμοποιούνται οι νόμοι του Kirchhoff για την τάση και την ένταση (βρόγχων - NTK και κόμβων - NPK, αντίστοιχα). Έτσι, προκύπτει:

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (1.1)$$

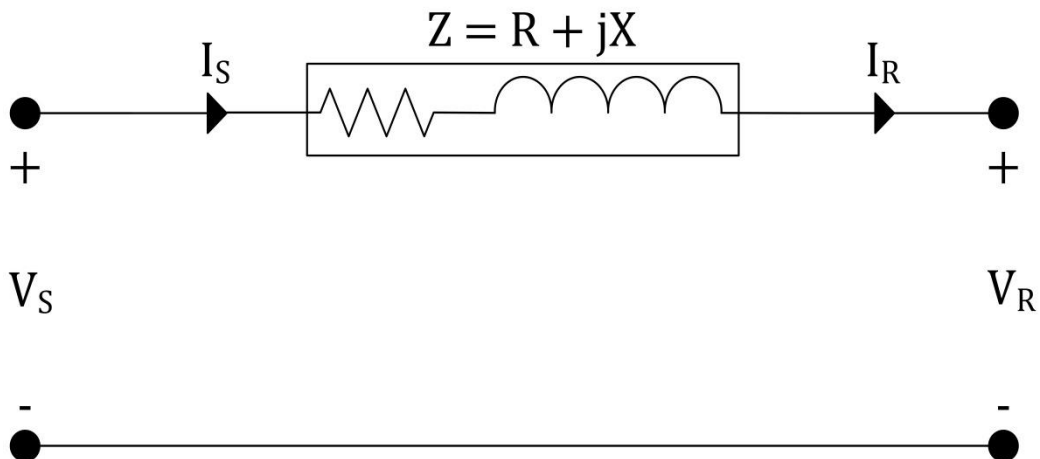
$$I_S = CV_R + DI_R \quad (1.2)$$



Σχήμα 1: Αναπαράσταση της γραμμής μεταφοράς ως δίθυρο κύκλωμα

### 1.3.1.1 Γραμμές μεταφοράς μικρού μήκους

Λόγω του μικρού τους μήκους, στις γραμμές μεταφοράς μικρού μήκους η χωρητική αντίδραση θεωρείται αμελητέα. Έτσι, λαμβάνονται υπόψη μόνο τα σε σειρά στοιχεία, δηλαδή η ωμική αντίσταση και η επαγωγική αντίδραση της γραμμής. Με βάση αυτά, το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα των γραμμών



Σχήμα 2: Π-ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς μεσαίου μήκους

αυτών φαίνεται στο σχήμα 2.

Όπου:

$V_s$  = τάση αναχώρησης στην είσοδο της γραμμής

$I_s$  = ρεύμα αναχώρησης στην είσοδο της γραμμής

$V_R$  = τάση άφιξης στην έξοδο της γραμμής

$I_R$  = ρεύμα άφιξης στην έξοδο της γραμμής

$Z$  = συνολική σύνθετη αντίσταση σειράς

$R$  = ωμική αντίσταση

$X = j\omega L$  = επαγωγική αντίδραση

Από τους NTK και NPK προκύπτει ότι:

$$V_s = V_R + Z I_R = V_R + I_R (R + j\omega L) \quad (1.3)$$

και

$$I_s = I_R \quad (1.4)$$

Εύκολα προκύπτει ότι:

$$A = D = 1$$

$$B = Z \quad (1.5)$$

$$C = 0$$

Οι μιγαδικές ισχύεις ανά φάση στην αναχώρηση και στην άφιξη της γραμμής, αντίστοιχα είναι:

$$S_s = V_s I_s^* = P_s + jQ_s \quad (1.6)$$

και

$$S_R = V_R I_R^* = P_R + jQ_R \quad (1.7)$$

### 1.3.1.2 Γραμμές μεταφοράς μεσαίου μήκους

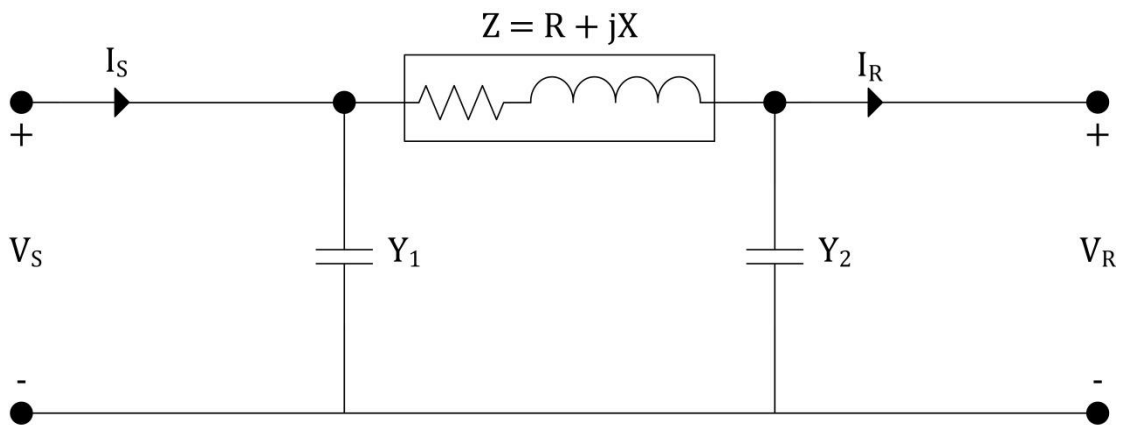
Στις γραμμές μεσαίου μήκους, επειδή το μήκος είναι αυξημένο, η χωρητική αντίδραση συμμετέχει στην αναπαράσταση του μονοφασικού ισοδύναμου κυκλώματος.

Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για αυτά τα μήκη γραμμών είναι:

- το π-ισοδύναμο
- το τ-ισοδύναμο.

## Π-ισοδύναμο

Στο π-ισοδύναμο θεωρείται ότι η χωρητική αντίδραση διαιρείται σε δύο ίσα μέρη καθένα από τα οποία βρίσκεται στα δύο άκρα της γραμμής. Στο σχήμα 3 φαίνεται το π-ισοδύναμο των γραμμών μεσαίου μήκους.



Σχήμα 3: Π-ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς μεσαίου μήκους

Με δεδομένο ότι  $Y_1 = Y_2 = \frac{Y}{2}$ , οι ΝΤΚ και ΝΡΚ προκύπτουν ως εξής:

$$V_S = V_R + Z \left( I_R + \frac{V_R Y}{2} \right) = \left( 1 + \frac{YZ}{2} \right) V_R + Z I_R \quad (1.8)$$

$$I_S = I_R + \frac{V_R Y}{2} + \frac{V_S Y}{2} \quad (1.9)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (1.8) στη (1.9) έχουμε:

$$\begin{aligned} I_S &= I_R + \frac{V_R Y}{2} + \left[ \left( 1 + \frac{YZ}{2} \right) V_R + Z I_R \right] \frac{Y}{2} = \\ &= Y \left( 1 + \frac{YZ}{4} \right) V_R + \left( 1 + \frac{YZ}{2} \right) I_R \end{aligned} \quad (1.10)$$

Συμπεραίνουμε ότι:

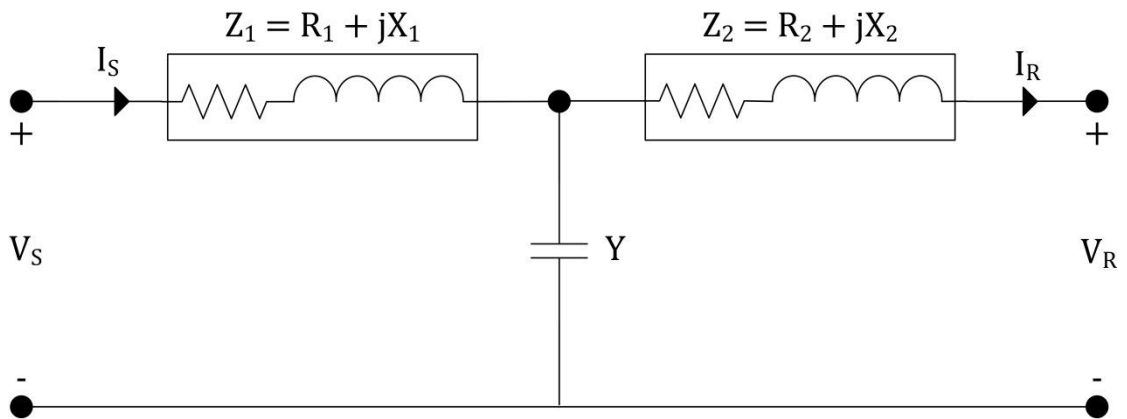
$$A = D = 1 + \frac{YZ}{2}$$

$$B = Z \quad (1.11)$$

$$C = Y \left(1 + \frac{YZ}{4}\right)$$

### Τ-ισοδύναμο

Στο τ-ισοδύναμο θεωρείται ότι η αντίδραση της γραμμής ισοκατανέμεται στα δύο άκρα της, ενώ η χωρητική αντίδραση είναι συγκεντρωμένη στο μέσο της γραμμής. Στο σχήμα 4 φαίνεται το τ-ισοδύναμο των γραμμών μεσαίου μήκους.



Σχήμα 4: Τ-ισοδύναμο γραμμής μεταφοράς μεσαίου μήκους

Έχοντας δεδομένο ότι  $Z_1 = Z_2 = \frac{Z}{2}$ , οι ΝΤΚ και ΝΡΚ προκύπτουν ως εξής:

$$V_S = \frac{Z}{2} I_S + \frac{Z}{2} I_R + V_R \quad (1.12)$$

$$I_S = I_R + Y \left( V_R + \frac{Z}{2} I_R \right) = Y V_R + \left( 1 + \frac{YZ}{2} \right) I_R \quad (1.13)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (1.13) στη (1.12) έχουμε:

$$\begin{aligned} V_S &= \frac{Z}{2} \left[ Y V_R + \left( 1 + \frac{YZ}{2} \right) I_R \right] + \frac{Z}{2} I_R + V_R = \\ &= \left( 1 + \frac{YZ}{2} \right) V_R + \left( 1 + \frac{YZ}{4} \right) Z I_R \end{aligned} \quad (1.14)$$

### 1.3.1.3 Γραμμές μεταφοράς μεγάλου μήκους

Στις γραμμές μεταφοράς μεγάλου μήκους, απαιτείται η θεώρηση των παραμέτρων τους ως ομοιόμορφα κατανεμημένες σε όλο το μήκος τους και όχι πλέον ως συγκεντρωμένες παράμετροι, δηλαδή κάθε τμήμα της γραμμής παρουσιάζει αντίσταση, επαγωγική και χωρητική αντίδραση.

Με δεδομένο μήκος της γραμμής  $l$ , και υποθέτοντας ότι η αντίδραση ανά μονάδα μήκους της γραμμής είναι  $z$  ( $\Omega/\text{km}$ ) και η εγκάρσια αγωγιμότητα  $y$  ( $\text{S}/\text{km}$ ), έχουμε ότι:

$$Z = z \times l \quad \text{και} \quad Y = y \times l \quad (1.15)$$

Έστω ένα τυχαίο τμήμα της γραμμής, όπως φαίνεται στο σχήμα 5, με στοιχειώδες μήκος  $\Delta x$ , που απέχει απόσταση  $x$  από το τέλος της γραμμής, παρουσιάζει αντίδραση  $z\Delta x$  σε σειρά με εγκάρσια αγωγιμότητα  $y\Delta x$ , ισχύει ότι:

$$\Delta V = Iz\Delta x \Rightarrow \frac{\Delta V}{\Delta x} = Iz \quad (1.16)$$

Για  $\Delta x \rightarrow 0$ , η (1.16) γίνεται:

$$\frac{dV}{dx} = Iz \quad (1.17)$$

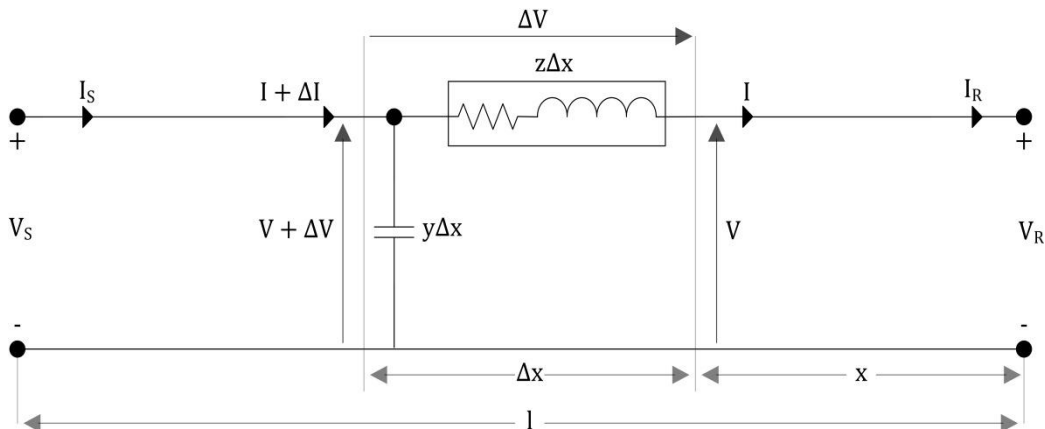
Για το ρεύμα  $\Delta I$  προκύπτει:

$$\Delta I = (V + \Delta V)y\Delta x = Vy\Delta x + \Delta Vy\Delta x \quad (1.18)$$

Με το γινόμενο  $\Delta Vy\Delta x$  να θεωρείται αμελητέο και  $\Delta x \rightarrow 0$ , από την (1.18) προκύπτει:

$$\frac{dI}{dx} = Vy \quad (1.19)$$

Παραγωγίζοντας τη σχέση (1.17) ως προς  $x$ , έχουμε:



Σχήμα 5: Αναπαράσταση γραμμής μεταφοράς μήκους  $\Delta x$

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{dV}{dx} \right) = z \left( \frac{dI}{dx} \right) \quad (1.20)$$

Από τις σχέσεις (1.19) και (1.20) προκύπτει:

$$\frac{d^2V}{dx^2} - yzV = 0 \quad (1.21)$$

Η σχέση (1.21) είναι μία διαφορική εξίσωση, με γενική λύση της μορφής:

$$V = A_1 e^{x\sqrt{yz}} + A_2 e^{-x\sqrt{yz}} \quad (1.22)$$

Αν παραγωγίσουμε τη σχέση (1.22) ως προς x, θα έχουμε:

$$\frac{dV}{dx} = A_1 \sqrt{yz} e^{x\sqrt{yz}} + A_2 \sqrt{yz} e^{-x\sqrt{yz}} \quad (1.23)$$

