



Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου  
Σχολή Μηχανικών  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών  
Υπολογιστών (ΗΜΜΥ)



**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ & ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ**

**ΟΜΟΠΟΛΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ**

Παναγιώτης Ιωαννίδης AM 7517

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Νικόλαος Σχοινιάς

ΠΑΤΡΑ 2021

## Πρόλογος/Περίληψη

Σκοπός της πτυχικής εργασίας,είναι η μελέτη και Θεωρητικός&Πειραματικός ο υπολογισμός των ομοπολικών αντιστάσεων.Αρχικά,στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται το παροδοσιακό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας.Αναφέρονται τα δομικά στοιχεία του Συστήματος και ο τρόπος ηλεκτρικής παραγωγής σε χώρες του εξωτερικού αλλά και στην Ελλάδα.Στη συνέχεια,στο Κεφάλαιο 2 μιλάμε και αναφέρουμε για της συμμετρικές συνιστώσες,τους ορισμούς τους και τους πίνακες μετασχηματισμού,καθώς και για τους Θεωρητικούς υπολογισμούς στην Υψηλή και Μεσαία Τάση. Τέλος,στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζουμε τις μετρήσεις των συμμετρικών συνιστωσών των ομοπολικών τάσεων και εντάσεων,την έννοια των σύνθετων αντιστάσεων των συμμετρικών συνιστωσών,καθώς και την σημασία των συμμετρικών συνιστωσών.

Μετά το πέρας της τρέχουσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Σχοίνα Νικόλαο για την πολύτιμη καθοδήγηση,την διαρκή υποστήριξη,τις γόνιμες παρατηρήσεις και για τις οξυδερκείς συμβουλές του,καθώς για την συνεισφορά του και την αξιολόγηση του στην διπλωματική εργασία.

---

# Περιεχόμενα

Πρόλογος/Περίληψη

## Κεφάλαιο 1.Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

1.1 Εισαγωγή.....	5
1.2 Παραγωγή, μεταφορά και διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	6
1.3 Το Ελληνικό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	8
1.3.1 Σύστημα Μεταφοράς.....	8
1.3.2 Συνιστώσες Συστήματος.....	8
1.3.3 Διεθνείς Διασυνδέσεις.....	10
1.3.4 Δίκτυο Διανομής.....	13
1.3.5 Ακτινικό Δίκτυο Διανομής.....	13
1.3.6 Βροχοειδές Δίκτυο Διανομής.....	14
1.4 Ενεργειακό Σύστημα και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	15
1.4.1 Ηλεκτροπαραγωγή.....	15
1.4.2 Ηλεκτροπαραγωγή στην Ελλάδα.....	16
1.5 Παραδοσιακό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	17
1.5.1 Μοντέλα παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας-Βασικό πλεονέκτημα της συγκεντρωτικής παραγωγής-Σημαντικά μειονεκτήματα της συγκεντρωτικής παραγωγής.....	18
1.5.2 Διεσπαρμένη παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	21
1.5.3 Πλεονεκτήματα της ΔΠ,Εμπόδια για την διείσδυση της ΔΠ,Περαιτέρω προβλήματα στη διείσδυση ΔΠ από ΑΠΕ&Προϋποθέσεις για την αύξηση της διείσδυσης της ΔΠ.....	23
1.5.4 Εποπτικός Έλεγχος και Απόκτηση Δεδομένων (SCADA).....	29
1.5.5 Προβλήματα ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού.....	33
1.6 Αξιοπιστία ΣΗΕ.....	35

## **Κεφάλαιο 2. Συμμετρικές Συνιστώσες**

2.1 Εισαγωγή.....	37
2.2 Ορισμός συμμετρικών συνιστωσών και πίνακες μετασχηματισμού	39
2.2.1 Ορισμός.....	39
2.2.2 Πίνακες μετασχηματισμού.....	42
2.3 Θεωρητικός Υπολογισμός.....	46
2.3.1 Μέση Τάση.....	46
2.3.2 Υψηλή Τάση.....	51

## **Κεφάλαιο 3. Μέτρηση συμμετρικών συνιστωσών**

3.1 Μέτρηση της ομοπολικής τάσεως και εντάσεως.....	61
3.2 Έννοια συνθέτων αντιστάσεων συμμετρικών συνιστωσών.....	63
3.3 Πειραματικός Υπολογισμός.....	66
3.4 Η Σημασία των συμμετρικών συνιστωσών.....	66

---

# Κεφάλαιο 1:Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

## 1.1:Εισαγωγή

Ο Ηλεκτρισμός εμφανίστηκε κατά την Βιομηχανική Επανάσταση.Αυτή η νέα μορφή ενέργειας άλλαξε ριζικά της συνθήκες παραγωγής,που αντικατέστησε το πετρέλαιο,τον ατμό και άλλες μορφές ενέργεια.Η Ηλεκτρική Ενέργεια παρουσίασε μεγάλη οικονομία,καλύτερη ποιότητα και μικρότερες περιβαλλοντικές ρυπάνσης.Οι ηλεκτροκινητήρες,μικροί και μεγάλη,ανέδειξε μια δυνατότητα να αναπτυχθει μια νέα παραγωγικη δομή στα εργοστάσια.Όταν η Ηλεκτρική Ενέργεια άρχισε να παράγεται και να διανέμεται σε μεγαλύτερες αποστάσεις,η Βιομηχανία και η πόλεις,άλλαξαν ριζικά.

Η παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας ξεκίνησε στα τελη του 19ου αιώνα.Συγκεκριμένα το 1881 λειτούργησε η πρώτη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος ισχύος 746 KW μεταξύ Λονδίνου και Πόρτσμουθ.Τη γεννήτρια τη λειτουργούσαν δύο υδρόμυλοι και η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος βασιζόταν αποκληστικά από τις βροχοπτώσεις.Το επόμενο έτος εγκαταστάθηκε η πρώτη μονάδα παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας στη Στουγάρδη της Γερμανίας αλλά εκείνη η μονάδα παραγωγής παρήγαγε Ηλεκτρικής Ενέργειας μόνο για 30 λάμπες πυρακτώσεως.Το 1885 ξεκίνησε η δημιουργία δικτύων στο Βερολίνο.Το δικαίωμα της εταιρίας να παράγει Ηλεκτρική Ενέργεια αφορούσε την εγκατάσταση δικτύου σε απόσταση 800m από την μονάδα παραγωγής.Το 1880 μεχρι το 1890 υπηρξέ μια δεκαετία ραγδαία ανάπτυξης και εξέλιξης της νέας τεχνολογίας όπου εφευρέτες και κατασκευαστές προσπαθούσαν να επιλύσουν τα προβλήματα που συναντούσαν,να εξελίξουν τις μεθόδους και τις διαδικασίες.

Ο ηλεκτρισμός έφτασε στην Ελλάδα το 1889,όταν ιδιωτική εταιρία κατασκεύασε την πρώτη μονάδα παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας.Την ίδια χρονία άρχισε και η ανάπτυξη ηλεκτροπαραγωγης στην Οθωμανική Αυτοκρατορία όπου το δικαίωμα ηλεκτροδότησης της οθωμανικής,τότε,Θεσσαλονίκης το ανέλαβε η Βελγική Εταιρεία.

Μέχρι το 1929 είχαν ηλεκτροδοτηθεί 250 πόλεις με πληθυσμό άνω τον πέντε χιλιάδων κατοίκων αλλά υπήρχαν πολλές απομακρυσμές και αραιοκατοικημένες περιοχές όπου δεν συμφερε τις μεγάλες εταιρίες.Γί αυτό τον λόγο την ηλεκτροδότηση ανέλαβαν ιδιώτες ή δημοτικές και κοινοτικές αρχές κατασκευάζοντας μικρά εργοστάσια.Μέχρι το 1950 υπήρχαν στην Ελλάδα περίπου 400 εταιρίες παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας η οποίες χρησιμοποιούσαν πετρέλαιο και γαιάνθρακα ως πρωτογενή καύσιμα τα

οποία ήταν εισαγόμενα. Είναι λογικό να σκεφτεί κανείς ότι με τόσο παραγωγή σε πολλές μικρές μονάδες, σε συνδιασμο με τα εισαγόμενα καύσιμα, ώθούσε την τιμή του ρεύματος στα ύψη, ξεπερνώντας τις τιμές ισχύος σε άλλες ευρωπαϊκές χώρες από τριπλάσιες μέχρι πενταπλάσιες τιμές.

Το 1950 ιδρύθηκε η ΔΕΗ και οι δραστηριότητες παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της Ηλεκτρικής Ενέργειας συγκεντρώθηκαν σε ένα φορέα. Αμέσως, η ΔΕΗ ξεκίνησε την αξιοποίηση των ενχώριων πηγών ενέργειας και ταυτόχρονα ξεκίνησε την ενόπιση των δικτύων μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας σε ένα εθνικό διασυνδεδεμένο Σύστημα. Οι βασικές δομές αυτού του Συστήματος διατηρούνται μέχρι και σήμερα παρα της σημαντικές αλλαγές που έχουν συμβεί τα τελευταία χρόνια.