Από τη σχέση (1.17) και την παραπάνω, έχουμε:

$$I = \frac{1}{z} \left( \frac{dV}{dx} \right) = \frac{A_1}{\sqrt{\frac{z}{y}}} e^{x\sqrt{yz}} - \frac{A_2}{\sqrt{\frac{z}{y}}} e^{x\sqrt{yz}} \quad (1.24)$$

Ισχύει ότι:

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}}, \text{ η χαρακτηριστική αντίδραση της γραμμής}$$

και

$$\gamma = \sqrt{yz}, \text{ η σταθερά μετάδοσης.}$$

Έτσι, οι σχέσεις (1.22) και (1.24) μπορούν να πάρουν την παρακάτω μορφή:

$$V = A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x} \quad (1.25)$$

και

$$I = \frac{A_1}{Z_c} e^{\gamma x} - \frac{A_2}{Z_c} e^{-\gamma x} \quad (1.26)$$

Για  $x = 0$ ,  $V = V_R$  και  $I = I_R$ , έχουμε:

$$V_R = A_1 + A_2 \quad (1.27)$$

και

$$I_R = \frac{A_1}{Z_c} - \frac{A_2}{Z_c} \quad (1.28)$$

Οι τιμές των  $A_1$  και  $A_2$  είναι αντίστοιχα,

$$A_1 = \frac{V_R + Z_c I_R}{2} \text{ και } A_2 = \frac{V_R - Z_c I_R}{2} \quad (1.29)$$



Με αντικατάσταση,  $x = l$ ,  $V = V_S$  και  $I = I_S$  στα  $A_1$  και  $A_2$  και βάζοντας αυτές τις τιμές στις σχέσεις (1.25) και (1.26), έχουμε:

$$V_s = \frac{V_R + Z_C I_R}{2} e^{\gamma l} + \frac{V_R - Z_C I_R}{2} e^{-\gamma l} \quad (1.30)$$

$$I_s = \frac{V_R + I_R}{2} e^{\gamma l} - \frac{V_R - I_R}{2} e^{-\gamma l} \quad (1.31)$$

Τέλος, προκύπτουν οι σχέσεις:

$$V_S = V_R \cosh \gamma l + Z_C I_R \sinh(\gamma l) \quad (1.32)$$

$$I_S = V_R \frac{\sinh \gamma l}{Z_C} + I_R \cosh(\gamma l) \quad (1.33)$$

αφού έχουμε λάβει υπόψη ότι γενικά ισχύει:

$$\sinh(\gamma l) = \frac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{2} \quad \text{και} \quad \cosh(\gamma l) = \frac{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}{2} \quad (1.34)$$

Άρα, για το δεδομένο  $l$  έχουμε ότι:

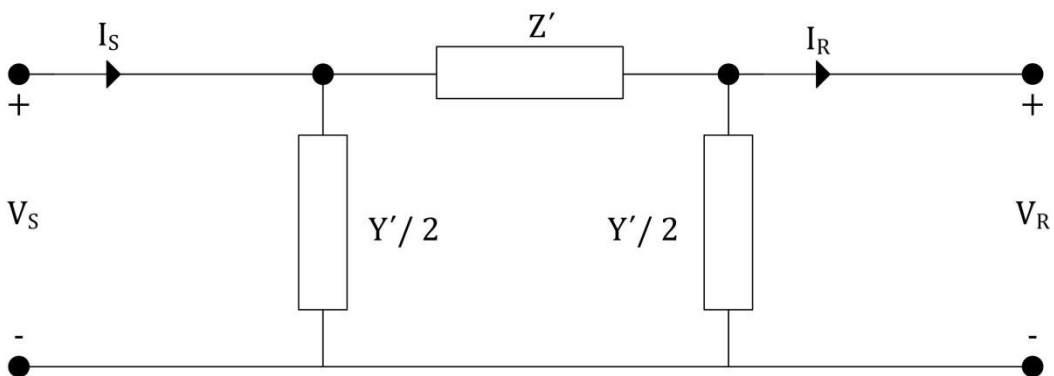
$$A = D = \cosh(\gamma l)$$

$$B = Z_C \sinh(\gamma l) \quad (1.35)$$

$$C = \frac{\sinh \gamma l}{Z_C}$$

## Π-ισοδύναμο

Το  $\pi$ -ισοδύναμο των γραμμών μεταφοράς μεγάλου μήκους είναι πανομοιότυπο με το  $\pi$ -ισοδύναμο των γραμμών μεταφοράς μεσαίου μήκους, με μόνη διαφορά ότι υπάρχουν οι μεταβλητές  $Z'$  και  $Y'$  αντί των  $Z$  και  $Y$ , όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.



Σχήμα 6: Π-ισοδύναμο γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους

Αντιστοιχίζοντας με τις εξισώσεις (1.11), έχουμε:

$$\begin{aligned} A = D &= 1 + \frac{Y'Z'}{2} \\ B &= Z' \end{aligned} \quad (1.36)$$

$$C = Y' \left( 1 + \frac{Y'Z'}{4} \right)$$

$$Z' = Z_C \sinh(\gamma l) = Z F_1 = Z \frac{\sinh(\gamma l)}{\gamma l} \quad (1.37)$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{\tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right)}{Z_C} = \frac{Y}{2} F_2 = \frac{Y}{2} \frac{\tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right)}{\frac{\gamma l}{2}} \quad (1.38)$$

Αντικαθιστώντας τη  $Z_C$  στη σχέση (1.37) έχουμε:

$$Z' = Z_C \sinh(\gamma l) = \sqrt{\frac{Z}{y}} \sinh(\gamma l) \quad (1.39)$$

Για  $Z = zl$  η σχέση (1.39) γίνεται:

$$Z' = zl \left[ \sqrt{\frac{Z}{y}} \frac{\sinh(\gamma l)}{zl} \right] = zl \left[ \frac{\sinh(\gamma l)}{\sqrt{Zyl}} \right] = Z F_1 \quad (1.40)$$

$$\text{με } F_1 = \frac{\sinh(\gamma l)}{zl} \text{ per unit} \quad (1.41)$$

Από τις σχέσεις (1.35) και (1.36) έχουμε επίσης:

$$1 + \frac{Y'Z'}{2} = \cosh(\gamma l) \Rightarrow \frac{Y'}{2} = \frac{\cosh(\gamma l) - 1}{Z'} \quad (1.42)$$

Η σχέση (1.42) χρησιμοποιώντας τη σχέση (1.39) και την ταυτότητα  $\tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right) = \frac{\cosh(\gamma l) - 1}{\sinh(\gamma l)}$ , γίνεται:

$$\frac{Y'}{2} = \frac{\cosh(\gamma l) - 1}{Z_C \sinh(\gamma l)} = \frac{\tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right)}{Z_C} = \frac{\tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right)}{\frac{\sqrt{Z}}{\sqrt{y}}} \quad (1.43)$$

και για  $Z = zl$ , έχουμε:

$$\frac{Y'}{2} = \frac{yl}{2} \left[ \frac{\tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right)}{\frac{\sqrt{Zyl}}{\sqrt{y^2}}} \right] = \frac{yl}{2} \frac{\tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right)}{\sqrt{Zyl}} = \frac{Y}{2} F_2 \quad (1.44)$$

$$\text{με } F_2 = \frac{\tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right)}{\frac{\gamma l}{2}} \text{ per unit} \quad (1.45)$$

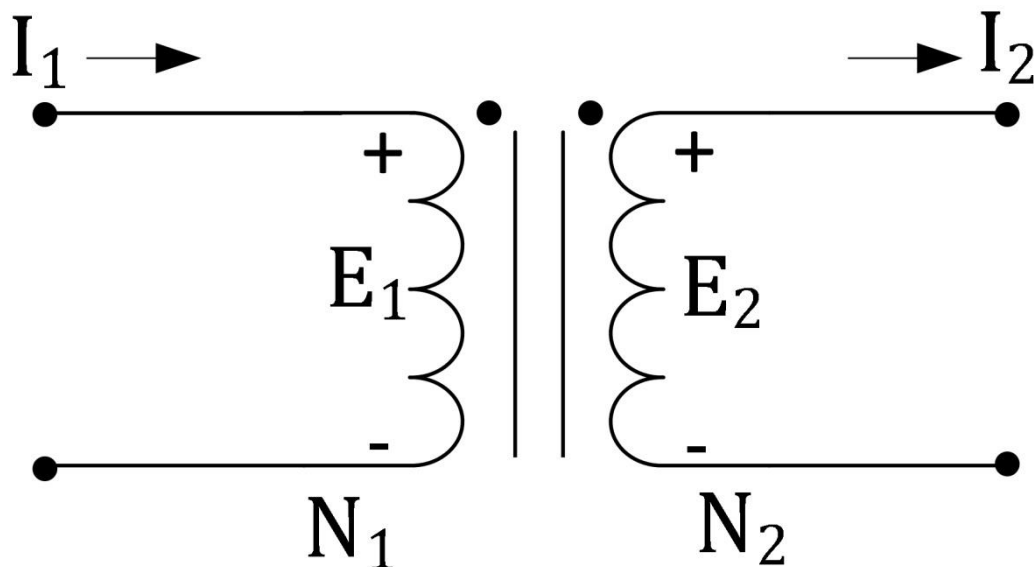
Βρίσκουμε τους συντελεστές διόρθωσης λύνοντας το σύστημα των εξισώσεων (1.41) και (1.45).

## 1.4 Μοντελοποίηση Μετασχηματιστών

Οι μετασχηματιστές ισχύος ενός Σ.Η.Ε. είναι το σημαντικότερο στοιχείο ενός υποσταθμού αλλά και γενικά ολόκληρου του Σ.Η.Ε, καθώς ευθύνονται για την ομαλή και οικονομικότερη λειτουργία του συστήματος μεταφοράς ενέργειας. Είναι αυτοί που ρυθμίζουν την τάση στα επίπεδα που ευνοούν τη λειτουργία του συστήματος σε κάθε ένα από τα επίπεδα παραγωγής, μεταφοράς, διανομής και κατανάλωσης.

### 1.4.1 Ιδανικός μετασχηματιστής

Ο ιδανικός μετασχηματιστής δεν υπάρχει στην πραγματικότητα. Μας βοηθάει όμως, στην κατανόηση των βασικών λειτουργιών των μετασχηματιστών, με σκοπό να προκύψουν με ευκολία τα ισοδύναμα κυκλώματα των πραγματικών μετασχηματιστών. Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός ιδανικού μετασχηματιστή φαίνεται στο σχήμα 7 παρακάτω.



Σχήμα 7: Ισοδύναμο κύκλωμα ιδανικού μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων

Τα βασικά χαρακτηριστικά του ιδανικού μετασχηματιστή είναι:

- οι ωμικές αντιστάσεις των τυλιγμάτων (πρωτεύοντος και δευτερεύοντος) αμελούνται, άρα δεν υπάρχουν απώλειες.
- οι μαγνητικές ροές από σκέδαση, τόσο στο πρωτεύον όσο και στο δευτερεύον αμελούνται.
- η μαγνητική διαπερατότητα  $\mu_c$  του σιδηρομαγνητικού κυκλώματος θεωρείται άπειρη, με αποτέλεσμα το ρεύμα μαγνήτισης που απαιτείται για την εγκατάσταση της μαγνητικής ροής στον πυρήνα να είναι μηδενικό.
- οι απώλειες του πυρήνα θεωρούνται αμελητέες.

Μερικές βασικές έννοιες και εξισώσεις του ιδανικού ενισχυτή, δίνονται παρακάτω.

Από το νόμο του Faraday, ισχύει ότι:

$$E_1 = N_1(j\omega)\Phi_c \quad (1.46)$$

$$E_2 = N_2(j\omega)\Phi_c \quad (1.47)$$

Αν διαιρέσουμε τις παραπάνω σχέσεις κατά μέλη, προκύπτει:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow \frac{E_1}{N_1} = \frac{E_2}{N_2} \quad (1.48)$$

Επίσης, ο λόγος μετασχηματισμού ενός μετασχηματιστή ορίζεται ως ο λόγος των σπειρών των τυλιγμάτων του. Δηλαδή,

$$\alpha = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.49)$$

Επιπλέον, για κάθε μετασχηματιστή ισχύει ότι:

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = R_c \Phi_c \quad (1.50)$$

Η εξίσωση (1.50) προκύπτει αν εφαρμόσουμε τον νόμο του Ampere για τα ηλεκτρομαγνητικά κυκλώματα, με  $N_1 I_1 - N_2 I_2$  να είναι η ηλεκτρεγερτική δύναμη του κυκλώματος και  $R_c = \frac{l_c}{\mu_c A_c}$ , η αντίσταση του πυρήνα.

Όμως, στον ιδανικό μετασχηματιστή η μαγνητική ροή  $\mu_c$  είναι άπειρη, για την αντίσταση στον πυρήνα ισχύει  $R_c=0$ . Άρα, η σχέση (1.50) γίνεται:

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = 0 \quad (1.51)$$

Από τις σχέσεις (1.48) και (1.49) προκύπτει:

$$E_1 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right) E_2 = \alpha E_2 \quad (1.52)$$

$$I_1 = \left(\frac{N_2}{N_1}\right) I_2 = \frac{I_2}{a} \quad (1.53)$$

Τέλος, λόγω της μη ύπαρξης απωλειών ισχύος, η ισχύς εισόδου ισούται με την ισχύ εξόδου. Δηλαδή,

$$S_1 = E_1 I_1^* = (a_t E_2) \left(\frac{I_2}{a_t}\right)^* = E_2 I_2^* = S_2 \quad (1.54)$$

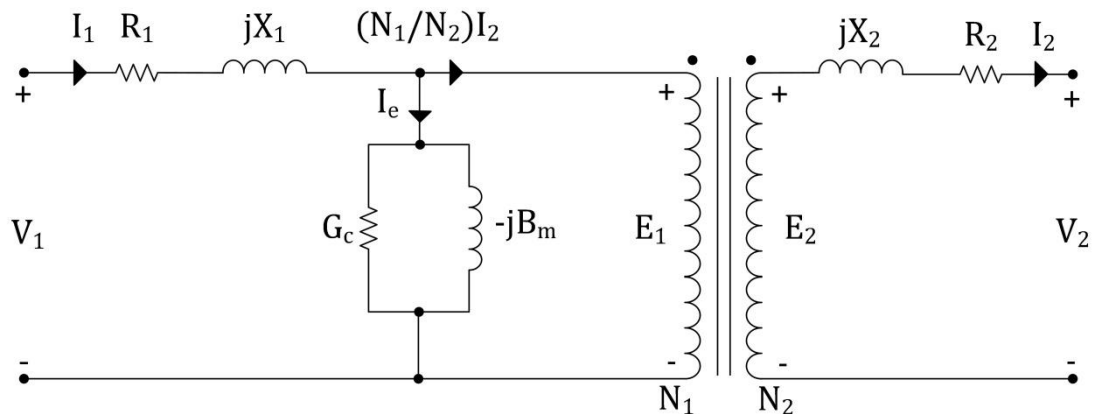
## 1.4.2 Πραγματικός μετασχηματιστής

Ο ιδανικός μετασχηματιστής που παρουσιάστηκε είναι ένα απλουστευμένο μοντέλο του πραγματικού μετασχηματιστή, με κάποιες ιδιαιτερότητες. Συνεπώς, κατά την ανάλυση του πραγματικού μετασχηματιστή θα πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι:

- τα τυλίγματα του μετασχηματιστή έχουν αντίσταση.
- η διαπερατότητα  $\mu_c$  του πυρήνα δεν είναι άπειρη.
- η μαγνητική ροή δεν είναι περιορισμένη στον πυρήνα.
- υπάρχει απώλεια ισχύος στον πυρήνα.

### 1.4.2.1 Πραγματικός μετασχηματιστής δύο τυλιγμάτων

Με βάση τα παραπάνω, στο σχήμα 8 παριστάνεται το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα ενός πραγματικού μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων.



Σχήμα 8: Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων

Οι ωμικές αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$ , αντιπροσωπεύουν τις ωμικές αντιστάσεις στο πρωτεύον και στο δευτερεύον τύλιγμα αντίστοιχα. Στην πραγματικότητα, οι αντιστάσεις αυτές είναι διανεμημένες σε όλο το μήκος των τυλιγμάτων, αλλά στη μοντελοποίηση θα αναπαρασταθούν ως συγκεντρωμένες αντιστάσεις.

Επίσης, η αντίδραση  $X_1$ , ονομάζεται αντίδραση διαρροής του πρωτεύοντος και χρησιμεύει στον υπολογισμό της ροής διαρροής του πρωτεύοντος.

Αν διαιρέσουμε την εξίσωση (1.51) με  $N_1$ , προκύπτει:

$$I_1 - \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{R_c}{N_1} \Phi_c \quad (1.55)$$

Αν αντικαταστήσουμε τη  $\Phi_c$  από τη σχέση (1.46) στη σχέση (1.55), έχουμε:

$$I_1 - \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{R_c}{N_1} \frac{E_1}{j\omega N_1} = -j \frac{R_c}{\omega N_1^2} E_1 \quad (1.56)$$

Ορίζουμε το δεξί μέλος της ισότητας ως ρεύμα μαγνήτισης του πυρήνα και συμβολίζεται με  $I_m$ . Όπως φαίνεται το ρεύμα μαγνήτισης έπεται της  $E_1$  κατά  $90^\circ$ . Ισχύει ότι :

$$B_m = \frac{R_c}{\omega N_1^2} \quad (1.57)$$

Επίσης, παράλληλα από το πηνίο με αγωγιμότητα  $B_m$ , υπάρχει ένας ακόμα κλάδος, που αναπαριστάται με μία ωμική αντίσταση  $G_c$ , που τη διαρρέει ρεύμα  $I_c$ , το οποίο ονομάζεται ρεύμα διαρροής του πυρήνα. Το  $I_c$  βρίσκεται σε φάση με την  $E_1$ , επειδή η αντίσταση  $G_c$  είναι καθαρό ωμικό φορτίο.

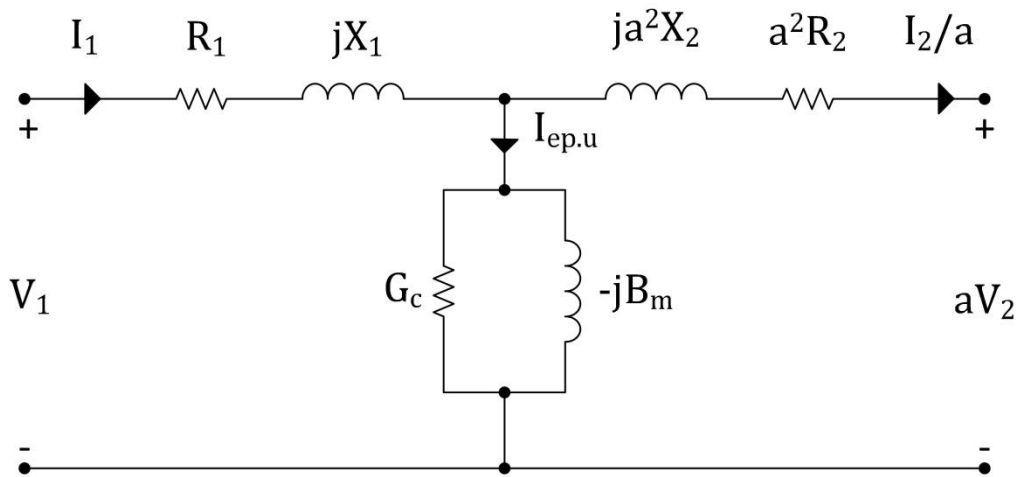
Έτσι, η σχέση (1.56) γίνεται:

$$I_1 - \frac{N_2}{N_1} I_2 = I_c + I_m = (G_c - jB_m) E_1 \quad (1.58)$$

Για την ευκολότερη ανάλυση του πραγματικού μετασχηματιστή, είναι δυνατή η αναγωγή των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος (ωμικές αντιστάσεις και επαγωγικές αντιδράσεις), είτε προς την πλευρά του πρωτεύοντος είτε προς τη μεριά του δευτερεύοντος, το οποίο επιτυγχάνεται με τη μετακίνηση του ιδανικού μετασχηματιστή προς τα δεξιά ή αριστερά και έπειτα την παράλειψή του.

### **Αναγωγή στο πρωτεύον τύλιγμα**

Στο σχήμα 9 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα του μονοφασικού μετασχηματιστή ανοιγμένο στο πρωτεύον.



Σχήμα 9: Ισοδύναμο κύκλωμα μονοφασικού μετασχηματιστή ανοιγμένο στο πρωτεύον

Τα αντίστοιχα μεγέθη του δευτερεύοντος ανοιγμένα στο πρωτεύον έχουν τις τιμές:

$$E_2' = \alpha E_2 \quad (1.59)$$

$$V_2' = \alpha V_2 \quad (1.60)$$

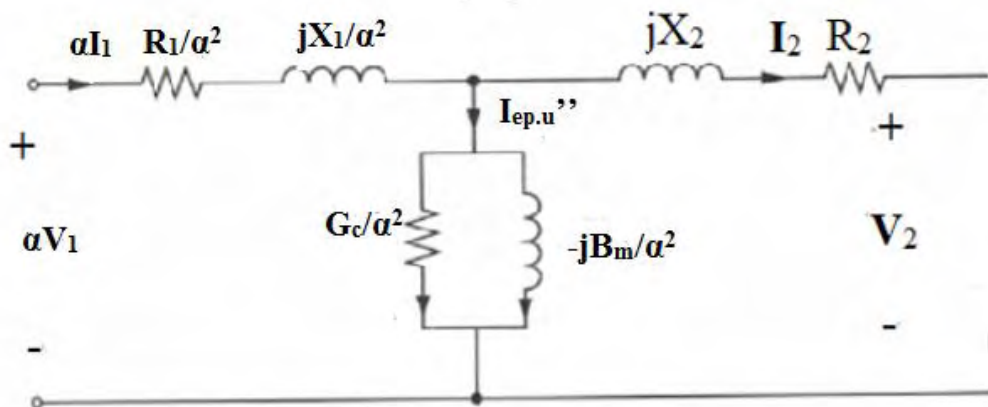
$$I_2' = \frac{I_2}{\alpha} \quad (1.61)$$

$$R_2' = \alpha^2 R_2 \quad (1.62)$$

$$X_2' = \alpha^2 X_2 \quad (1.63)$$

### Αναγωγή στο δευτερεύον

Στο σχήμα 10 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα του μονοφασικού μετασχηματιστή ανοιγμένο στο δευτερεύον.



Σχήμα 10: Ισοδύναμο κύκλωμα μονοφασικού μετασχηματιστή ανοιγμένο στο δευτερεύον

Τα αντίστοιχα μεγέθη του πρωτεύοντος ανοιγμένα στο δευτερεύον έχουν τις τιμές:

$$E_1'' = \frac{E_1}{a} \quad (1.64)$$

$$V_1'' = \frac{V_1}{a} \quad (1.65)$$

$$I_1'' = aI_1 \quad (1.66)$$

$$R_1'' = \frac{R_1}{a^2} \quad (1.67)$$

$$X_1'' = \frac{X_1}{a^2} \quad (1.68)$$

$$G_c'' = \frac{G_c}{a^2} \quad (1.69)$$

$$B_m'' = \frac{B_m}{a^2} \quad (1.70)$$

### **Σύστημα per unit**

Το ανά μονάδα σύστημα (per unit) αποτελεί μία μεθοδολογία κανονικοποίησης, η οποία θέτει τη μαθηματική βάση για την απλουστευμένη παράσταση και ανάλυση των ηλεκτρικών δικτύων.

Η ανά μονάδα τιμή οποιουδήποτε φυσικού μεγέθους (τάση, ρεύμα, ισχύς κ.λ.π.), ορίζεται από το λόγο της απόλυτης (πραγματικής) τιμής του μεγέθους αυτού προς την τιμή της βάσης του μεγέθους. Δηλαδή,

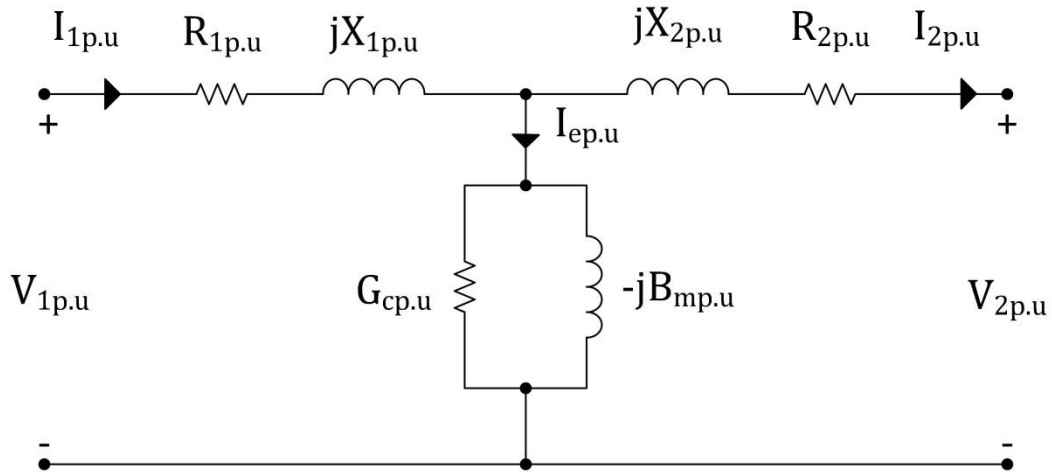
$$\text{Ανά μονάδα τιμή} = \frac{\text{Απόλυτη τιμή}}{\text{Βασική τιμή}} \quad (1.71)$$

Η ανά μονάδα τιμή ενός φυσικού μεγέθους είναι αδιάστατο μέγεθος και εκφράζεται είτε σε δεκαδική μορφή είτε σε εκατοστιαία μορφή. Η απόλυτη τιμή του φυσικού μεγέθους, μπορεί να είναι πραγματικός ή μιγαδικός αριθμός, ενώ η βασική τιμή είναι πάντα πραγματικός αριθμός σε απόλυτη τιμή.

Κατά την ανάλυση ενός ηλεκτρικού δικτύου, όλες οι παράμετροί του, τάσεις, ρεύματα, ισχείς και σύνθετες αντιστάσεις, πρέπει να μετατραπούν σε ανά μονάδα, με κατάλληλη επιλογή των αντίστοιχων βασικών τιμών. Στη συνέχεια, το ηλεκτρικό δίκτυο επιλύεται με βάση τις κλασικές μεθόδους και στη συνέχεια αν είναι επιθυμητό χρησιμοποιώντας τη σχέση (1.71), δίνεται η δυνατότητα μετατροπής των μεγεθών σε απόλυτες τιμές.

Το ανά μονάδα ισοδύναμο κύκλωμα του μονοφασικού μετασχηματιστή φαίνεται στο σχήμα 11. Προκύπτει μετά από διάφορες πράξεις ότι το ανά μονάδα ισοδύναμο κύκλωμα του μονοφασικού μετασχηματιστή είναι το ίδιο, ανεξάρτητα από το εάν το ισοδύναμο κύκλωμα του πραγματικού μετασχηματιστή είναι ανοιγμένο στο πρωτεύον ή στο δευτερεύον τύλιγμα.





Σχήμα 11: Ισοδύναμο κύκλωμα μονοφασικού μετασχηματιστή στο ανά μονάδα σύστημα

Οι ανά μονάδα σύνθετες αντιστάσεις ενός μονοφασικού μετασχηματιστή είναι ίδιες, ανεξάρτητα από το εάν αναφέρονται στο πρωτεύον ή στο δευτερεύον τυλίγμα, μόνο αν η επιλογή των βασικών τάσεων των τυλιγμάτων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος γίνεται σύμφωνα με τη σχέση

$$\frac{V_{1b}}{V_{2b}} = \alpha = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.72)$$

Η βασική ισχύς, είναι η ίδια και στα δύο τυλίγματα.

$$S_{1b} = S_{2b} = S_b \quad (1.73)$$

Για τις βασικές αντιστάσεις των τυλιγμάτων στο πρωτεύον και στο δευτερεύον τυλίγμα, ισχύουν αντίστοιχα οι σχέσεις:

$$Z_{1b} = \frac{V_{1b}}{I_{1b}} = \frac{V_{1b}^2}{S_b} \quad (1.74)$$

και

$$Z_{2b} = \frac{V_{2b}}{I_{2b}} = \frac{V_{2b}^2}{S_b} \quad (1.75)$$

Επίσης, ισχύει ότι:

$$E_{1,pu} = E_{2,pu} \quad (1.76)$$

και

$$I_{1,pu} = I_{2,pu} \quad (1.77)$$

Οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να αποδειχτούν ως εξής:

$$E_{1,pu} = \frac{E_1}{V_{1b}} = \frac{N_1}{N_2} \times \frac{E_2}{V_{1b}} = \frac{N_1}{N_2} \times \frac{E_2}{(N_1/N_2)V_{2b}} = \frac{E_2}{V_{2b}} = E_{2,pu}$$

Ομοίως, αποδεικνύεται και η σχέση (1.77).

Σύμφωνα με αυτές τις σχέσεις μπορούμε να μετασχηματίσουμε όλες τις παραμέτρους του κυκλώματος στο σύστημα ανά μονάδα.

## Τριφασικοί

Μέχρι στιγμής είδαμε τα ισοδύναμα κυκλώματα μονοφασικών μετασχηματιστών. Οι τριφασικοί μετασχηματιστές προκύπτουν από τριφασικές συστοιχίες μονοφασικών μετασχηματιστών.