## 1.2: Παραγωγή, μεταφορά και διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Σύστημα Ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) είναι το σύστημα των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ΗΕ σε περιοχές εξυπηρέτησης. Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός ΣΗΕ είναι να παρέχει ΗΕ οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή τάση, σταθερή συχνότητα και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.

Δεδομένου ότι η εξυπηρέτηση των αναγκών σε ΗΕ μεγάλων ομάδων χρηστών προϋποθέτει τις διακριτές φάσεις της παραγωγής, της μεταφοράς και της διανομής, σε ένα σύστημα ΗΕ περιλαμβάνονται τα επιμέρους συστήματα:

- Το σύστημα παραγωγής

Περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος και τους μετασχηματιστές ανύψωσης της τάσης για τη μεταφορά του ρεύματος υπό υπερυψηλή και ΥΤ. Η σύγχρονη βιομηχανία ΗΕ έχει βασισθεί στη μετατροπή σε ΗΕ της θερμικής ενέργειας των ορυκτών καυσίμων και της μηχανικής ενέργειας των υδάτινων ροών και των υδατοπτώσεων, μέσω θερμικών και υδροηλεκτρικών σταθμών, αντίστοιχα.

- Το σύστημα μεταφοράς

Διασυνδέει όλους τους μεγάλους σταθμούς παραγωγής καθώς και διαφορετικά συστήματα μεταξύ τους και μεταφέρει μεγάλα μεγέθη ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις προς τα κέντρα κατανάλωσης. Αποτελεί τη σπονδυλική στήλη του συστήματος ΗΕ και λειτουργεί στα μέγιστα δυνατά επίπεδα τάσης.

---

Περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών ΥΥΤ και ΥΤ, τους υποσταθμούς ζεύξης των δικτύων αυτών και τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων επιπέδων τάσης που χρησιμοποιούνται.

- Το σύστημα υπομεταφοράς

Μεταφέρει ισχύ σε μικρότερα μεγέθη και αποστάσεις υπό χαμηλότερη τάση από υποσταθμούς μεταφοράς σε υποσταθμούς διανομής μικρότερων κέντρων κατανάλωσης. Σημειώνεται ότι οι μεγάλοι βιομηχανικοί καταναλωτές τροφοδοτούνται συνήθως απευθείας από το σύστημα υπομεταφοράς. Όσο το σύστημα ΗΕ επεκτείνεται και δημιουργείται αναγκαιότητα για μεταφορά υπό υψηλότερα επίπεδα τάσης, οι παλαιότερες ΓΜ μεταβαίνουν σε λειτουργία υπό χαμηλότερα επίπεδα τάσης, καθιστώντας σχετικά δύσκολη τη διάκριση μεταξύ δικτύων υπομεταφοράς και μεταφοράς.

- Το σύστημα διανομής

Περιλαμβάνει τα δίκτυα διανομής ΗΕ ΜΤ και ΧΤ, στα οποία υπάγονται και οι Υ/Σ διανομής μέσω των οποίων η ΜΤ υποβιβάζεται σε ΧΤ. Μέσω των δικτύων διανομής η ΗΕ διανέμεται σε μικρότερες περιοχές στους καταναλωτές ΜΤ και ΧΤ. Ένα σύστημα παραγωγής και μεταφοράς μπορεί να λειτουργεί απομονωμένο ή διασυνδεδεμένο με ένα ή περισσότερα γειτονικά συστήματα. Η διασύνδεση γίνεται συνήθως σε επίπεδο εθνικών συστημάτων και προσφέρει τεχνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα.

Τα τρία βασικά και γενικής εφαρμογής μεγέθη επί των οποίων βασίζεται η σχεδίαση και η επίδοση ενός ηλεκτρικού δικτύου είναι:

- Η τάση του δικτύου

Η μέγιστη τάση λειτουργίας των ηλεκτρικών γραμμών.

- Η ισχύς βραχυκύκλωσης του δικτύου

Είναι η συμβατική ισχύς που αντιστοιχεί στη μέγιστη ισχύ που αποδίδεται στο δίκτυο σε περίπτωση τριφασικού βραχυκυκλώματος σε κάποιο σημείο του.

- Η στάθμη μόνωσης του δικτύου

Αναφέρεται συνήθως στην τιμή της κρουστικής αντοχής του δικτύου, δηλαδή της διηλεκτρικής αντοχής της μόνωσης του εξοπλισμού των υποσταθμών σε κρουστικές υπερτάσεις τυποποιημένης μορφής.

## 1.3: Το Ελληνικό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

### 1.3.1: Σύστημα Μεταφοράς

Ο όρος Σύστημα Μεταφοράς περιγράφει το Διασυνδεδεμένο Σύστημα του ηπειρωτικού τμήματος της Ελλάδας και των διασυνδεδεμένων με αυτό νησιών στα επίπεδα ΥΤ (150kV και 66kV) και ΥΥΤ τάσης (400kV). Τη σπονδυλική στήλη του Διασυνδεδεμένου ΣΜ αποτελούν οι τρεις γραμμές διπλού κυκλώματος των 400 kV, οι οποίες μεταφέρουν ΗΕ, κυρίως από το σπουδαιότερο ενεργειακό κέντρο παραγωγής, αυτό της Δυτικής Μακεδονίας. Στη περιοχή αυτή, παράγεται περίπου το 70% της συνολικής παραγωγής της χώρας, η οποία στη συνέχεια μεταφέρεται στα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης της Κεντρικής και Νότιας Ελλάδας, όπου καταναλώνεται περίπου το 65% της ΗΕ. Το πρόβλημα της μεγάλης γεωγραφικής ανισοκατανομής μεταξύ παραγωγής (Βορράς) και φορτίων (Νότος), που ήταν ιδιαίτερα σημαντικό κατά το παρελθόν ιδίως κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, έχει μετριασθεί, λόγω της ένταξης νέων μονάδων παραγωγής στο Νότιο Σύστημα, της ένταξης πυκνωτών αντιστάθμισης και της μείωσης των φορτίων. Εντούτοις, οι περιοχές της Αττικής και της Πελοποννήσου παραμένουν οι πλέον κρίσιμες περιοχές του Συστήματος από πλευράς ευστάθειας τάσης.

### 1.3.2: Συνιστώσες Συστήματος

Στη συνέχεια, γίνεται συνοπτική παρουσίαση των κυριότερων συνιστωσών του υφιστάμενου Συστήματος κατά κατηγορία (Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ, ΚΥΤ, ΓΜ).

- Υποσταθμοί 150 kV/ΜΤ

Μέχρι το τέλος του 2012 στο Σύστημα ήταν συνδεδεμένοι :

- 205 Υ/Σ υποβιβασμού 150kV/ΜΤ της ΔΕΗ ΑΕ, εκ των οποίων :

- 1).186 εξυπηρετούν τις ανάγκες των πελατών του ΔΔ. Οι Υ/Σ αυτοί περιλαμβάνουν τμήματα η διαχείριση των οποίων είναι στην αρμοδιότητα του ΑΔΜΗΕ. Στους ανωτέρω Υ/Σ περιλαμβάνονται 20 Υ/Σ, στους οποίους είναι επίσης συνδεδεμένοι και Μ/Σ ανύψωσης 16 συμβατικών σταθμών παραγωγής και 4 σταθμών ΑΠΕ, καθώς και 14 Υ/Σ συνδεδεμένοι στην πλευρά 150 kV των ΚΥΤ.
  - 2).14 Υ/Σ εξυπηρετούν τις ανάγκες του ΔΔ στην Αττική και ανήκουν εξ ολοκλήρου στην αρμοδιότητα του ΔΕΔΔΗΕ.
  - 3).4 Υ/Σ χρησιμοποιούνται για την τροφοδότηση των φορτίων Ορυχείων. Ανάγκες ορυχείων εξυπηρετεί και ο Υ/Σ Πτολεμαΐδας Ι, ο οποίος συμπεριλαμβάνεται στους 186 που εξυπηρετούν και ανάγκες Διανομής. Ένας Υ/Σ (Αντλιοστάσιο Πολυφύτου) εξυπηρετεί ανάγκες άντλησης για τον ΥΗΣ Πολυφύτου.
-



- 36 Υ/Σ για την ενσωμάτωση της ισχύος μονάδων ΑΠΕ, εκ των οποίων οι Υ/Σ Καρύστου, Λιβαδίου και Αργυρού εξυπηρετούν παράλληλα και φορτία Διανομής (συμπεριλαμβάνονται στους προαναφερθέντες 205 Υ/Σ υποβιβασμού).