Τα τρία τυλίγματα σε κάθε πλευρά ενός τριφασικού μετασχηματιστή, μπορούν να συνδεθούν είτε σε αστέρα (Y) είτε σε τρίγωνο (Δ). Επομένως, ένα τριφασικός μετασχηματιστής έξι τυλιγμάτων, μπορεί να συνδεθεί με τέσσερις διαφορετικούς τρόπους:

- Συνδεσμολογία αστέρα-αστέρα (Y/y)
- Συνδεσμολογία τριγώνου-τριγώνου (D/d)
- Συνδεσμολογία αστέρα-τριγώνου (Y/d)
- Συνδεσμολογία τριγώνου-αστέρα (D/y)

Στην περίπτωση που τα δευτερεύοντα τυλίγματα κάθε φάσης αποτελούνται από δύο ξεχωριστά όμοια τυλίγματα, έχουμε δύο ακόμα συνδεσμολογίες:

- Συνδεσμολογία αστέρα-τεθλασμένου αστέρα (Y/z)
- Συνδεσμολογία τριγώνου-τεθλασμένου αστέρα (D/z)

Επίσης, ανάλογα με τη φάση χρόνου των τάσεων, μεταξύ των τυλιγμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος της ίδιας φάσης, χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες, όπως φαίνεται στον πίνακα 2.

Η αναγωγή των παραμέτρων των κυκλωμάτων των τριφασικών μετασχηματιστών στο ανά μονάδα σύστημα όπως προηγουμένως.

Ομάδα	Συμβολισμός	Διανυσματικό διάγραμμα		Συνδεσμολογία	
		Υ.Τ.	Χ.Τ.	Υ.Τ.	Χ.Τ.
0	A	Dd0			
		Yy0			
		Dz0			
5	C	Dy5			
		Yd5			
		Yz5			
6	B	Dd6			
		Yy6			
		Dz6			
11	D	Dy11			
		Yd11			
		Yz11			

Πίνακας 2: Συνδεσμολογία τριφασικών μετασχηματιστών

### 1.4.2.2 Πραγματικός μετασχηματιστής τριών τυλιγμάτων

Στο σχήμα 12 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός μονοφασικού μετασχηματιστή με τρία τυλίγματα στο ανά μονάδα σύστημα.

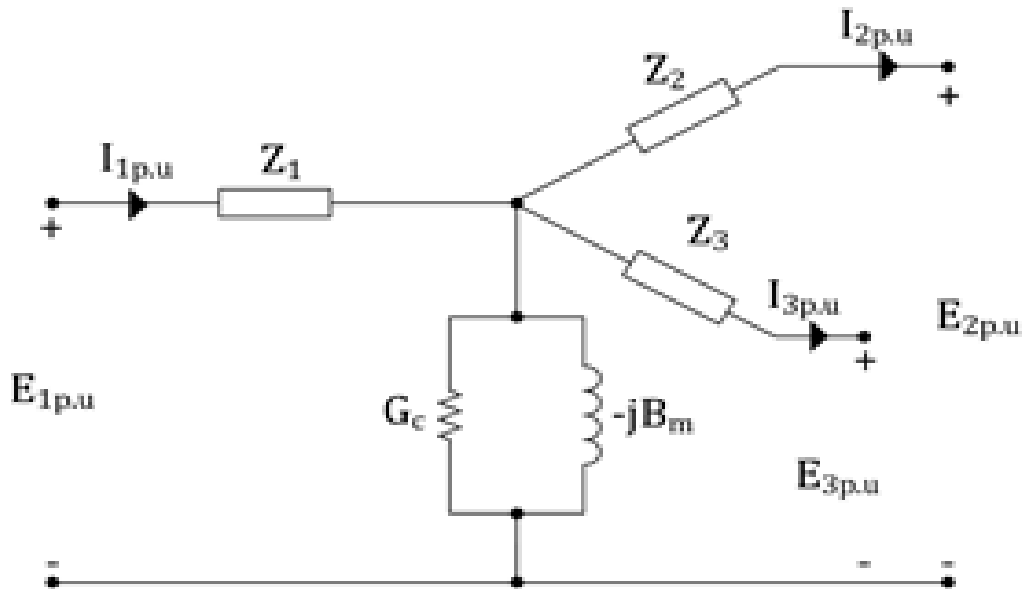
Μετατρέποντας τις σχέσεις (1.48) και (1.51) για τους μετασχηματιστές τριών τυλιγμάτων, έχουμε ότι:

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 + N_3 I_3 \quad (1.78)$$

και

$$\frac{E_1}{N_1} = \frac{E_2}{N_2} = \frac{E_3}{N_3} \quad (1.79)$$

Επίσης, οι δύο παραπάνω σχέσεις στο ανά μονάδα σύστημα γίνονται:



Σχήμα 12: Ισοδύναμο κυκλώματα μονοφασικού μετασχηματιστή τριών τυλιγμάτων στο ανά μονάδα σύστημα

$$I_{1p.u} = I_{2p.u} + I_{3p.u} \quad (1.80)$$

και

$$E_{1p.u} = E_{2p.u} = E_{3p.u} \quad (1.81)$$

Καθώς η βασική ισχύς  $S_b$  είναι κοινή για όλα τα τυλίγματα και οι βασικές τάσεις των τυλιγμάτων είναι ανάλογες του λόγου των τυλιγμάτων.

Αν σ' ένα μετασχηματιστή τριών κυκλωμάτων ανοιχτοκυκλώσουμε ένα από τα τρία τυλίγματα τότε προκύπτει ένας μετασχηματιστής δύο τυλιγμάτων. Έτσι, μπορούμε να υπολογίζουμε τη σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος που θα προκύψει. Δηλαδή,

$Z_{12p.u}$  = η σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος 1, με βραχυκυκλωμένο το κύκλωμα 2 και ανοιχτό το κύκλωμα 3.

$Z_{13p.u}$  = η σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος 1 με βραχυκυκλωμένο το κύκλωμα 3 και ανοιχτό το κύκλωμα 2.

$Z_{23p.u}$  = η σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος 2 με βραχυκυκλωμένο το σύστημα 3 και ανοιχτό το σύστημα 1.

Αν αγνοήσουμε τον κλάδο μαγνήτισης ισχύει ότι:

$$Z_{12p.u} = Z_{1p.u} + Z_{2p.u} \quad (1.82)$$

$$Z_{13p.u} = Z_{1p.u} + Z_{3p.u} \quad (1.83)$$

$$Z_{23p.u} = Z_{2p.u} + Z_{3p.u} \quad (1.84)$$

Λύνοντας το σύστημα των τριών εξισώσεων παίρνουμε σαν αποτέλεσμα ότι ισχύει:

$$Z_{1p.u} = \frac{1}{2}(Z_{12p.u} + Z_{13p.u} - Z_{23p.u}) \quad (1.85)$$

$$Z_{2p.u} = \frac{1}{2}(Z_{12p.u} + Z_{23p.u} - Z_{13p.u}) \quad (1.86)$$

$$Z_{3p.u} = \frac{1}{2}(Z_{13p.u} + Z_{23p.u} - Z_{12p.u}) \quad (1.87)$$

Φυσικά οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν αφού έχουμε μετατρέψει τις παραμέτρους στο ανά μονάδα σύστημα με βασική ισχύ  $S_b$ , πριν χρησιμοποιήσουμε τις παραπάνω εξισώσεις.

## 1.5 Μοντελοποίηση Γεννητριών

Η σύγχρονη γεννήτρια, ή αλλιώς εναλλακτήρας, είναι σύγχρονη μηχανή που μετατρέπει μηχανική ενέργεια σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Η σύγχρονη μηχανή χρησιμοποιούμενη ως γεννήτρια είναι η σπουδαιότερη μηχανή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και αποτελεί το επίκεντρο κάθε σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η τροφοδότηση του δρομέα της γεννήτριας με συνεχές ρεύμα είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τη λειτουργία της γεννήτριας. Με την περιστροφή του δρομέα λόγω μιας εξωτερικής κινητήριας μηχανής, το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται λόγω του συνεχούς ρεύματος κινείται μαζί του, με αποτέλεσμα την παραγωγή τριφασικής τάσης στα τυλίγματα του στάτη.

Ανάλογα με τον αριθμό των πόλων, οι σύγχρονες γεννήτριες κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες

- Μηχανές κυλινδρικού δρομέα.
- Μηχανές εκτύπων πόλων.

Στη δεύτερη κατηγορία οι πόλοι της γεννήτριας είναι ευδιάκριτοι στην επιφάνεια του δρομέα, ενώ στην πρώτη βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο με την υπόλοιπη επιφάνειά του.

Οι μηχανές κυλινδρικού δρομέα είναι πολύστροφες μηχανές, ενώ οι αργόστροφες μηχανές είναι έκτυπων πόλων. Επίσης, οι πρώτες είναι συνήθως διπολικές ή τετραπολικές, ενώ οι δεύτερες έχουν πάνω από τέσσερις πόλους.

Οι μηχανές αυτές ονομάζονται σύγχρονες επειδή οι συχνότητες των τάσεων που παράγουν βρίσκονται σε συγχρονισμό με την ταχύτητα περιστροφής τους. Ο δρομέας του οποίου το πεδίο περιστρέφεται με φορά ίδια με αυτή του

δρομέα. Η σχέση της ηλεκτρικής συχνότητας του στάτη με την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου δίνεται από την εξίσωση:

$$f_c = \frac{n_m * P}{120} \quad (1.88)$$

με

όπου  $f_c$  η ηλεκτρική συχνότητα σε Hz,  $n_m$  η ταχύτητα περιστροφής δρομέα σε r/min και  $P$  ο αριθμός των πόλων.

Η τάση στα άκρα της κάθε φάσης μιας σύγχρονης μηχανής είναι:

$$E_A = \sqrt{2} * \pi * N_C * \phi * f \quad (1.89)$$

Συνήθως χρησιμοποιείται η πιο απλή έκφραση της σχέσης (1.89).

$$E_A = K * \phi * \omega \quad (1.90)$$

με  $K$  να είναι η σταθερά που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής.

### 1.5.1 Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας

Έστω  $E_A$  η τάση στα άκρα της μιας φάσης που παράγεται στο εσωτερικό της γεννήτριας. Αυτή είναι ίση με την αντίστοιχη τάση στα άκρα της μηχανής  $V_\phi$  μόνο όταν το ρεύμα του τυλίγματος του στάτη είναι μηδέν.

Η περιστροφή του δρομέα στο εσωτερικό της γεννήτριας παράγει τάση  $E_A$  σε κάθε φάση του στάτη. Όταν, στα άκρα της μηχανής συνδεθεί κάποιο φορτίο, εμφανίζεται ρεύμα στους αγωγούς του στάτη το οποίο παράγει ένα νέο πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής. Το πεδίο του στάτη με τη σειρά του επηρεάζει το μαγνητικό πεδίο που ήταν από πριν διαμορφωμένο στη μηχανή, αλλά και την τάση στα άκρα της κάθε φάσης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αντίδραση τυμπάνου.

Έτσι, η  $V_\phi$  δίνεται από τη σχέση:

$$V_\phi = E_A - jX_S I_A - R_A I_A \quad (1.91)$$

με

$X_S$ : η σύγχρονη αντίδραση της γεννήτριας, που ισούται με το άθροισμα της αντίδρασης οπλισμού της αυτεπαγωγής των τυλιγμάτων στον στάτη, δηλαδή

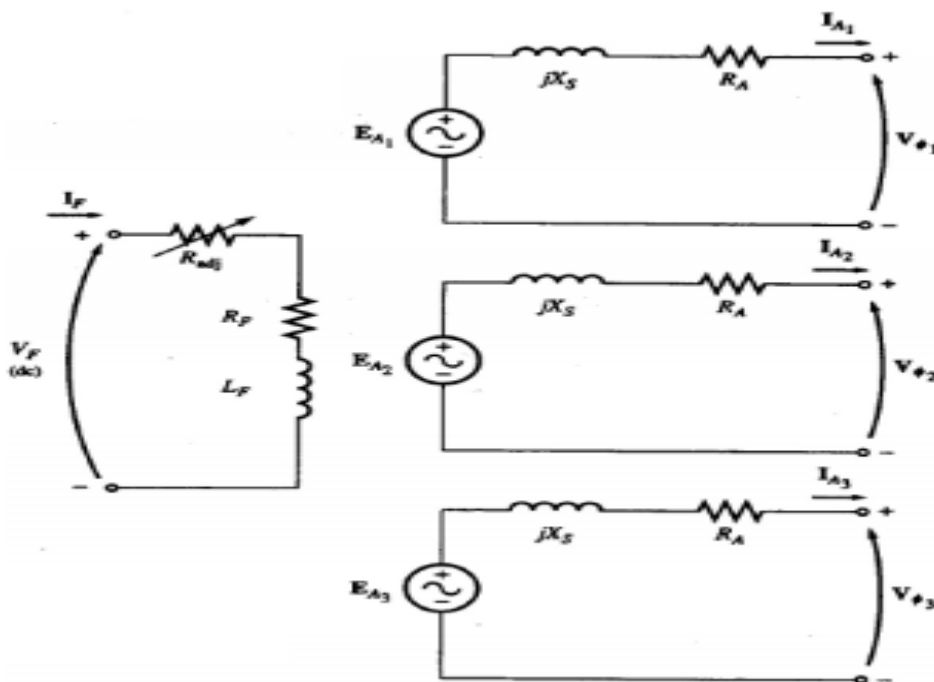
$$X_S = X + X_A \quad (1.92)$$

$R_A$ : η ωμική αντίσταση μιας φάσης και

$I_A$ : το ρεύμα μιας φάσης.

Το ισοδύναμο κύκλωμα της τριφασικής γεννήτριας φαίνεται στο σχήμα

13.



Σχήμα 13: Ισοδύναμο κύκλωμα τριφασικής σύγχρονης γεννήτριας

Το τύλιγμα της διέγερσης αντιπροσωπεύεται από μία αυτεπαγωγή και από μία αντίσταση. Σε σειρά με την  $R_F$  έχει συνδεθεί η ρυθμιστική αντίσταση  $R_{adj}$  που μπορεί να μεταβάλει το ρεύμα διέγερσης.