- Υ/Σ ανύψωσης ΜΤ/150kV σε Σταθμούς Παραγωγής της ΔΕΗ ΑΕ:

- 1). 7 Θερμοηλεκτρικοί Σταθμοί.

- 2). 15 Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί.

- 3). Μικροί Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί

- Υ/Σ ανύψωσης σε Σταθμούς Παραγωγής ανεξάρτητων Παραγωγών. Οι μονάδες παραγωγής των συγκεκριμένων σταθμών συνδέονται στα 150 kV μέσω Μ/Σ ανύψωσης ΜΤ/150kV.

- 38 Υ/Σ υποβιβασμού 150kV/ΜΤ που εξυπηρετούν τις εγκαταστάσεις Πελατών ΥΤ.

Στο Σύστημα δεν περιλαμβάνονται τα ανεξάρτητα Συστήματα Μεταφοράς των νησιών (Κρήτη, Ρόδος, Λέσβος, Σάμος), η σχεδίαση και η ανάπτυξη των οποίων είναι στην αρμοδιότητα του Διαχειριστή Δικτύου.

- Κέντρα Υπερυψηλής Τάσης (ΚΥΤ)

Τα ΚΥΤ αποτελούν τα σημεία σύνδεσης των Συστημάτων 400kV και 150kV και εξυπηρετούν ανάγκες απομάστευσης ισχύος από το Σύστημα 400 kV προς το Σύστημα 150 kV. Πρόκειται για 13 ΚΥΤ που περιλαμβάνουν ένα ή περισσότερους αυτομετασχηματιστές (ΑΜ/Σ) τριών τυλιγμάτων 400kV/150kV/30kV. Επιπλέον, υπάρχουν και άλλα 9 ΚΥΤ που δεν συμπεριλαμβάνονται στα προαναφερθέντα 13, εγκατεστημένα κοντά σε ομώνυμους σταθμούς παραγωγής και εξυπηρετούν παράλληλα ή αποκλειστικά ανάγκες ανύψωσης τάσης από τις μονάδες παραγωγής προς το Σύστημα 400kV.

- Γραμμές Μεταφοράς (ΓΜ)

Στο Σύστημα υπάρχουν ΓΜ υψηλής (66 και 150 kV) και υπερυψηλής (400 kV) τάσης διαφόρων ειδών και τύπων. Επιπλέον, είναι εγκατεστημένα υπόγεια καλώδια 150 kV για τη μεταφορά ισχύος εντός των πυκνοκατοικημένων περιοχών της Πρωτεύουσας, τα οποία ανήκουν στο Δίκτυο 150 kV. Τα σχετικά χιλιομετρικά στοιχεία παρέχονται στον Πίνακα 1.1

	400kv	Σ.Π. 400kv	150kv	66kv	ΣΥΝΟΛΟ
ΕΝΑΕΡΙΕΣ	2.628	107	8.127	39	10.901
ΥΠΟΒΡΥΧΙΕΣ		160	140	15	315
ΥΠΟΓΕΙΕΣ	4		82	1	87
ΣΥΝΟΛΟ	2.632	267	8.349	55	11.303

Πίνακας:Χιλιομετρικά στοιχεία των ΓΜ ΥΤ ανά κατηγορία



Γραμμές ΥΤ και Υποσταθμός Μεταφοράς ΥΤ

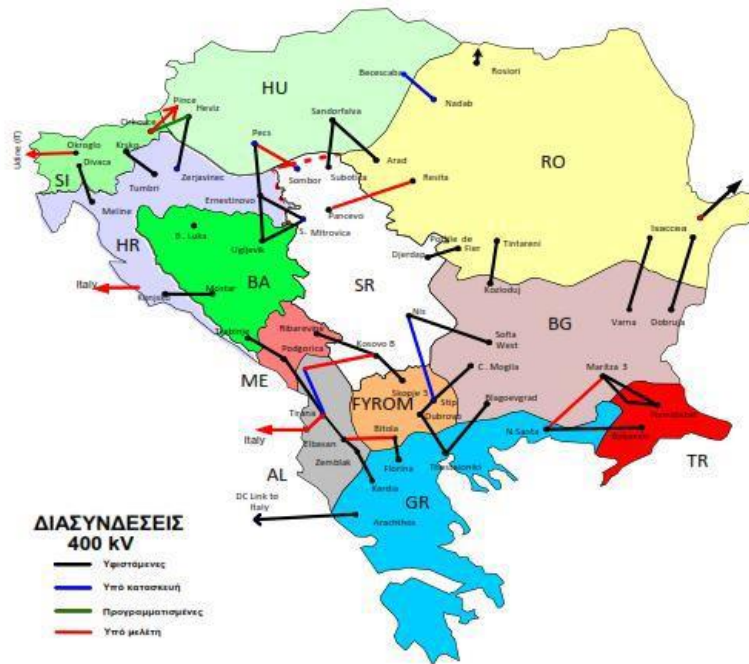
- Συσκευές Αντιστάθμισης Αέργου Ισχύος

Οι ανάγκες για αντιστάθμιση αέργου ισχύος καλύπτονται με την εγκατάσταση στατών πυκνωτών και πηνίων αντισταθμιστών. Συγκεκριμένα, για την τοπική σταθεροποίηση των τάσεων της Υ/Σ 150kV/ΜΤ, χρησιμοποιούνται στατοί πυκνωτές που εγκαθίστανται κυρίως σε ζυγούς ΜΤ των Υποσταθμών (συνολικής ισχύος περίπου 4150 ΜVAr). Επιπλέον, έχουν εγκατασταθεί συστοιχίες πυκνωτών 150kV, συνολικής ισχύος 450 ΜVAr, σε Υ/Σ και ΚΥΤ του Συστήματος. Ακόμα, έχουν εγκατασταθεί πηνία στην πλευρά των 150kV σε Υποσταθμούς 150kV/ΜΤ (σε εκείνους όπου συνδέονται υποβρύχια καλώδια), καθώς και στο τριτεύον τύλιγμα (πλευρά 30 kV) των ΑΜ/Σ των ΚΥΤ για την αντιμετώπιση προβλημάτων εμφάνισης υψηλών τάσεων κατά τις ώρες χαμηλού φορτίου.

### 1.3.3: Διεθνείς Διασυνδέσεις

Από τον Οκτώβριο του 2004 το Ελληνικό Σύστημα λειτουργεί σύγχρονα και παράλληλα με το διασυνδεδεμένο Ευρωπαϊκό Σύστημα υπό το γενικότερο συντονισμό του ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity), ο οποίος αποτελεί διάδοχο και ευρύτερο σχήμα της UCTE (Union pour la Coordination du Transport de l' Electricité). Η παράλληλη λειτουργία του Ελληνικού Συστήματος με το Ευρωπαϊκό επιτυγχάνεται μέσω διασυνδεδετικών ΓΜ, κυρίως 400 kV, με τα Συστήματα της Αλβανίας, της

Βουλγαρίας και της ΠΓΔΜ (FYROM). Επιπλέον, το Ελληνικό Σύστημα συνδέεται ασύγχρονα (μέσω υποβρύχιας σύνδεσης συνεχούς ρεύματος) με την Ιταλία. Από την 18 Σεπτεμβρίου 2010, το Ελληνικό Σύστημα έχει συνδεθεί και με το Σύστημα της Τουρκίας, το οποίο με τη σειρά του έχει συνδεθεί με το Σύστημα της Βουλγαρίας. Το Σύστημα της Τουρκίας είναι έκτοτε σε δοκιμαστική παράλληλη λειτουργία με το Ευρωπαϊκό. Οι δοκιμές εκτελούνται υπό την αιγίδα του ENTSO-E.



Σχηματικό διάγραμμα των διασυνδεδεμένων Συστημάτων της Βαλκανικής

- Ελλάδα - ΠΓΔΜ

Η Ελλάδα συνδέεται με το Σύστημα της ΠΓΔΜ μέσω μιας ΓΜ 400 kV απλού κυκλώματος με δίδυμο αγωγό, μεταξύ ΚΥΤ Θεσσαλονίκης και Dubrovno στην ΠΓΔΜ και μιας ΓΜ 400 kV απλού κυκλώματος με δίδυμο αγωγό, μεταξύ ΚΥΤ Μελίτης και Bitola στην ΠΓΔΜ.

- Ελλάδα – Αλβανία

Με το Αλβανικό Σύστημα η Ελλάδα συνδέεται μέσω μιας ΓΜ 400 kV απλού κυκλώματος με δίδυμο αγωγό, μεταξύ ΚΥΤ Καρδιάς και Zemblak (Αλβανία) και μιας ΓΜ 150 kV ελαφρού τύπου μεταξύ Υ/Σ Μούρτου και ΥΗΣ Bistrica στην Αλβανία, ονομαστικής ικανότητας μεταφοράς 100 MW περίπου.