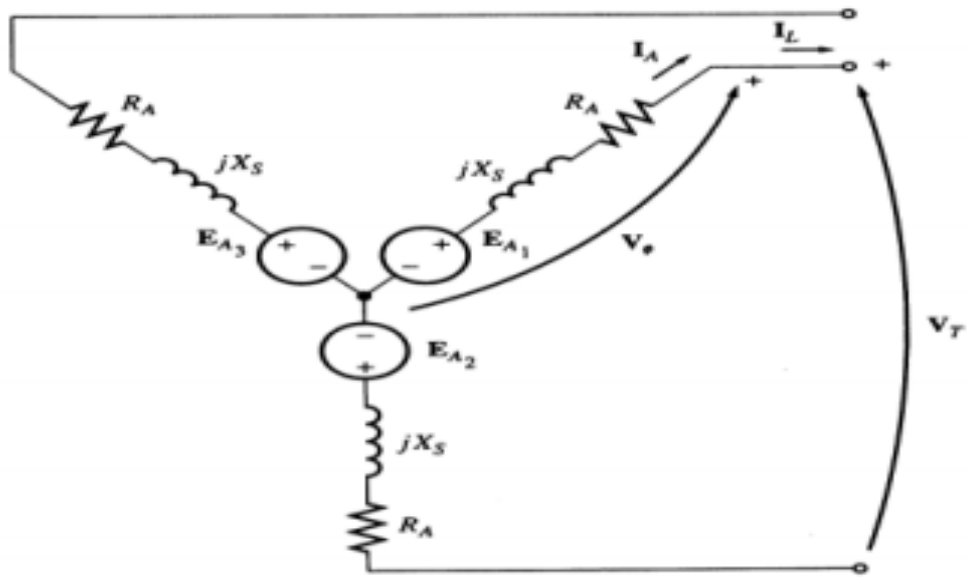
Επίσης, οι τάσεις και τα τριών των τριών φάσεων διαφέρουν μεταξύ τους μόνο στη φάση, με διαφορά φάσης  $120^\circ$  η μία από την άλλη, ενώ κατά τα άλλα είναι εντελώς όμοιες.

Όταν οι φάσεις του στάτη είναι συνδεδεμένες σε αστέρα (σχήμα 14), οι αντίστοιχες πολικές τάσεις είναι:

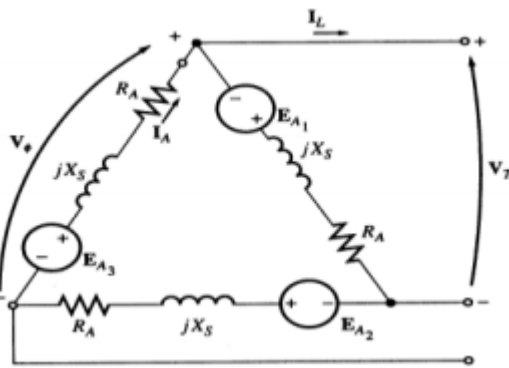
$$V_T = \sqrt{3} * V_\phi \quad (1.93)$$

Ενώ όταν είναι συνδεδεμένες σε τρίγωνο (σχήμα 15), οι πολικές τάσεις είναι:

$$V_T = V_\phi \quad (1.94)$$

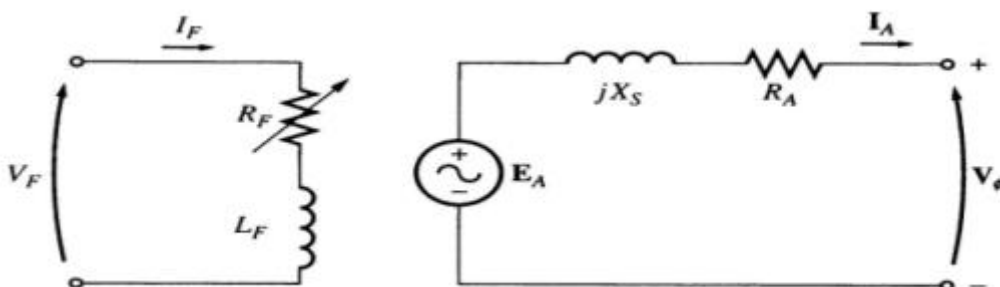


Σχήμα 14: Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας συνδεδεμένης σε αστέρα



Σχήμα 15: Ισοδύναμο κύκλωμα τριφασικής γεννήτριας συνδεδεμένης σε τρίγωνο

Η μόνη διαφορά μεταξύ των τριών φάσεων είναι η διαφορά φάσης που έχουν. Έτσι, το ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση φαίνεται στο σχήμα 16.



Σχήμα 16: Ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας



Ορίζουμε  $R_F$  το συνδυασμό της εσωτερική αντίστασης διέγερσης και της ρυθμιστικής αντίστασης.

## 1.5.2 Σύγχρονη γεννήτρια έκτυπων πόλων

Ο δρομέας αποτελείται από τον άξονα, επάνω στον οποίο στερεώνεται ο σιδηρομαγνητικός πυρήνας. Μέρος του πυρήνα αυτού είναι οι έκτυποι πόλοι γύρω από τους οποίους τυλίγεται ο αγωγός διέλευσης του ρεύματος και έτσι σχηματίζεται το τύλιγμα διέγερσης. Σε αυτή την περίπτωση, το διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα δεν είναι παντού το ίδιο. Έτσι, διακρίνουμε δύο άξονες, τον κατά μήκος ( $d$ ) και τον εγκάρσιο ( $q$ ).

Έτσι, η συνολικά τάση θα είναι:

$$V_\phi = E_A + E_d + E_q \quad (1.95)$$

με

$E_d$ : η συνιστώσα της τάσης εξαιτίας της αντίδρασης οπλισμού στον κατά μήκος άξονα και

$E_q$ : η συνιστώσα της τάσης εξαιτίας της αντίδρασης οπλισμού στον εγκάρσιο άξονα.

Κάθε τάση εξαιτίας της αντίδρασης τυμπάνου είναι ανάλογη του ρεύματος στο στάτη και καθυστερεί σε σχέση με αυτό  $90^\circ$ . Έτσι, έχουμε:

$$E_d = -jX_d I_d \quad (1.96)$$

και

$$E_q = -jX_q I_q \quad (1.97)$$

Άρα, η συνολική τάση στο στάτη είναι:

$$V_\phi = E_A - jX_d I_d - jX_q I_q \quad (1.98)$$

Έχουμε ότι ισχύει επίσης:

$$X_d = x_d + X_A \quad (1.99)$$

$$X_q = x_q + X_A \quad (1.100)$$

Έτσι, η τελική έκφραση για τη φασική τάση μιας σύγχρονης γεννήτριας έκτυπων πόλων είναι:

$$V_{\phi} = E_A - jx_d I_d - jx_q I_q - R_A I_A \quad (1.101)$$

Καθώς η πτώση τάσης στην αντίσταση του τυλίγματος του στάτη είναι ίση με το γινόμενο της αντίστασης του τυλίγματος του στάτη επί το ρεύμα στο στάτη  $I_A$ .

## 2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### Παρουσίαση Προγράμματος HSPice

#### 2.1 Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός ηλεκτρονικών συστημάτων είναι μια θεμελιώδης διαδικασία, κατά την οποία συνδυάζονται κατάλληλα κάποια ηλεκτρονικά στοιχεία σε συγκεκριμένες διατάξεις για την υλοποίηση μιας συγκεκριμένης λειτουργίας. Η κατασκευή ενός «προτύπου» ηλεκτρονικού συστήματος είναι απαραίτητη και για την επιβεβαίωση της καλής λειτουργίας καθώς και την αξιολόγηση των επιδόσεων που επιτυγχάνονται.

Πριν την κατασκευή του πρότυπου κυκλώματος, προηγείται η προσομοίωση του κυκλώματος που αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της διαδικασίας σχεδιασμού.

Η προσομοίωση αφορά τη μίμηση μιας πραγματικής ή πιθανής κατάστασης του κυκλώματος, με σκοπό την εύρεση μιας παρελθοντικής αίτιας ή την πρόβλεψη μιας μελλοντικής συμπεριφοράς. Συνεπώς, με την προσομοίωση έχουμε τη δυνατότητα να πραγματοποιήσουμε οποιονδήποτε λειτουργικό έλεγχο του κυκλώματος αλλάζοντας παραμέτρους, πράγμα που είναι αδύνατο να γίνει συστηματικά με κατασκευές πολλών προτύπων.

Η επίλυση των θεωρητικών μοντέλων σε κυκλώματα με πολλά στοιχεία ή βαθμίδες είναι περίπλοκη ή και αδύνατη με αναλυτικό τρόπο. Για το λόγο αυτό γίνεται χρήση προγραμμάτων ανάλυσης με υπολογιστή, που είναι αποτελεσματικά και επιτρέπουν τη μελέτη της επίδρασης μεγάλου πλήθους παραγόντων ή παραμέτρων σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

Ένα από αυτά τα προγράμματα είναι και το SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). Μια επέκτασή του είναι το HSpice της SYNOPSIS που θα χρησιμοποιήσουμε στην παρούσα διπλωματική, το οποίο λειτουργεί στο λογισμικό περιβάλλον Linux.

Το HSpice, όπως και άλλα προγράμματα, είναι προέκταση του SPICE. Λειτουργεί σύμφωνα με τον τρόπο που λειτουργεί το SPICE, αλλά έχει κάποιες επιπλέον επιλογές.

Γενικά, στο SPICE το κύκλωμα περιγράφεται με τη χρήση ενός αρχείου (file) το οποίο αποτελεί το αρχείο εισόδου (αρχείο εισαγωγής δεδομένων) του SPICE. Το αρχείο αυτό περιέχει τα στοιχεία του κυκλώματος (αντιστάτες, πυκνωτές, αυτεπαγωγές, πηγές τάσης και ρεύματος, διατάξεις ημιαγωγών κ.α.) και περιγράφει πως συνδέονται μεταξύ τους κάνοντας χρήση αριθμών που αντιστοιχούν στους διάφορους κόμβους του κυκλώματος. Μπορεί να υπάρχουν επίσης πληροφορίες που δείχνουν τη συχνότητα των πηγών, τη θερμοκρασία, το είδος των αναλύσεων που χρειάζεται να γίνουν και πως πρέπει να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της κάθε ανάλυσης. Το πρόγραμμα SPICE διαβάζει το αρχείο εισόδου και βρίσκει πως πρέπει να συνδεθούν τα διάφορα στοιχεία κυκλωμάτων και διατάξεις σε κάθε κόμβο.

Κατόπιν, για τη λύση του προβλήματος, χρησιμοποιεί την μέθοδο των κόμβων όπου άγνωστοι είναι τα δυναμικά των κόμβων ως προς κάποιον κόμβο αναφοράς (του οποίου το δυναμικό λαμβάνεται ως 0). Το ρεύμα κάθε κλάδου εκφράζεται συναρτήσει της διαφοράς δυναμικού στα άκρα του και της αγωγιμότητας του. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται ο νόμος των ρευμάτων του Kirchhoff και κατόπιν καταstrώνεται ένα σύστημα εξισώσεων για το κύκλωμα το οποίο όταν λυθεί θα προσδιορίσει τα δυναμικά (τάσεις) των κόμβων. Προφανώς το SPICE πρέπει να γνωρίζει το μοντέλο των στοιχείων του κυκλώματος και των ημιαγωγικών διατάξεων. Για την λύση του συστήματος των εξισώσεων χρησιμοποιείται η αριθμητική μέθοδος Newton – Raphson.

Όπως είπαμε, το HSpice είναι συμβατό με τις περισσότερες παραλλαγές του SPICE. Έχει όμως, κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, μερικά από τα οποία είναι:

- Καλύτερη σύγκλιση
- Ακριβής μοντελοποίηση συμπεριλαμβανομένων εργοστασιακών μοντέλων
- Ιεραρχική ονομασία κόμβων και αναφορά
- Βελτιστοποίηση του κυκλώματος για μοντέλα και στοιχεία με σταδιακά αυξανόμενες ή ταυτόχρονες πολυπαραμετρικές βελτιστοποιήσεις στις προσομοιώσεις AC, DC και μεταβατικών φαινομένων (transient).
- Υποστήριξη σχεδιασμών Monte Carlo και χειρότερης περίπτωσης.
- Εισαγωγή, εξαγωγή και συμπεριφορικών αλγεβρικών για στοιχεία με παραμέτρους.
- Εργαλεία χαρακτηρισμού στοιχείων για να χαρακτηριστούν βασικές βιβλιοθήκες στοιχείων.
- Ένας αριθμός τύπων ανάλυσης κυκλωμάτων και τεχνολογιών μοντελοποίησης συσκευών.

## 2.2 Αρχείο Εισόδου

Το αρχείο εισόδου (input file) υλοποιείται από οποιοδήποτε επεξεργαστή κειμένου (text editor) και περιλαμβάνει εντολές δεδομένων (netlist) που περιγράφουν το κύκλωμα, εντολές ελέγχου οι οποίες καθορίζουν το είδος της ανάλυσης και επίσης εντολές εξόδου οι οποίες περιγράφουν το είδος και τον τρόπο παρουσίασης των αποτελεσμάτων

Επίσης, είναι απαραίτητο να έχει την κατάληξη *input\_file.sp*.

Οι αριθμοί μπορούν να είναι εκφρασμένοι στον επιστημονικό συμβολισμό ή χρησιμοποιηθούν τα προθέματα του πίνακα 3.

<u>Γράμμα</u>	<u>Πολλαπλάσιο</u>
A	atto ( $10^{-18}$ )
F	femto ( $10^{-15}$ )
P	pico ( $10^{-12}$ )
N	nano ( $10^{-9}$ )
U	micro ( $10^{-6}$ )
M	milli ( $10^{-3}$ )
K	kilo ( $10^3$ )
MEG	mega ( $10^6$ )
G	giga ( $10^9$ )

Πίνακας 3: Πολλαπλάσια μονάδων φυσικών ποσοτήτων

### 2.2.1 Κανόνες γραμμών του αρχείου εισόδου

#### Τίτλος

Το αρχείο εισόδου ξεκινά με πρώτη γραμμή τον τίτλο της προσομοίωσης και πρέπει να τελειώνει με τη δήλωση .END.

#### Σχόλια

Υπάρχουν, δύο μορφές σχολίων:

- \* : σχόλιο είναι ολόκληρη γραμμή
- \$ : σχόλιο είναι ότι βρίσκεται μετά

Επίσης, το σύμβολο “+” σημαίνει τη συνέχιση της προηγούμενη γραμμής.

Οι κόμβοι στην περιγραφή του κυκλώματος δίνονται είτε με αρίθμηση είτε με ετικέτες (labels). Ειδικά ο κόμβος με αριθμό 0 είναι πάντοτε ο κόμβος της γείωσης.

Κάθε αλφαριθμητική (γραμματαριθμητική) σειρά που παριστάνει στοιχείο κυκλώματος, αρχίζει με τα γράμματα του πίνακα 4.

## Παθητικά στοιχεία

Οι αντιστάτες, οι πυκνωτές και οι αυτεπαγωγές ανήκουν στα παθητικά στοιχεία ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Παρακάτω θα δείξουμε με ποιον τρόπο γίνεται η δήλωσή τους.

### Αντιστάτης

Rxxx n1 n2 value [TC1 TC2]

<i>Γράμμα</i>	<i>Στοιχείο</i>
R	Αντίσταση
C	Πυκνωτής (χωρητικότητα)
L	Πηνίο (αυτεπαγωγή)
K	Αμοιβαία επαγωγή
V	Ανεξάρτητη πηγή τάσης
I	Ανεξάρτητη πηγή ρεύματος
M	Τρανζίστορ MOS
D	Δίοδος
Q	Τρανζίστορ BJT
T	Γραμμή μεταφοράς
X	Υποκύκλωμα
E	Πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση
G	Πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από τάση
H	Πηγή τάσης ελεγχόμενη από ρεύμα
F	Πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από ρεύμα

Πίνακας 4: Κυκλωματικά στοιχεία

Ο αντιστάτης Rxxx είναι συνδεδεμένος μεταξύ των κόμβων n1 (+) και n2 (-) με τιμή value. Οι παράμετροι TC1 και TC2 είναι οι συντελεστές στη σχέση που καθορίζει την εξάρτηση του αντιστάτη από τη θερμοκρασία.

Π.χ. R12 3 4 5k

Ο αντιστάτης R12 είναι συνδεδεμένος στους κόμβους 3 και 4 και έχει τιμή 5KΩ.

### Πυκνωτής

Cxxx n1 n2 value [IC=COND]

Ο πυκνωτής Cxxx είναι συνδεδεμένος μεταξύ των κόμβων n1 (+) και n2 (-) με τιμή value. Το προαιρετικό IC είναι η τιμή τάσης στον πυκνωτή την χρονική στιγμή μηδέν και είναι προαιρετική. Αν έχει δοθεί τέτοια αρχική συνθήκη, λαμβάνεται υπόψη στην ανάλυση μόνο αν έχει συμπεριληφθεί στην

εντολή ελέγχου .TRAN η δυνατότητα UIC (use initial conditions, χρησιμοποίησε αρχικές συνθήκες). Η εντολή .TRAN σημαίνει ανάλυση μεταβατικών φαινομένων (transient), μεταβατική ανάλυση.

Π.χ. C7 9 10 3u

Ο πυκνωτής C7 είναι συνδεδεμένος στους κόμβους 9 και 10 και έχει τιμή 3μF.

### Αυτεπαγωγή

Lxxx n1 n2 value [IC=COND]

Η αυτεπαγωγή Lxxx είναι συνδεδεμένη μεταξύ των κόμβων n1 (+) και n2 (-) με τιμή value. Το προαιρετικό IC δηλώνει το αρχικό ρεύμα. Όταν το IC είναι θετικό σημαίνει ότι έχει φορά από το N+ προς το N-. Για να χρησιμοποιηθεί η αρχική συνθήκη πρέπει να έχει ενεργοποιηθεί το UIC στο .TRAN.

Π.χ. L5 6 8 1m

Η αυτεπαγωγή L5 είναι συνδεδεμένη στους κόμβους 6 και 8 και έχει τιμή 1mH.

### Ανεξάρτητες πηγές

#### Πηγή τάσης

Vxxx n1 n2 [[DC=] dcvall [AC=acmag acphase]] tranfun

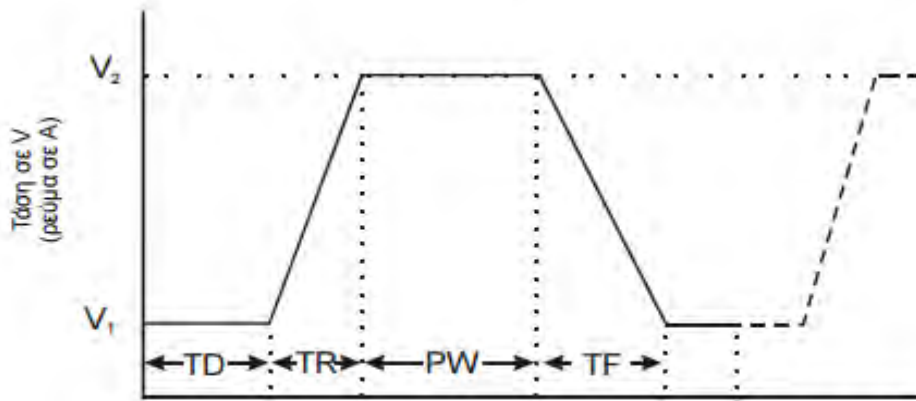
#### Πηγή ρεύματος

Ixxx n1 n2 [[DC=] dcvall [AC=acmag acphase]] tranfun

Η πηγή τάσης Vxxx είναι συνδεδεμένη στους κόμβους n1 (+) και n2(-). Η προαιρετική παράμετρος DC = dcvall δηλώνει τη DC τιμή της πηγής για τον υπολογισμό του σημείου λειτουργίας για όλες τις αναλύσεις εκτός για την ανάλυση μεταβατικών φαινομένων. Το AC σημαίνει αρμονική εξάρτηση με τον χρόνο. Το πλάτος και η φάση σε αυτή την περίπτωση είναι acmag και acphase (σε μοίρες). Μία ανεξάρτητη πηγή μπορεί να περιγράφεται με μία από τις 5 συναρτήσεις του χρόνου, 5 δυνατότητες, (tranfun): pulse, sinusoidal, exponential, piece wise linear ή μοναδικής συχνότητας FM

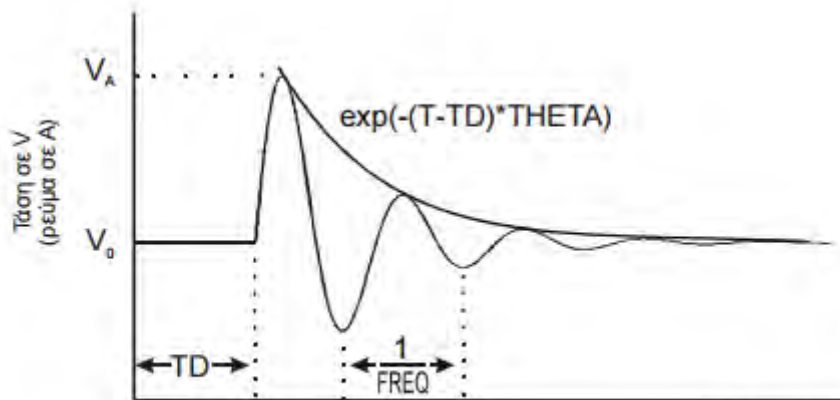
- PULSE (V1 V2 Td Tr Tf Pw Period), V1 αρχική τιμή σε volt ή ampere (η τιμή πρέπει να καθοριστει), V2 τελική τιμή σε volt ή ampere (η τιμή πρέπει να καθοριστει), Td χρονική καθυστέρηση (η προκαθορισμένη τιμή, default, είναι 0) σε second, Tr χρόνος ανόδου (η προκαθορισμένη τιμή είναι TSTEP) σε second, Tf χρόνος καθόδου (η προκαθορισμένη τιμή είναι TSTEP) σε second, Pw εύρος παλμού

(η προκαθορισμένη τιμή είναι TSTOP) σε second , Period περίοδος (η προκαθορισμένη τιμή είναι TSTOP) σε second. Τα TSTEP και TSTOP αναφέρονται στα μεγέθη του βήματος και τελικού χρόνου για την μεταβατική ανάλυση και καθορίζονται με την εντολή .TRAN TSTEP TSTOP (σχήμα 17).



Σχήμα 17:PULSE

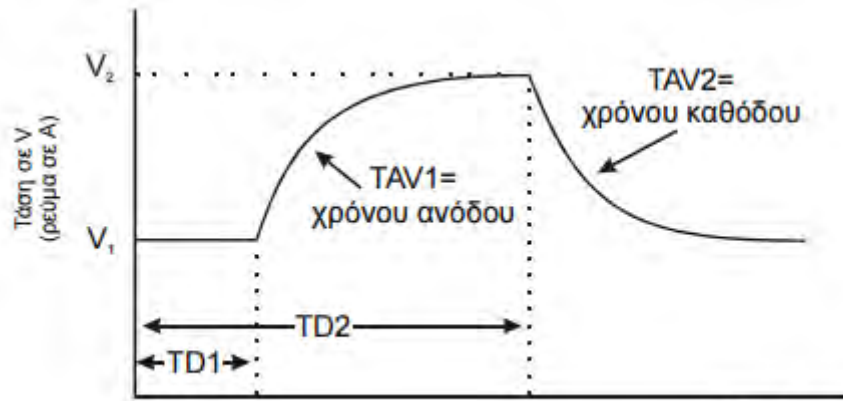
- SIN (Vo Va Freq Td Df Phase), Vo απόκλιση (offset) σε volt ή ampere (η τιμή πρέπει να καθοριστει), Va πλάτος σε volt ή ampere (η τιμή πρέπει να καθοριστει), Freq συχνότητα (η προκαθορισμένη τιμή είναι 1/TSTOP) σε Hz, Td καθυστέρηση (η προκαθορισμένη τιμή είναι 0) σε second, Df συντελεστής απόσβεσης (η προκαθορισμένη τιμή είναι 0) σε 1/s, Phase καθυστέρηση φάσης (σχήμα 18).
- EXP ( V1 V2 Td1 T1 Td2 T2), V1:αρχική τιμή, V2:τιμή κορυφής (peak).Td1 καθυστέρηση ανόδου, T1 σταθερά ανόδου, Td2 καθυστέρηση καθόδου, T2 σταθερα καθόδου. Οι μονάδες χρόνου



Σχήμα 18:SIN



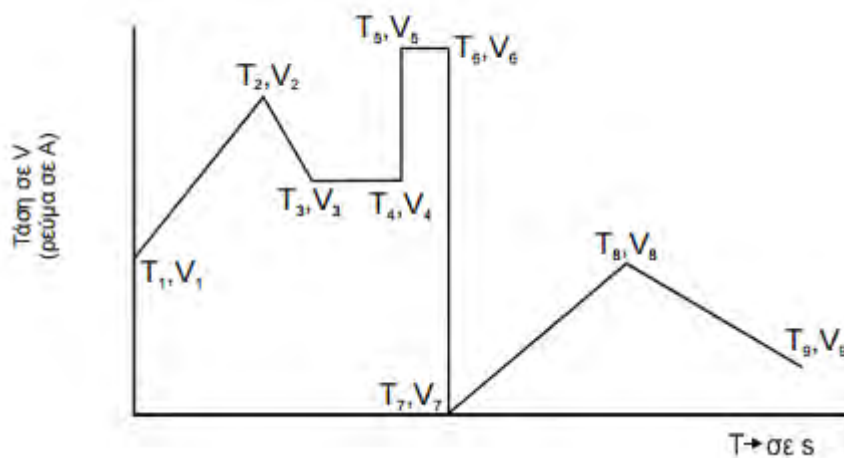
είναι  
σε



Σχήμα 199: EXP

second. Υπάρχουν οι ακόλουθες προκαθορισμένες τιμές :  $TD1=0$ ,  $T1=TSTEP$ ,  $TD2=TD1+TSTEP$ ,  $T2=TSTEP$  (σχήμα 19).

- $PWL(T1 V1 T2 V2 T3 V3 \dots Tn Vn \dots)$ ,  $Tn$  (n-οστή τιμή χρόνου) που πρέπει να καθοριστεί και είναι σε second,  $Vn$  (n-οστή τιμή τάσης ή ρεύματος) που πρέπει να καθοριστεί και είναι σε volt ή ampere (σχήμα 20).



Σχήμα 20: PWL

- $SFFM(Vo Va Fc Mdi Fs)$ ,  $Vo$  είναι η απόκλιση (offset) σε volt ή ampere και πρέπει να καθοριστεί,  $Va$  είναι το πλάτος σε volt ή ampere και πρέπει να καθοριστεί,  $Fc$  είναι η συχνότητα του φέροντος που έχει ως προκαθορισμένη τιμή την  $1/TSTOP$  σε Hz,  $Mdi$  είναι ο δείκτης διαμόρφωσης και πρέπει να καθοριστεί,  $Fs$  είναι η συχνότητα διαμόρφωσης (σήματος) σε Hz με προκαθορισμένη τιμή  $1/TSTOP$ .

Υπάρχουν και οι αντίστοιχες δηλώσεις για γραμμικά ελεγχόμενες πηγές, όπως και μη γραμμικές ελεγχόμενες πηγές, αλλά δεν θα επεκταθούμε παραπάνω.

## 2.2.2 Μορφές ανάλυσης

Η ανάλυση που θα γίνει στο κύκλωμα καθορίζεται από εντολές ελέγχου στο αρχείο εισόδου. Κάθε εντολή ελέγχου ξεκινάει με την κάτω τελεία (.).

### **DC ανάλυση**

Με την εντολή .DC προσδιορίζεται το σημείο λειτουργίας dc του κυκλώματος. Οι πυκνωτές αποτελούν διακοπές στο κύκλωμα και οι αυτεπαγωγές βραχυκυκλώματα. Μπορεί να γίνεται μεταβολή τάσης ή ρεύματος πηγής συνεχούς κατά βήματα και κάθε φορά προσδιορισμός του σημείου λειτουργίας DC .

Η εντολή .DC έχει διάφορες μορφές.

```
.DC var1 START=start1 STOP=stop1 STEP=incr
```

```
.DC var1 START=[param_expr1]
```

```
+STOP=[param_expr2] STEP=[param_expr3]
```

```
.DC var1 start1 stop1 incr1
```

```
+ [SWEEP var2 type np start2 stop2]
```

```
.DC var1 start1 stop1 incr1 [var2 start2 stop2 incr2]
```

var1 είναι η ανεξάρτητη πηγή τάσεως ή ρεύματος που μεταβάλλεται. START είναι η αρχική τιμή τάσης ή ρεύματος , STOP είναι η τελική τιμή, STEP είναι το βήμα της μεταβολής. Οι τιμές είναι σε volt ή ampere

Είναι δυνατόν να οριστεί μια δεύτερη πηγή var2 με τις αντίστοιχες παραμέτρους της. Αν υπάρχει δεύτερη πηγή γίνεται σάρωση των τιμών της πρώτης για κάθε μία τιμή της δεύτερης.

Πρέπει να υπάρχουν εντολές .PRINT και .PLOT για να γραφτούν τα αποτελέσματα στο αρχείο εξόδου *output\_file.lis*.

### **AC ανάλυση**

Με την εντολή `.AC` γίνεται γραμμική ανάλυση μικρών σημάτων. Το `HSprice` βρίσκει το σημείο λειτουργίας `dc` και υπολογίζει τιμές για μοντέλα μικρών σημάτων για όλες τις μη γραμμικές διατάξεις (ημιαγωγούς, μη γραμμικές πηγές κτλ). Στη συνέχεια κάνει ανάλυση για κάθε συχνότητα που έχει καθοριστεί. Τα αποτελέσματα μπορεί να τυπωθούν ή να παρασταθούν γραφικά.