- Ελλάδα – Βουλγαρία

Με το Βουλγαρικό Σύστημα η Ελλάδα συνδέεται μέσω ΓΜ 400 kV (αναρτημένη σε πυλώνες τύπου Β'Β', δηλαδή πυλώνες απλού κυκλώματος υπερβαρέως τύπου, με δίδυμους αγωγούς ανά φάση, διατομής 936 κυκλικών χιλιοστών), μεταξύ ΚΥΤ Θεσσαλονίκης και Blagoevgrad στην Βουλγαρία.

- Ελλάδα – Ιταλία

Η διασύνδεση αυτή συνδέει το ΚΥΤ Αράχθου με τον Υ/Σ Galatina στην Ιταλία. Είναι σύνδεση συνεχούς ρεύματος και περιλαμβάνει:

- 1).σταθμούς μετατροπής ΥΤΣΡ (HVDC) 400 kV ικανότητας 500 MW
- 2).τμήματα εναερίων ΓΜ DC μήκους 45 km επί Ιταλικού εδάφους και 107 km επί ελληνικού εδάφους
- 3).τμήμα υπογείου καλωδίου DC μήκους 4 km επί Ιταλικού εδάφους
- 4).ένα υποβρύχιο καλώδιο DC 400 kV ισχύος 500 MW και μήκους 160 km

- Ελλάδα – Τουρκία

Από το καλοκαίρι του 2008 έχει ολοκληρωθεί η κατασκευή της ΓΜ 400 kV ΚΥΤ Φιλίππων – ΚΥΤ Ν. Σάντας – Babaeski (Τουρκία). Η ΓΜ αυτή είναι διπλού κυκλώματος ( αναρτημένη σε πυλώνες τύπου 2Β'Β', δηλαδή πυλώνες διπλού κυκλώματος υπερβαρέως τύπου, με δίδυμους αγωγούς ανά φάση, διατομής 936 κυκλικών χιλιοστών) στο τμήμα ΚΥΤ Φιλίππων – Ν. Σάντα και απλού κυκλώματος (αναρτημένη σε πυλώνες τύπου Β'Β'Β'', δηλαδή απλού κυκλώματος υπερβαρέως τύπου, με τρίδυμους αγωγούς ανά φάση, διατομής 936 κυκλικών χιλιοστών) στο τμήμα Ν. Σάντα - Babaeski. Στις 18 Σεπτεμβρίου 2010 πραγματοποιήθηκε η έναρξη δοκιμαστικής σύγχρονης και παράλληλης λειτουργίας του Συστήματος της Τουρκίας με το σύγχρονο Ευρωπαϊκό διασυνδεδεμένο Σύστημα μέσω της προαναφερθείσας ΓΜ (Ν. Σάντα – Babaeski), καθώς και με δύο υφιστάμενες ΓΜ 400 kV από τη Βουλγαρία. Έκτοτε η διασύνδεση του Συστήματος της Τουρκίας με το Ευρωπαϊκό Σύστημα παραμένει σε δοκιμαστική λειτουργία, με σκοπό να επιβεβαιωθεί ότι η λειτουργία του Συστήματος της Τουρκίας δεν έχει αρνητικές επιπτώσεις στη λειτουργία, τόσο των Συστημάτων των γειτονικών χωρών, όσο και του Ευρωπαϊκού διασυνδεδεμένου Συστήματος γενικότερα.

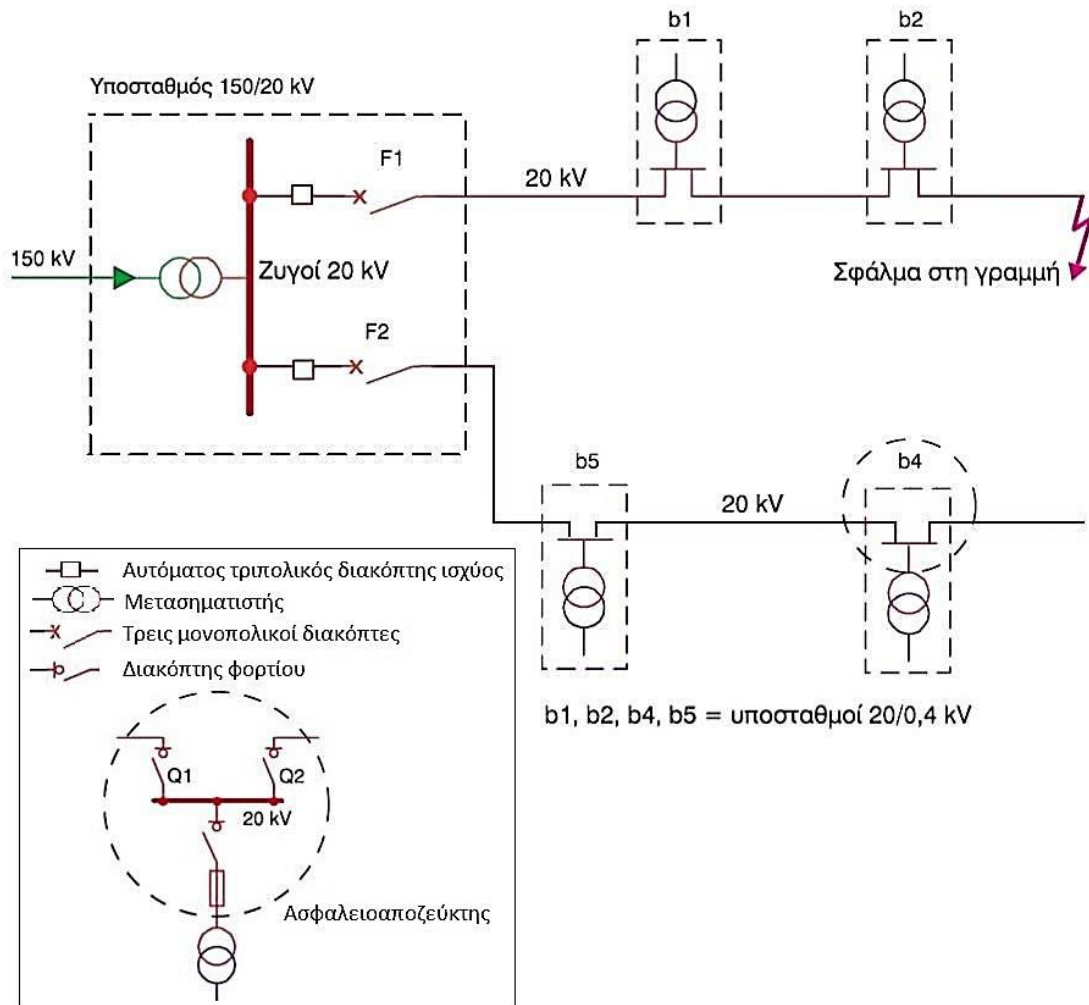
---

### 1.3.4: Δίκτυο Διανομής

Το ΔΔ ΗΕ περιλαμβάνει το δίκτυο ΜΤ και ΧΤ από τα κέντρα ΚΥΤ μέχρι τον τελικό καταναλωτή. Το δίκτυο περιλαμβάνει τους Υ/Σ ΜΤ των 20 kV/0,4 kV, τις εναέριες γραμμές, τα καλώδια ΜΤ και ΧΤ και το σχετικό εξοπλισμό προστασίας και ελέγχου. Στο ΔΔ συνδέονται οι καταναλωτές ΜΤ (στα 20 kV) και οι καταναλωτές ΧΤ (400V-230V). Γενικά, τα συστήματα διανομής ΜΤ διακρίνονται στις εξής δύο βασικές κατηγορίες, με κριτήριο διαχωρισμού τη δομή τους ή τον τρόπο αξιοποίησής τους.

### 1.3.5: Ακτινικό Δίκτυο Διανομής

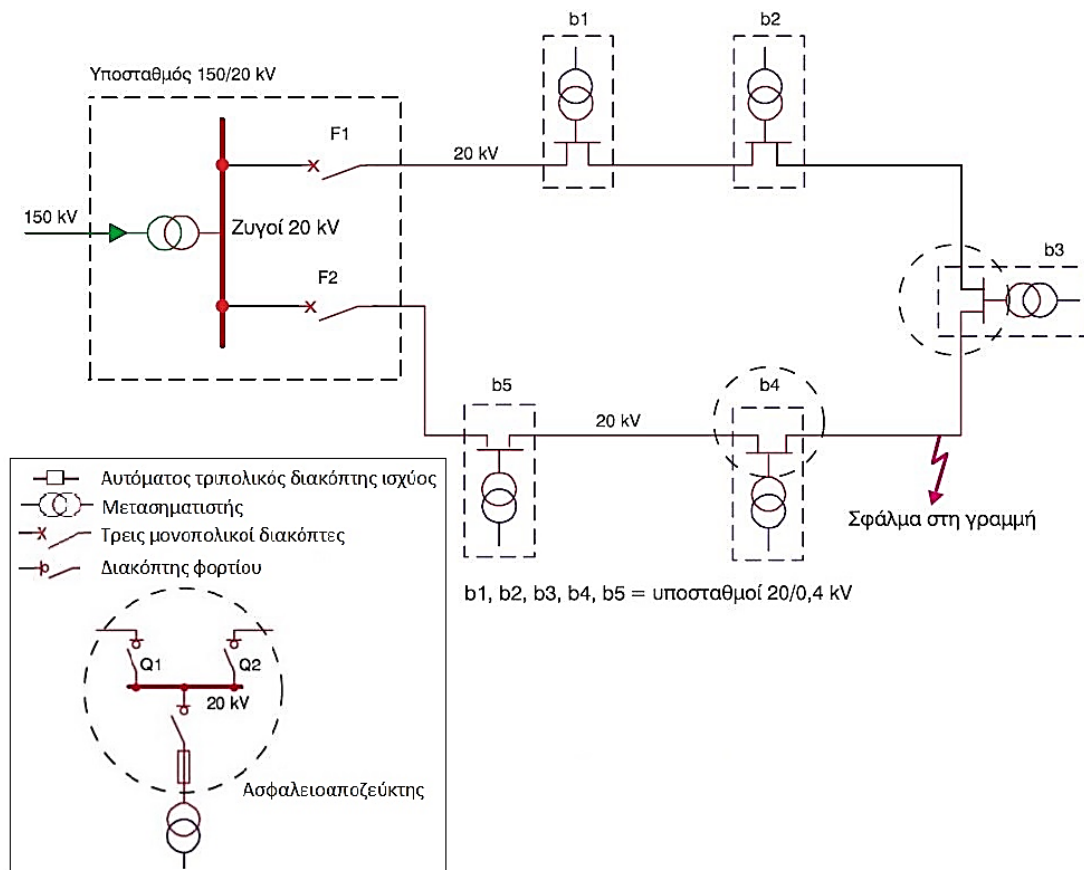
Στα ακτινικά ΔΔ οι γραμμές των 20kV (συνήθως εναέριες) αναχωρούν από τον κεντρικό Υ/Σ 150/20 kV και αναπτύσσονται ακτινικά (Σχήμα 1.3). Κατά μήκος κάθε γραμμής συνδέονται Μ/Σ 20/0.4 kV των δικτύων ΧΤ ή καταναλωτές ΜΤ. Βασικό μειονέκτημα των ακτινικών ΔΔ είναι ότι σε περίπτωση σφάλματος κατά μήκος της γραμμής, ο διακόπτης ισχύος F1 (Σχήμα 1.3) που υπάρχει στην αρχή της γραμμής ανοίγει με αποτέλεσμα όλοι οι Μ/Σ που βρίσκονται κατά μήκος της γραμμής να μείνουν χωρίς τάση. Σε περίπτωση εγκαταστάσεων με ηλεκτρικά φορτία που δεν πρέπει να μείνουν πολύ χρόνο εκτός λειτουργίας (π.χ. νοσοκομεία, στρατιωτικές εγκαταστάσεις, ψυγεία κ.λπ.) η απώλεια της ΜΤ αντιμετωπίζεται με την ύπαρξη ενός τοπικού ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους (π.χ. ντιζελογεννήτρια 400V), μέχρι την αποκατάσταση του σφάλματος. Τα ακτινικά ΔΔ δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα στη ΜΤ. Αντίθετα, στη ΧΤ το σύνολο των δικτύων είναι ακτινικού τύπου.



Ακτινικό ΔΔ

### 1.3.6: Βροχοειδές Δίκτυο Διανομής

Στα βροχοειδή ΔΔ οι γραμμές των 20 kV (εναέριες ή υπόγεια καλώδια) που αναχωρούν από τον κεντρικό Υ/Σ 150/20 kV, σχηματίζουν ένα κλειστό βρόχο που ξανακαταλήγει σε ζυγούς των 20 kV του ίδιου ή διαφορετικού Υ/Σ 150/20 kV. Κατά μήκος του βρόχου συνδέονται οι καταναλωτές b1, b2, b3, b4, b5. Ο βρόχος προστατεύεται στις δύο άκρες του με διακόπτες ισχύος F1, F2. Σε περίπτωση σφάλματος σε κάποιο σημείο του βρόχου, π.χ. στο τμήμα b3, b4, λειτουργούν οι προστασίες των διακοπών F1, F2, οι διακόπτες ανοίγουν και ο βρόχος μένει χωρίς τάση. Αφού εντοπιστεί η θέση του σφάλματος, ανοίγουν κατόπιν εντολής οι διακόπτες φορτίων Q1 στο b3 και Q2 στο b4 και απομονώνεται το τμήμα b3, b4. Έπειτα ξανακλείνουν οι διακόπτες F1, F2 και επανέρχεται η ΜΤ στο δίκτυο. Το βροχοειδές δίκτυο λειτουργεί ως δυο ακτινικά δίκτυα μέχρι την αποκατάσταση του σφάλματος.



### Βροχοειδές ΔΔ

Τα ποσοτικά μεγέθη του ελληνικού ΔΔ στο τέλος του 2013 είναι τα εξής:

- 109.700 χλμ. Δίκτυο ΜΤ (ΜΤ).
- 123.300 χλμ. Δίκτυο ΧΤ (ΧΤ).

Συνολικά 233.000 χλμ. Δικτύου.

- 160.000 Υ/Σ ΜΤ προς ΧΤ (Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ).
- 7.392.722 Πελάτες (10.147 ΜΤ & 7.493.118 ΧΤ).

## 1.4: Ενεργειακό Σύστημα και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

### 1.4.1: Ηλεκτροπαραγωγή

Η παραγωγή ΗΕ επιτυγχάνεται με αξιοποίηση διαφόρων πρωτογενών πηγών ενέργειας εμφανίζοντας μεγάλες διαφοροποιήσεις από χώρα σε χώρα, αντίστοιχα με τους διαθέσιμους εγχώριους Ενεργειακούς Πόρους και την Ενεργειακή Πολιτική μιας χώρας, τις γεωλογικές, γεωφυσικές και κλιματικές ιδιαιτερότητες αυτής. Η παραγωγή ΗΕ βασίζεται:

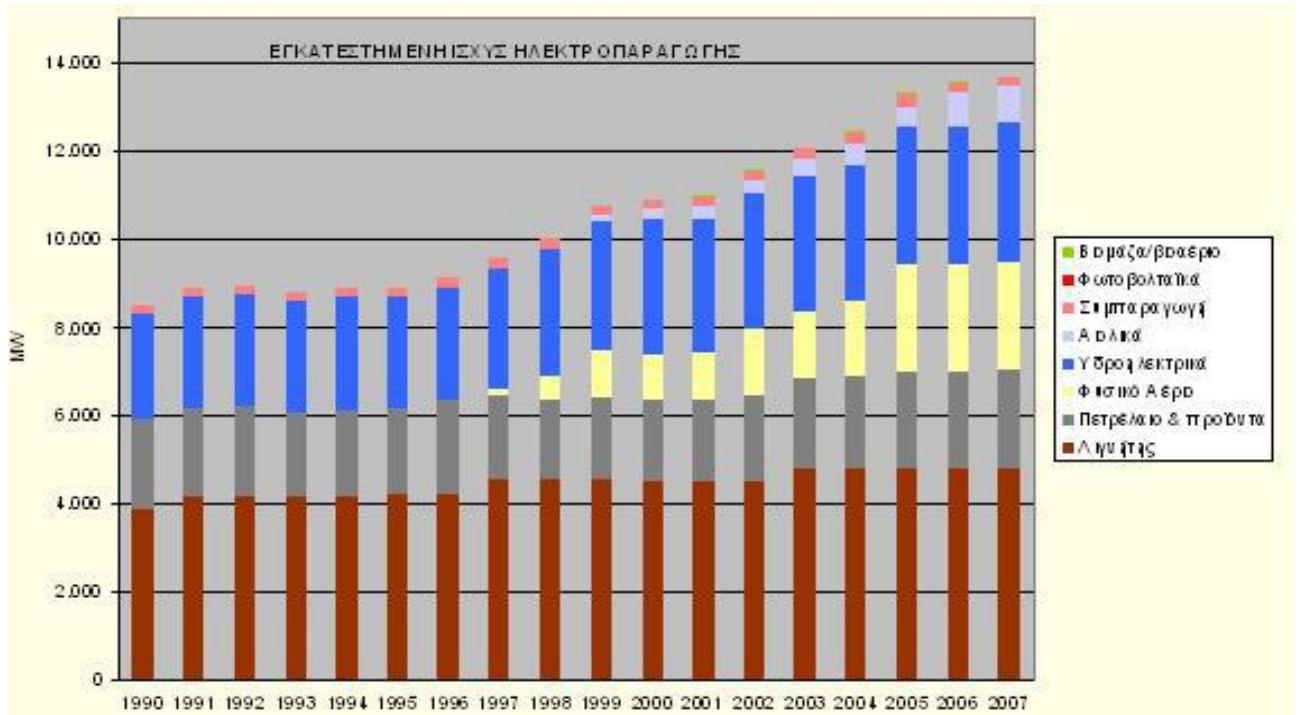
- Σε συμβατικές πηγές όπως ορυκτά στερεά (λιθάνθρακας και λιγνίτης), υγρά (πετρέλαιο) ή αέρια καύσιμα (φυσικό αέριο), τα οποία έχουν σχηματισθεί σε παλαιότερες γεωλογικές περιόδους και βρίσκονται στο υπέδαφος, σε μικρά ή μεγάλα βάθη σε πεπερασμένες, μη ανανεώσιμες ποσότητες.
- στην πυρηνική ενέργεια
- σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) που αξιοποιούν τις ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και όχι τα περιορισμένα ενεργειακά ορυκτά αποθέματα. Η ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ηλιακή ακτινοβολία και διάφορα φυσικά φαινόμενα όπως ο αέρας και η παλίρροια και, κατά συνέπεια, εξαρτάται από την περιοδικότητα ή τη στοχαστικότητα αυτών των φαινομένων.