Παρόμοια με την ανάλυση `DC`, η `AC` έχει κι αυτή διάφορες μορφές.

```
.AC type np fstart fstop
```

```
.AC type np fstart fstop [SWEEP var [START=]start
```

```
+ [STOP=]stop [STEP=]incr]
```

```
.AC type np fstart fstop [SWEEP var type np start stop]
```

```
.AC type np fstart fstop
```

```
+ [SWEEP var START="param_expr1"
```

```
+ STOP="param_expr2" STEP="param_expr3"]
```

```
.AC type np fstart fstop [SWEEP var start_expr
```

```
+ stop_expr step_expr]
```

`fstart` είναι η ελάχιστη συχνότητα (δεν μπορεί να είναι 0 ή αρνητική) και `fstop` είναι η μέγιστη συχνότητα. Η παράμετρος `type` μπορεί να πάρει μία από τις ακόλουθες τιμές:

- LIN
- DEC
- OCT
- POI

LIN `np` σημαίνει ότι θα γίνει ανάλυση σε `np` πλήθος συχνοτήτων που είναι ισάπεχουσες (γραμμικά) μεταξύ `fstart` και `fstop`. Στη περίπτωση μιας μόνο συχνότητας θέτουμε `np=1` και `fstart = fstop =` η επιθυμητή συχνότητα.

DC `np` σημαίνει ότι η περιοχή συχνοτήτων υποδιαιρείται σε δεκάδες με `np` συχνότητες ανά δεκάδα. Οι συχνότητες κατανέμονται λογαριθμικά. Αν `fstop` δεν είναι κάποιος ακέραιος αριθμός (πλήθος) δεκάδων πάνω από το `fstart`, τότε η μέγιστη συχνότητα μπορεί να υπερβεί το `fstop`.

OCT `np` σημαίνει ότι το εύρος συχνοτήτων χωρίζεται σε οκτάβες με `np` συχνότητες ανά οκτάβα. Οι συχνότητες μεταβάλλονται λογαριθμικά. Αν η `fstop` δεν είναι ακέραιο πολλαπλάσιο οκτάβων πάνω στο `fstart`, η μέγιστη συχνότητα μπορεί να υπερβεί την `fstop`.

Σε αντίθεση με την περίπτωση της εντολής ελέγχου .DC εδώ δεν καθορίζεται ποιας πηγής η συχνότητα θα μεταβληθεί. Όλες οι πηγές ac μεταβάλλονται συγχρόνως. Χρειάζεται προσθήκη των εντολών όπως .PRINT και .PLOT για να γραφτεί η πληροφορία στο *output\_file.lis*.

## **Transient ανάλυση**

Με την εντολή ελέγχου .TRAN, που σημαίνει transient (μεταβατική, εξαρτώμενη από το χρόνο) ανάλυση, γίνεται ανάλυση όπου οι μεταβλητές υπολογίζονται συναρτήσει του χρόνου.

Έχει τη μορφή:

```
.TRAN tstep1 tstop1 [START=val] [UIC]
```

tstep1 είναι το βήμα χρόνου για εκτύπωση και γραφήματα, tstop1 είναι ο μέγιστος (τελικός) χρόνος ανάλυσης. START είναι το σημείο από όπου αρχίζει η εκτύπωση και το γράφημα. Υπάρχει προκαθορισμένη τιμή που είναι μηδέν. Η ανάλυση γίνεται πάντα από χρόνο μηδέν αλλά τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζονται στο *output\_file.lis*. UIC σημαίνει χρήση των αρχικών συνθηκών. Αν υπάρχει το UIC τότε το HSpice δεν υπολογίζει το σημείο ηρεμίας πριν την μεταβατική ανάλυση. Τότε υπάρχουν δύο περιπτώσεις που ακολουθεί το HSpice:

- Αν δεν υπάρχει η εντολή .IC χρησιμοποιεί τις αρχικές συνθήκες που δίνονται (για πυκνωτές, αυτεπαγωγές και ημιαγωγούς) ως το αρχικό σημείο για την ανάλυση συναρτήσει του χρόνου.
- Αν υπάρχει η εντολή .IC θα χρησιμοποιήσει τις τάσεις των κόμβων στην εντολή .IC για να προσδιορίσει τις αρχικές συνθήκες για τα διάφορα στοιχεία στο κύκλωμα

Τέλος, υπάρχουν 32 δυνατότητες (options) που μπορούν να ορισθούν και δηλώνονται με την εντολή ελέγχου .OPTIONS. Ενδεικτικά, μία δυνατότητα είναι η εκτύπωση μιας λίστας των στοιχείων των εντολών δεδομένων, των συνδέσεων των κόμβων και τιμές των στοιχείων, των πηγών, των παραμέτρων κ.ά. Η σύνταξή της είναι η ακόλουθη:

```
.OPTION LIST=0|1|2|3
```

με

0: τίποτα από τα παρακάτω δεν υποστηρίζεται

1: εκτυπώνει ένα περιληπτικό πίνακα με τα στοιχεία του κυκλώματος και τους ορισμούς των παραμέτρων

2: εκτυπώνει μόνο τον περιληπτικό πίνακα των στοιχείων του κυκλώματος

3: εκτυπώνει μόνο τους ορισμούς των παραμέτρων

### 2.2.3 Υποκυκλώματα

Αν ένα τμήμα του κυκλώματος χρησιμοποιείται πολλές φορές μπορεί να είναι καλό να γίνει ένα υποκύκλωμα (κάτι ανάλογο με τις υπορουτίνες στον προγραμματισμό).

Η πρώτη εντολή ενός υποκυκλώματος είναι:

```
.SUBCKT subname n1 n2 n3 ... [param = value]
```

```
.ENDS subname
```

*subname* είναι το όνομα του υποκυκλώματος, n1, n2, n3... είναι εκείνοι οι κόμβοι του υποκυκλώματος που θα συνδεθούν με άλλους κόμβους του κυκλώματος. Αυτοί λέγονται εξωτερικοί κόμβοι του υποκυκλώματος. Οι άλλοι κόμβοι λέγονται εσωτερικοί και ενώ μπορεί να έχουν τους ίδιους αριθμούς με του άλλου κυκλώματος δεν έχουν καμία σχέση με αυτούς εκτός από τον κόμβο 0 που είναι ο ίδιος παντού. Ο κόμβος 0 δεν μπορεί να περιλαμβάνεται στους n1, n2, ... Δεν επιτρέπονται εντολές ελέγχου μέσα στο υποκύκλωμα.

Η εντολή χρήσης των υποκυκλωμάτων είναι:

```
Xyyyyyy n1n2 n3 ... subname
```

Xyyyyyy είναι το όνομα των στοιχείων κυκλώματος στο «κυρίως» κύκλωμα που χρησιμοποιεί το υποκύκλωμα *subname*, n1, n2, n3... είναι οι κόμβοι στους οποίους συνδέεται το υποκύκλωμα.

### 2.2.4 Εντολές εξόδου

.OP : Δεν υπάρχουν παράμετροι που πρέπει να προσδιοριστούν. Αυτή η εντολή κάνει το HSPICE να λύσει το πρόβλημα και να βρει το σημείο ηρεμίας (σημείο πώλωσης) του κυκλώματος, με τους πυκνωτές «ανοιχτούς» και τις επαγωγές «βραχυκυκλωμένες», και να τυπώσει τα λεπτομερή αποτελέσματα της ανάλυσης μεγέθη όπως, η καταναλισκόμενη ισχύς στο κύκλωμα και στις πηγές καθώς και οι παράμετροι μικρού σήματος των ημιαγωγών και μη γραμμικών

διατάξεων. Το HSpice κάνει τέτοια ανάλυση χωρίς την εντολή .OP όταν γίνεται ανάλυση AC ή μεταβατική αλλά τότε δεν τυπώνει τα αποτελέσματα.

.PRINT : Η μορφή της είναι:

.PRINT antype on1 [on2 ... ]

antype είναι η παράμετρος για τον τύπο της ανάλυσης που θέλουν να εξάγουμε. Μπορεί να πάρει τις τιμές DC,AC,TRAN,NOISE,OP και DISTO. onn είναι η τιμές εξόδου που θέλουμε να τυπώσουμε και μπορεί να είναι τάση, ένταση, ισχύς, ισχύς πηγής ή μεταβλητές των στοιχείων.

.PLOT : Η εντολή αυτή κάνει γραφικές παραστάσεις σε εκτυπωτές. Η μορφή της εντολής είναι:

.PLOT antype on1 [plo1,ph1]...[onv] [plon,phin]

Η ανεξάρτητη μεταβλητή στο γράφημα («οριζόντιος άξονας») θα είναι: η τάση DC όταν πρόκειται για ανάλυση DC, η συχνότητα όταν πρόκειται για ανάλυση AC ή ο χρόνος για μεταβατική ανάλυση. Τα (plon, phin) είναι τα όρια του γραφήματος και είναι προαιρετικά.

.PROBE : Αυτή είναι εντολή για αποθήκευση των μεταβλητών εξόδου στην εφαρμογή και σε αρχεία γραφημάτων.. Η σύνταξη της εντολής είναι,

.PROBE antype on1 [on2 ...]

Τα on1,on2,...onv είναι οι μεταβλητές για τις οποίες θα γίνουν τα γραφήματα.

## 2.3 Τρέξιμο ενός αρχείου εισόδου

Για να καλέσουμε ένα αρχείο από ένα τερματικό αρκεί να ακολουθήσουμε κάποια συγκεκριμένα από τα παρακάτω βήματα:

- i. Με την εντολή cd φτάνουμε στο φάκελο που έχουμε αποθηκεύσει το αρχείο εισόδου (*input\_file.sp*).
- ii. Πληκτρολογούμε την εντολή:

```
hspice input_file.sp > input_file.lis
```

Μαζί με το αρχείο *input\_fil.lis* που θα δημιουργηθεί, δημιουργούνται και επιπλέον αρχεία τα οποία θα παρουσιάσουμε στην επόμενη ενότητα.

## 2.4 Αρχεία εξόδου

Τα πρότυπα αρχεία εξόδου που δημιουργούνται σε μία προσομοίωση φαίνονται στην εικόνα 4.

Μπορούν να δημιουργηθούν πολλά αρχεία των μορφών `.ac#`, `.dp#`, `.dm#`, `.ic#`, `.st#`, `.sw#` και `.tr#`. Το σύμβολο # μπορεί να πάρει τιμές από 0-9999.

Τέλος, το αρχείο `.gr#` δεν παράγεται από το λειτουργικό σύστημα Linux.

Μερικοί τύποι αρχείων εξόδου περιγράφονται παρακάτω.

Output File Type	Extension
AC analysis measurement results	<code>.ma#<sup>1</sup></code>
AC analysis results (from <code>.POST</code> statement)	<code>.ac#</code>
Monte Carlo results	<code>.mc#</code>
Data mining results	<code>.mpp0</code>
DC analysis measurement results	<code>.ms#</code>
DC analysis results (from <code>.POST</code> statement)	<code>.sw#</code>
Digital output	<code>.a2d</code>
FFT analysis graph data (from <code>FPT</code> statement)	<code>.ft#</code>
Hardcopy graph data (from <code>meta.cfg PRTDEFAULT</code> )	<code>.gr#<sup>2</sup></code>
Operating point information (from <code>.OPTION OPFILE</code> statement)	<code>.dp#</code>
Operating point node voltages (initial conditions)	<code>.ic#</code>
Output listing	<code>.lis</code> , or user-specified
Output status	<code>.st#</code>
Output tables (from <code>.DCMATCH OUTVAR</code> statement)	<code>.dm#</code>
Subcircuit cross-listing	<code>.pa#</code>
Transient analysis measurement results	<code>.mt#</code>
Transient analysis results (from <code>.POST</code> statement)	<code>.tr#</code>
Waveform viewing files from <code>.OPTION WDF</code> argument for use with Synopsys WaveView/SX tools	<code>*_wdf.tr#</code> , <code>*_wdf.sw#</code> , or <code>*_wdf.ac#</code>

Εικόνα 4: Αρχεία εξόδου

## **Αρχείο αποτελεσμάτων AC ανάλυσης**

Στο αρχείο *output\_file.ac#* περιέχονται τα αποτελέσματα της AC ανάλυσης, ανάλογα με τη μορφή της εντολής ελέγχου .AC. Τα αποτελέσματα αυτά απαριθμούν τις μεταβλητές εξόδου σαν συνάρτηση με τη συχνότητα.

## **Αρχείο αποτελεσμάτων AC Measurement ανάλυσης**

Στο αρχείο *output\_file.ma#* περιέχονται τα αποτελέσματα της AC Measurement ανάλυσης, όταν στο αρχείο εισόδου υπάρχει η εντολή ελέγχου .MEASURE AC.

## **Αρχείο εξόδου DC ανάλυσης**

Στο αρχείο εξόδου *output\_file.sw#*, περιέχονται τα αποτελέσματα της DC ανάλυσης, όταν περιλαμβάνεται η εντολή ελέγχου .DC. Στα αποτελέσματα μπορεί να περιλαμβάνονται ο θόρυβος, η παραμόρφωση και η ανάλυση δικτύου.

## **Αρχείο εξόδου DC Measurement ανάλυσης**

Το αρχείο *output\_file.ms#* περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της DC Measurement ανάλυσης όταν στο αρχείο εισόδου περιλαμβάνεται η εντολή ελέγχου .MEASURE DC.

## **Αρχείο εξόδου TRANSIENT ανάλυσης**

Στο αρχείο *output\_file.tr#*, περιέχονται τα αριθμητικά αποτελέσματα της TRANSIENT ανάλυσης. Η εντολή ελέγχου .TRAN μαζί με την .OPTION POST δημιουργούν αυτό το αρχείο.

## **Αρχείο εξόδου TRANSIENT Measurement ανάλυσης**

Στο αρχείο *output\_file.mt#*, περιέχονται τα αποτελέσματα της TRANSIENT Measurement ανάλυσης, όταν στο αρχείο εισόδου υπάρχει η εντολή ελέγχου .MEASURE TRAN.

## **Αρχείο εξόδου εγγραφών**

Αυτό το αρχείο πέρα από την κατάληξη .lis μπορεί να έχει οποιαδήποτε άλλη ορίσουμε εμείς όταν τρέχουμε το αρχείο εισόδου από το τερματικό. Περιλαμβάνει το όνομα του προσομοιωτή που χρησιμοποιήθηκε, την έκδοση του HSpice, το τετράγωνο με το μήνυμα της Synopsys, το όνομα του αρχείου εισόδου, το όνομα χρήστη, τις λεπτομέρειες της άδειας χρήσης του προγράμματος, αντίγραφο της netlist του αρχείου εισόδου, τη μέτρηση των κόμβων, τις παραμέτρους του σημείου λειτουργίας, τις πραγματικές τιμές ελέγχου που χρησιμοποίησε το HSpice για τη συγκεκριμένη προσομοίωση, τις



λεπτομέρειες πτώσης τάσης, ρεύματος και ισχύος σε κάθε πηγή και υποκύκλωμα, τα αποτελέσματα της εντολής .PRINT, τα αποτελέσματα της εντολής .OPTION και τον συνολικό χρόνο της CPU.

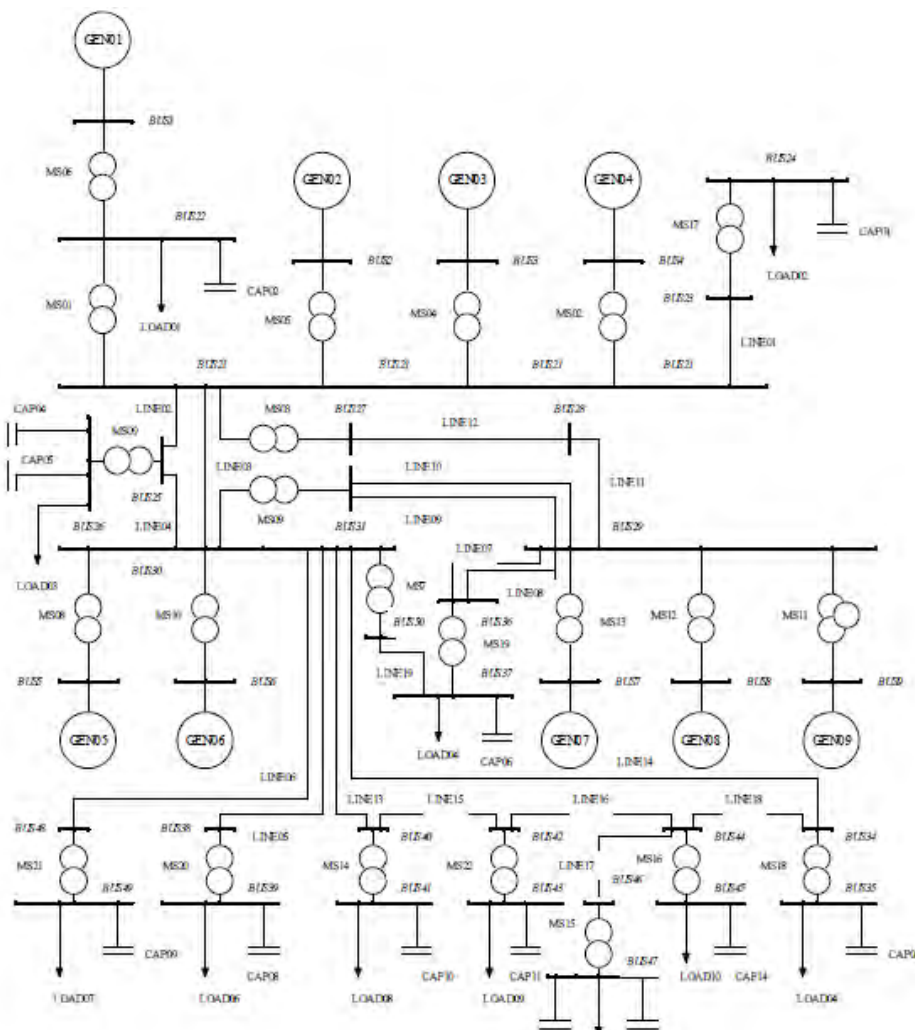
# 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

## Προσομοίωση του Ηλεκτρικού Δικτύου της Κρήτης

### 3.1 Παραδοχές Προσομοίωσης

Για την προσομοίωση του δικτύου υψηλής τάσης της Κρήτης με το HSpice, είναι απαραίτητο να πάρουμε κάποιες παραδοχές. Μερικές από αυτές δίνονται παρακάτω.

Όπως μας δίνεται η τοπολογία του δικτύου της Κρήτης από τη μεταπτυχιακή εργασία του Γεώργιου Ι. Τσεκούρα από το Εθνικό Μετσόβιο



Σχήμα 21: Τοπολογία δικτύου Κρήτης (πρόγραμμα EMTP)

Πολυτεχνείο, περιέχει 9 γεννήτριες, 23 μετασχηματιστές, 19 γραμμές μεταφοράς, 13 πυκνωτές, 11 φορτία και 37 βασικούς ζυγούς. Η τοπολογία φαίνεται στο σχήμα 21.

Στην παρούσα διπλωματική, καθώς το πρόγραμμα HSpice είναι προσομοιωτής ηλεκτρικών κυκλωμάτων και δεν χρησιμοποιείται όπως άλλα προγράμματα για ανάλυση ηλεκτρικών δικτύων, πρέπει κάποια στοιχεία να διευκρινίσουμε πώς τα έχουμε αναπαραστήσει.

Έτσι, για τις γεννήτριες έχουμε το ισοδύναμο κύκλωμα της σύγχρονης μονοφασικής γεννήτριας χωρίς την σύγχρονη αντίδραση της γεννήτριας καθώς δεν έχουμε στοιχεία για τον υπολογισμό της. Δηλαδή, τις παριστάνουμε ως ιδανικές πηγές πραγματικής και άεργης ισχύος σε σειρά με την ωμική αντίσταση.

Στους μετασχηματιστές για την ανάλυση ροών φορτίων, αμελείται η επίδραση του παράλληλου κλάδου. Δηλαδή, χρησιμοποιούμε το απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα του μονοφασικού μετασχηματιστή, το οποίο περιλαμβάνει μόνο τις ωμικές αντιστάσεις και τις αντιδράσεις σκέδασης των τυλιγμάτων. Ένας ακόμη λόγος που αμελούμε τον παράλληλο κλάδο είναι ότι οι μετασχηματιστές έχουν υψηλό λόγο απόδοσης και οι απώλειες που δημιουργούνται από το ρεύμα μαγνήτισης του πυρήνα και το ρεύμα διαρροής του πυρήνα δεν αλλάζουν κατά πολύ τις τιμές του μετασχηματιστή. Έτσι τις τιμές των ρευμάτων αυτών τις θεωρούμε αμελητέες και κατ' επέκταση αγνοούμε και το πηνίο  $B_m$  και την αντίσταση  $G_c$ .

Οι γραμμές μεταφοράς παριστάνονται με το π-ισοδύναμο κύκλωμα, δηλαδή με μια σύνθετη αντίσταση και τη χωρητική αντίδραση να ισοκατανέμεται στα δύο άκρα της γραμμής.

Τα φορτία και τους πυκνωτές τα παριστάνουμε ως ωμικές αντιστάσεις και πυκνωτές αντίστοιχα.

Τέλος, του ζυγούς του αναπαριστάνουμε ως κόμβους πάνω στους οποίους συνδέονται τα διάφορα στοιχεία του δικτύου.

### 3.2 Προσομοίωση – Ανάλυση ροών φορτίου

Για την ανάλυση ροών φορτίου στο δίκτυο μεταφοράς της Κρήτης, υπολογίσαμε την τάση στου ζυγούς του δικτύου, ώστε να συμπεράνουμε τη σωστή λειτουργία του συστήματος. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω.

<b>α/α</b>	<b>Τοποθεσία</b>	<b>Ον. Τάση(kV)</b>	<b>Υπολ. Τάση (kV)</b>
1	Αεριοστρόβιλος 1 Χανιά	6,3	6,3
2	Αερ.. 4 Χανιά	11	10,998
3	Αερ. 5 Χανιά	11	10,998
4	Αερ.6,7& Ατμοστρόβιλος 1 Χανιά	11,5	11,498
5	Ντήζελ 1,2,3,4 Λινοπεράματα	10	9,988
6	Ατμοστρόβιλοι 4,5,6 Λινοπεράματα	6,3	6,3
7	Αερ. 1,2 Λινοπεράματα	6,3	6,3
8	Ατμ. 2,3 Λινοπεράματα	15,7	15,7
9	Ατμ. 1Λινοπεράματα	15,7	15,697
10	Ζυγός Χανίων Υ.Τ	150	10,837
11	Ζυγός Χανίων Μ.Τ.	15,75	7,944
12	Ζυγός Καστελίου Υ.Τ	150	10,152
13	Ζυγός Καστελίου Μ.Τ.	15,75	0,58945
14	Ζυγός Ρεθύμνου Υ.Τ.	150	8,169
15	Ζυγός Ρεθύμνου Μ.Τ.	15,75	0,224239
16	Ζυγός Χανίων 66kV	66	9,559
17	Ζυγός ενδιάμεσος Χανίων-Λινοπεραμάτων	66	8,668
18	Λινοπεράματα Β	66	7,663
19	Λινοπεράματα Α	150	7,066
20	Ζυγός ενδιάμεσος Λινοπεράματα Α&Β	66	7,661
21	Μοίρες Υ.Τ.	150	6,385
22	Μοίρες Μ.Τ.	15,75	0,0033
23	Ηράκλειο Ι Υ.Τ.	66	7,208
24	Ηράκλειο Ι Μ.Τ.	15,75	1,465
25	Ηράκλειο ΙΙ Υ.Τ.	150	6,713
26	Ηράκλειο ΙΙ Μ.Τ.	15,75	0,227
27	Σταλίδα Υ.Τ.	150	5,607

28	Σταλίδα Μ.Τ.	15,75	0,184
29	Άγιος Νικόλαος Υ.Τ.	150	5,042
30	Άγιος Νικόλαος Μ.Τ.	21	0,296
31	Ιεράπετρα Υ.Τ.	150	4,961
32	Ιεράπετρα Μ.Τ.	15,75	0,230
33	Σητεία Υ.Τ.	150	4,526
34	Σητεία Μ.Τ.	15,75	0,212
35	Ηράκλειο Π** Υ.Τ.	150	6,713
36	Ηράκλειο Π** Μ.Τ.	15,75	0,227
37	Ζυγός ενδιάμεσος Λινοπεράματα Α- Ηράκλειο Ι	15,75	1,499

Δεν υπάρχει πρόβλημα με το συγκεκριμένο σενάριο καθώς οι τάσεις των ζυγών δεν ξεπερνούν τις ονομαστικές τιμές τους.

Στη συνέχεια πρέπει να προσδιορίσουμε τη μεταφερόμενη ισχύ στις γραμμές μεταφοράς του κυκλώματος, ώστε σε περίπτωση υπερφόρτωσης θα χρειαστούν επιπλέον γραμμές για να μοιραστεί η ισχύς.

Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω.

<b>α/α</b>	<b>Γραμμή Μεταφοράς</b>	<b>Υπολ. Ισχύς (MVA)</b>
1	Καστέλι-Χανιά 2	0,522
2	Χανιά-Ρέθυμνο	1
3	Χανιά-Λινοπεράματα	3
4	Ρέθυμνο-Λινοπεράματα Α	0,478
5	Λινοπεράματα Α-Ηράκλειο Π, γραμμή 1	0,308
6	Λινοπεράματα Α-Ηράκλειο Π, γραμμή 2	0,308
7	Λινοπεράματα Β-Ηράκλειο Ι, γραμμή 1	1
8	Λινοπεράματα Β-Ηράκλειο Ι, γραμμή 2	0,870
9	Λινοπεράματα Α-Λινο/τα Β, γραμμή 1	0,291
10	Λινοπεράματα Α-Λινο/τα Β,	0,107

	γραμμή 2	
11	Λινοπεράματα Β-Χανιά Β, τμήμα 1	0,337
12	Λινοπεράματα Β-Χανιά Β, τμήμα 2	0,381
13	Λινοπεράματα Α-Σταλίδα	0,441
14	Λινοπεράματα Α-Μοίρες	0,236
15	Σταλίδα-Άγιος Νικόλαος	0,211
16	Άγιος Νικόλαος-Ιεράπετρα	0,000039
17	Ιεράπετρα-Σητεία	0,000099
18	Ιεράπετρα-Μοίρες	0,242
19	Λινοπεράματα Α-Ηράκλειο Ι μ.τ.	0,000033

Δεν υπάρχει πρόβλημα καθώς η μέγιστη ισχύς που παρατηρείται είναι τα 3 MVA.

### 3.3 Συμπεράσματα

Βλέπουμε ότι στο σενάριο που χρησιμοποιήσαμε για την προσομοίωση του δικτύου μεταφοράς υψηλής τάσης της νήσου της Κρήτης δεν παράγει κανένα πρόβλημα στην ανάλυση ροών φορτίου.

Τέλος, ως επέκταση της συγκεκριμένης εργασίας θα μπορούσε να γίνει προσομοίωση του δικτύου αναπαριστώντας τους μετασχηματιστές ως τριφασικούς συμπεριλαμβανομένου και του κλάδου μαγνήτισης.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] <http://www.ee.washington.edu/class/cadta/hspice/>
- [2] <http://www.allaboutcircuits.com/>
- [3] <http://www.physics.ntua.gr/~dris/PSpiceshmioseis.pdf>
- [4] <http://www.mie.uth.gr/>
- [5] <http://eclass.opencourses.teicm.gr/>
- [6] <http://web.stanford.edu/>
- [7] <https://www.dei.gr/el>
- [8] <http://www.admie.gr/>
- [9] Παντελής Β. Μαλατέστας, «Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας», Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα 2013
- [10] Τσεκούρας Ι. Γεώργιος, «Μοντελοποίηση δικτύου υψηλής τάσης νήσου Κρήτης για τη μελέτη ταχέων ηλεκτρομαγνητικών μεταβατικών φαινομένων», ΕΜΠ, Αθήνα 2000
- [11] Ξιφαράς Μ. Ιωάννης, «Αξιολόγηση Κυκλωματικών Μοντέλων για την Προσομοίωση του Ηλεκτρικού Δικτύου», Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος 2014
- [12] Ντερέκας Αλέξιος-Σεραφείμ, «Προσομοίωση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με το πρόγραμμα InterPSS», Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2014
- [13] Βασιλοκωνσταντάκης Ηρακλής και Ξενικάκης Στέφανος, «Προσομοίωση λειτουργίας ηλεκτρικού συστήματος Κρήτης», Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Χανιά
- [14] Φάμπιου Σ. Ιωάννα, «Βέλτιστη Ροή Ισχύος σε Δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας Ενεργειακούς Διανομείς», ΕΜΠ, Αθήνα 2008
- [15] Ιωαννής Γεώργιος, «Παράλληλη λειτουργία τριφασικών μετασχηματιστών», Τ.Ε.Ι. Πειραιά
- [16] Δαμπάνης Γεώργιος, «Υπολογισμός και μελέτη παραμέτρων και απωλειών σύγχρονης μηχανής με τη χρήση μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων», Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2009
- [17] Synopsys, «HSPICE® User Guide: Basic Simulation and Analysis», California, June 2015

[18] Synopsys, «HSPICE® User Guide: Reference Manual: Commands and Control Options», California, June 2015