#### 1.4.2: Ηλεκτροπαραγωγή στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, με βάση το γράφημα της εξέλιξης της εγκατεστημένης ηλεκτροπαραγωγής ισχύος έως το 2007, προκύπτουν τα εξής:

- Το μεγαλύτερο ποσοστό της εγκατεστημένης ηλεκτροπαραγωγικής ισχύος είναι βασισμένο στο λιγνίτη, διότι βρίσκεται σε αφθονία σε πολλά κοιτάσματα στην ηπειρωτική Ελλάδα.
  - Το σταθερό και σχετικά υψηλό ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος που βασίζεται στο πετρέλαιο και τα προϊόντα του, κυρίως λόγω του μεγάλου πλήθους των ελληνικών νησιών και των δυσκολιών διασύνδεσής τους με το Διασυνδεδεμένο Σύστημα.
  - Το σταθερό ποσοστό υδροηλεκτρικών εγκατεστημένων μονάδων, οι οποίες απαιτούν τεράστιες περιβαλλοντικές παρεμβάσεις για την κατασκευή φραγμάτων και υδάτινων ταμιευτήρων.
  - Η εμφάνιση και η σταδιακή αύξηση των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με χρήση Φυσικού Αερίου μετά την κατασκευή του αγωγού μεταφοράς του Φυσικού Αερίου στην Ελλάδα.
  - Η συνεχής αύξηση των εγκατεστημένων μονάδων μετατροπής αιολικής και ηλιακής ενέργειας σε ΗΕ που σηματοδοτεί τη νέα εποχή για τη διεύθυνση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή. Απόδειξη της προαναφερθείσας αύξησης αποτελεί το γράφημα της εγκατεστημένης ισχύος των ΑΠΕ για το διάστημα 2012-2013, στο οποίο, αν και η περίοδος είναι μόλις ένα έτος, η εγκατεστημένη ισχύς των ΑΠΕ παρουσιάζει αύξηση της τάξης του 40%, φθάνοντας τα 4237MW. Αναλυτικά, για τον Αύγουστο του 2013 η ισχύς των εγκατεστημένων αιολικών πάρκων έφθασε τα 1520MW, των Φ/Β τα 2363MW και των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών τα 218MW. Τέλος, οι εγκαταστάσεις παραγωγής ΗΕ με καύσιμο τη βιομάζα και το βιοαέριο άγγιξαν τα 46MW και οι μονάδες ΣΗΘΥΑ τα 90MW.
-





Η εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύς στην Ελλάδα από το 1990 έως το 2007

## 1.5: Παραδοσιακό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Τα υπάρχοντα ΣΗΕ έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία 70 χρόνια και τροφοδοτούνται από μεγάλες κεντρικές μονάδες παραγωγής. Η ΗΕ μέσω Μ/Σ διοχετεύεται σε ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο ΥΤ, γνωστό και ως δίκτυο Μεταφοράς. Κάθε ξεχωριστή μονάδα παραγωγής, είτε πρόκειται για υδροηλεκτρικό εργοστάσιο, είτε λιγνιτική μονάδα, είτε πυρηνικό εργοστάσιο, χαρακτηρίζεται από μια μεγάλη εγκατεστημένη ισχύ της τάξης τουλάχιστον του 1GW. Τις περισσότερες φορές το ΣΜ είναι επιφορτισμένο να μεταφέρει τις μεγάλες ποσότητες ΗΕ σε μεγάλες αποστάσεις. Στη συνέχεια η ΗΕ αυτή, μέσω δύο ή τριών σταδίων υποβιβασμού σε μετασχηματιστές των ΔΔ, διοχετεύεται στα δίκτυα των τελικών καταναλωτών.

Το τμήμα της παραγωγής της ΗΕ διαθέτει κατάλληλη τηλεπικοινωνιακή δικτύωση που του εξασφαλίζει αποδοτική λειτουργία, δυνατότητα εφαρμογής των κανόνων της αγοράς, διατήρηση ενός καλού επιπέδου ασφάλειας και, γενικότερα, την ολοκληρωμένη λειτουργία αυτού του τμήματος του Συστήματος. Επίσης διατίθενται συστήματα αυτόματου ελέγχου που εγγυώνται έως ένα βαθμό την εκτίμηση της συμπεριφοράς των μονάδων παραγωγής και του ΣΜ σε καταστάσεις σημαντικών διαταραχών.

Από την άλλη πλευρά, τα ΔΔ είναι ιδιαίτερα εκτεταμένα αλλά σχεδόν απόλυτα παθητικά, με ελάχιστη δυνατότητα επικοινωνίας και με ελάχιστο έλεγχο, και αυτόν τοπικά περιορισμένο. Αν εξαιρεθούν οι περιπτώσεις πολύ

μεγάλων καταναλωτών (όπως οι μεταλλουργίες και τα χυτήρια αλουμινίου), δεν υπάρχει δυνατότητα εποπτείας σε πραγματικό χρόνο του επιπέδου της τάσης ή του ρεύματος ενός φορτίου. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των φορτίων και του ΣΗΕ περιορίζεται στην απλή εξασφάλιση κάλυψης των αναγκών των καταναλωτών σε ΗΕ.

Η λειτουργία του ΣΗΕ που προαναφέρθηκε χαρακτηρίζεται ως μη αποδοτική, ανελαστική και σίγουρα όχι οικονομική. Τα επιμέρους χαρακτηριστικά που είναι υπεύθυνα για αυτή τη λειτουργία θα αναλυθούν ακολούθως.

Η επανάσταση που έχει συντελεστεί στις τεχνολογίες επικοινωνίας, ειδικά όσον αφορά το Διαδίκτυο, παρέχει τη δυνατότητα για πολύ καλύτερη εποπτεία και έλεγχο των συστημάτων ΗΕ καθιστώντας τη λειτουργία τους αποδοτικότερη, οικονομικότερη και περισσότερο ευέλικτη.

### 1.5.1: Μοντέλα παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας-Βασικό πλεονέκτημα της συγκεντρωτικής παραγωγής-Σημαντικά μειονεκτήματα της συγκεντρωτικής παραγωγής

Ένα κοινό χαρακτηριστικό των περισσότερων διασυνδεδεμένων ΣΗΕ είναι η συγκεντρωτική παραγωγή της ΗΕ. Μεγάλες μονάδες είναι επιφορτισμένες να παράγουν την ΗΕ η οποία καταλήγει στους καταναλωτές μέσω των δικτύων μεταφοράς και διανομής.

Η συγκεντρωτική παραγωγή παρουσιάζει ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα. Επιτυγχάνεται με σχετικά απλό και εύκολο τρόπο ένα καλό επίπεδο ευστάθειας στο ΣΗΕ. Οι βασικότερες παράμετροι της ευστάθειας ενός συστήματος είναι τα επίπεδα τάσης στο δίκτυο και η συχνότητα της. Οι μεγάλες μονάδες παραγωγής είναι εξοπλισμένες αποκλειστικά με σύγχρονες γεννήτριες μεγάλης ισχύος, οι οποίες είναι ο κύριος ρυθμιστής των ανωτέρω παραμέτρων.

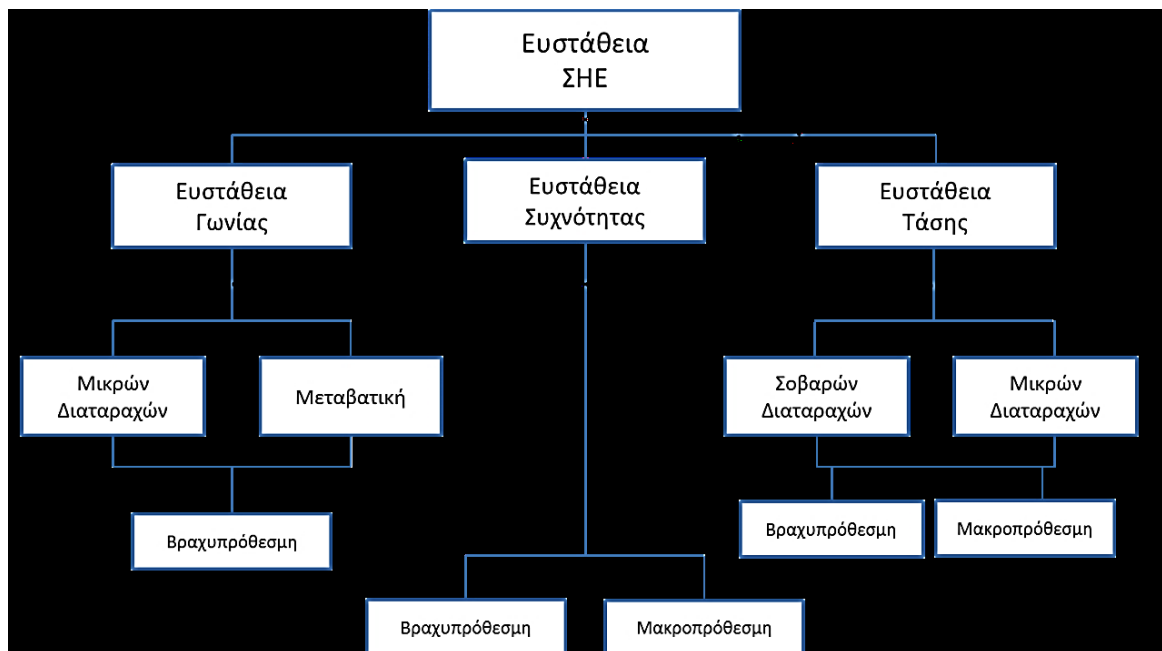
- Διατήρηση της συχνότητας του δικτύου

Η συχνότητα της τάσης του δικτύου επιβάλλεται να είναι η ίδια σε όλο το διασυνδεδεμένο σύστημα. Η διατήρηση της εξαρτάται από το ισοζύγιο ενεργού ισχύος της παραγωγής και της κατανάλωσης. Οι σύγχρονες γεννήτριες παρέχουν τη δυνατότητα να ανταποκρίνονται άμεσα στις ταχείες και βραδείες μεταβολές του φορτίου που έχουν αναλάβει να εξυπηρετούν μέσω ενός αυτόματου συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου, τον ρυθμιστή στροφών, ο οποίος, επιταχύνοντας ή επιβραδύνοντας την γεννήτρια, επιτυγχάνει την έξοδο της απαιτούμενης ισχύος.

---

- Διατήρηση των επιπέδων της τάσης στο δίκτυο

Η διατήρηση της τάσης εντός των επιτρεπόμενων ορίων περιπλέκεται από το γεγονός ότι η τάση δεν είναι ενιαία σε όλο το σύστημα με αποτέλεσμα η ρύθμιση της να μην γίνεται αποκλειστικά με ρύθμιση της λειτουργίας των γεννητριών. Εξίσου σημαντικός είναι ο ρόλος των μετασχηματιστών και των ειδικών διατάξεων ελέγχου ενεργού και αέργου ισχύος (διατάξεις πυκνωτών και πηνίων) σε διάφορα σημεία του δικτύου. Εντούτοις, οι μεγάλες σύγχρονες γεννήτριες είναι αυτές που επιβάλλουν και διατηρούν τα αρχικά επίπεδα τάσης. Το αυτόματο σύστημα ρύθμισης τάσης, είναι αυτό που διατηρεί σταθερό το μέτρο της τάσης στην έξοδο της γεννήτριας ρυθμίζοντας κατάλληλα το ρεύμα διέγερσης του δρομέα της γεννήτριας.



Κατηγοριοποίηση μορφών ευστάθειας ΣΗΕ

Το μοντέλο λειτουργίας της συγκεντρωτικής παραγωγής χαρακτηρίζεται από πολύ αυξημένα κόστη:

- Κάθε στιγμή οι μονάδες συγκεντρωτικής παραγωγής πρέπει να καλύπτουν την συνολική ενεργειακή ζήτηση με τις εξής συνέπειες:

- 1). Τα ιδιαίτερα υψηλά κόστη επενδύσεων για νέες μονάδες ή για αναβάθμιση των ήδη υπάρχουσών. Η εγκατάσταση μιας μεγάλης μονάδας (άνω των 500MW) πρέπει να εντάσσεται στο μακροχρόνιο ενεργειακό προγραμματισμό σε επίπεδο κράτους αφού απαιτεί υψηλές επενδύσεις (κρατικές και ιδιωτικές) και ο χρόνος κατασκευής της είναι της τάξης των 5 χρόνων.

2).Τη λειτουργία των μονάδων σε ισχύ χαμηλότερη από την ονομαστική τους, περίπου στο 90%. Λειτουργούν, δηλαδή, με αρκετή στρεφόμενη εφεδρεία ώστε να μπορεί να καλυφθεί μια ενδεχόμενη στιγμιαία αύξηση της ζήτησης που δεν μπορεί να προβλεφθεί ή μια απότομη μείωση της παραγωγής ΗΕ, κυρίως των ΑΠΕ. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας επιφέρει μια μικρή αλλά σημαντική σπατάλη καυσίμων, διότι η βέλτιστη απόδοση της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου σε σχέση με την κατανάλωση καυσίμου επιτυγχάνεται στα επίπεδα της ονομαστικής ισχύος κάθε γεννήτριας.

- Το ΣΜ είναι αρκετά εκτεταμένο, με γραμμές μήκους πολλών χιλιομέτρων. Αυτό έχει ως συνέπειες:

1).Το μεγάλο κόστος επενδύσεων σε ακριβό εξοπλισμό ΥΤ και ΥΥΤ (π.χ. γραμμές, μετασχηματιστές, μονωτήρες, ηλεκτρονικά ισχύος). Αναγκαστικά το ΣΜ λειτουργεί σε επίπεδα ΥΤ και ΥΥΤ για να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες μεταφοράς.

2).Το μεγάλο κόστος θερμικών απωλειών. Παρά τη λειτουργία υπό ΥΤ ή ΥΥΤ δεν είναι δυνατό να αποφευχθούν οι απώλειες ΗΕ επί ΓΜ τόσο μεγάλου μήκους. Σε περιπτώσεις αυξημένης ροής ΗΕ επί των ΓΜ, αυξάνονται δραματικά τις θερμικές απώλειες, λόγω της έστω και μικρής αύξησης της έντασης του ρεύματος.

3).Το αυξημένο κόστος επέκτασης και συντήρησης του δικτύου και αποκατάστασης βλαβών. Στην πλειοψηφία τους οι γραμμές του ΣΜ, διασχίζουν δύσβατες περιοχές όπου δεν υπάρχει κατάλληλο οδικό δίκτυο. Η επέκτασή του χρειάζεται μακροχρόνιο ενεργειακό σχεδιασμό και η κατασκευή όπως και η συντήρηση του απαιτεί ειδικό εξοπλισμό και έχει υψηλό κόστος. Επιπλέον, η εποπτεία του είναι περιορισμένη. Αυτό κάνει δύσκολο και κοστοβόρο τον ακριβή εντοπισμό μιας βλάβης και την αποκατάστασή της.

Μια θεμελιώδους σημασίας μέθοδος που χρησιμοποιείται σήμερα για τη μελέτη των ΣΗΕ ονομάζεται Ανάλυση Ροής Φορτίου. Η ΑΡΦ υπολογίζει (κατά μέτρο και γωνία) τις άγνωστες τάσεις των ζυγών και τις άγνωστες ροές ισχύος (ενεργού και άεργου) στις γραμμές του ΣΗΕ, για μια συγκεκριμένη επιλογή ισχύος παραγωγής, τάσεων γεννητριών και φορτίων στους ζυγούς. Οι μελέτες ΡΦ είναι πολύ χρήσιμες για διάφορους λόγους, όπως για:

- την επιλογή του πλέον οικονομικού σημείου λειτουργίας των γεννητριών του συστήματος
  - τη διατήρηση των τάσεων των ζυγών και των ροών στις γραμμές εντός προκαθορισμένων ορίων λειτουργίας
  - τις μελέτες επέκτασης του συστήματος παραγωγής και μεταφοράς
-

Το πρόβλημα είναι ότι στις μελέτες ΡΦ κάθε υποδικτύου των σημερινών ΣΗΕ ορίζεται ένας ζυγός, ο ζυγός αναφοράς, ο οποίος στην πραγματικότητα αντιπροσωπεύει το σημείο σύνδεσης του υπό μελέτη υποδικτύου με το υπόλοιπο ΣΗΕ (το λεγόμενο άπειρο ΣΗΕ), ο οποίος είναι επιφορτισμένος με το ρόλο του ρυθμιστή. Από τον ζυγό αναφοράς απαιτείται να διατηρεί το μέτρο και τη γωνία της τάσης σταθερά, και να εγγέει ή να απορροφά την ισχύ που απαιτείται για να παραμένει το υποδίκτυο εντός των ορίων ευστάθειας. Στην πλειονότητα τους, οι ζυγοί αναφοράς των υποδικτύων είναι συνδεδεμένοι με τη σειρά τους με το ΣΜ ή τα ανώτερα επίπεδα των ΔΔ. Αυτό σημαίνει ότι το ΣΜ και ένα μέρος των ΔΔ έχουν κάθε στιγμή την ευθύνη να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των φορτίων των υποδικτύων (που συμπεριφέρονται στοχαστικά) και να διατηρούν τα επίπεδα τάσης και συχνότητας εντός των προδιαγραμμένων ορίων.

Η στοχαστικότητα και η ανελαστικότητα της ζήτησης από τη μια πλευρά, και η μη ελεγχόμενη παραγωγή εντός των ΔΔ (π.χ. βιομηχανικές γεννήτριες, ΑΠΕ) από την άλλη, καθιστούν ως μείζονος σημασίας τη λειτουργία του ΣΜ και των μεγάλων μονάδων συγκεντρωτικής παραγωγής για τη διατήρηση της ευστάθειας του ΣΗΕ. Η εξασφάλιση όμως της εύρυθμης λειτουργίας του ΣΗΕ απαιτεί συνεχώς νέες επενδύσεις. Επιπλέον, δεν δίνει τη δυνατότητα περιορισμού των απωλειών στη μεταφορά λόγω των μεγάλων ροών ΗΕ για μεγάλες αποστάσεις και προκαλεί μεγάλη κατανάλωση καυσίμων στις μεγάλες μονάδες παραγωγής.

### 1.5.2: Διεσπαρμένη παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Από τις αρχές του 1990 έχει αρχίσει να εμφανίζεται ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη σύνδεση μικρών μονάδων παραγωγής απευθείας στο ΔΔ. Το είδος αυτό της έγχυσης ενέργειας στο δίκτυο ονομάζεται Διεσπαρμένη Παραγωγή. Η ΔΠ αποτελεί την εναλλακτική προσέγγιση του προβλήματος της παραγωγής ΗΕ και διαφαίνεται ότι είναι ικανή να αποτελέσει την απάντηση στα μειονεκτήματα της συγκεντρωτικής παραγωγής. Από άποψη ισχύος, η ΔΠ κυμαίνεται κατά κανόνα σε ένα εύρος 1KW έως 100MW, ανά εγκατάσταση.

Οι εγκαταστάσεις που ανήκουν στη ΔΠ είναι οι ακόλουθες:

- Μονάδες ΑΠΕ, στις οποίες εντάσσονται:
- Τα Φ/Β συστήματα

Αποτελούνται από συστοιχίες πάνελ πυριτίου που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική υπό συνεχή τάση (DC) και από κυκλώματα ισχύος-αντιστροφείς (inverters) που μετατρέπουν την συνεχή τάση σε

εναλλασσόμενη (AC), κατάλληλη για το δίκτυο. Συνήθως, η εγκατεστημένη ισχύ των Φ/Β συστημάτων κυμαίνεται συνήθως από μερικά KW έως μερικές εκατοντάδες MW στα πολύ μεγάλα Φ/Β πάρκα, τα οποία όμως λόγω της υψηλής ισχύος συνδέονται απευθείας στο ΣΜ και δεν περιλαμβάνονται στη ΔΠ.

- Οι Α/Γ (αιολικά πάρκα)

Αρχικά, μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε μηχανική μέσω ενός ρότορα με πτερύγια και, στη συνέχεια, σε ηλεκτρική μέσω μιας γεννήτριας. Η ονομαστική ισχύς μιας ανεμογεννήτριας κυμαίνεται συνήθως από 200 KW μέχρι 2MW, αλλά κατασκευάζονται και Α/Γ για υπεράκτια αιολικά πάρκα, με ονομαστική ισχύ έως και 8MW (αρκετές εταιρίες εργάζονται στην πιλοτική ανάπτυξη ανεμογεννητριών ισχύος 10MW). Η εγκατεστημένη ισχύς ενός αιολικού πάρκου κυμαίνεται από μερικά MW μέχρι 1-2 GW, με τις πολύ μεγάλες εγκαταστάσεις να μην εντάσσονται στη ΔΠ, αφού απαιτούν την σύνδεση απευθείας στο ΣΜ.

- Οι μονάδες βιομάζας-βιοκαυσίμων

Είναι μικρές μονάδες παρόμοιες με τις συμβατικές με τη διαφορά ότι ως καύσιμο χρησιμοποιούν βιομάζα ή βιοκαύσιμο. Η βιομάζα (οργανική ύλη) είναι φυτικά υπολείμματα (π.χ. από αγροτικές εργασίες, δασοκομία, πριονίδια, πυρήνα ελιάς), ζωικά απόβλητα (κοπριά, άχρηστα αλιεύματα) και το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων. Τα βιοκαύσιμα είναι υγρά ή αέρια καύσιμα που παράγονται από βιομάζα. Τα κυριότερα είναι:

- 1).το βιοντίζελ που παράγεται από φυτικά ή ζωικά έλαια και λίπη και είναι ποιότητας ντίζελ πετρελαίου
- 2).η βιοαιθανόλη που παράγεται από την αλκοολική ζύμωση βιομάζας πλούσιας σε ζάχαρη
- 3).το βιοαέριο που παράγεται από βιομάζα, όπως το αέριο που παράγεται σε μονάδες βιολογικού καθαρισμού, και είναι ποιότητας φυσικού αερίου.

Οι μονάδες εντάσσονται στις ΑΠΕ επειδή δεν αλλοιώνουν το ισοζύγιο του CO<sub>2</sub> (η βιομάζα έχει δεσμεύσει το CO<sub>2</sub> που πρόκειται να εκπέμψει κατά την καύση της) και, επιπλέον, δεν παράγουν τοξικά καυσαέρια, όπως τα οξείδια του θείου και του αζώτου. Η εγκατεστημένη ισχύ τους ποικίλει από μερικά KW μέχρι μερικά MW.

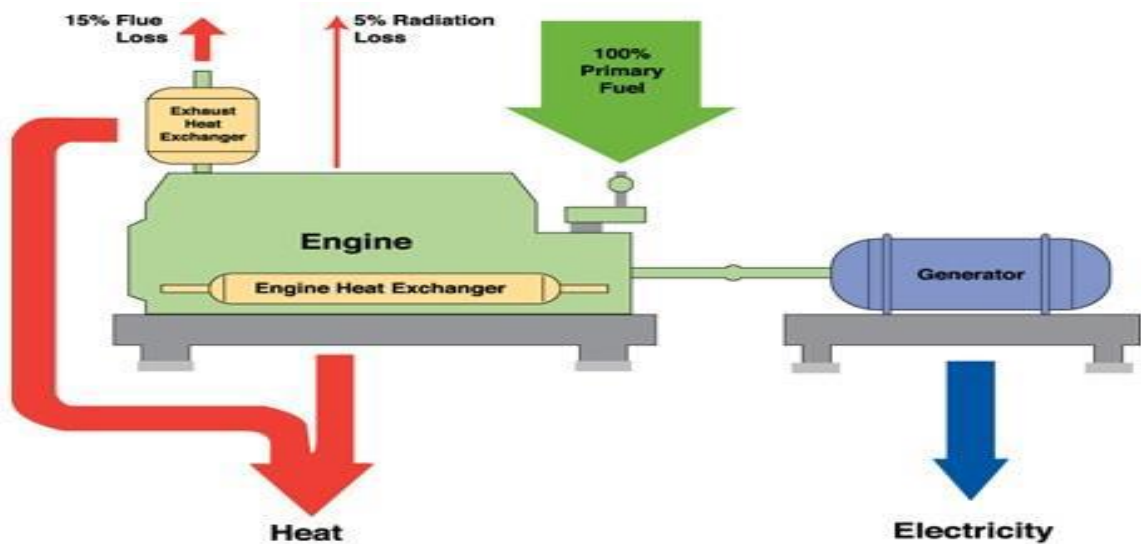
---

- Οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί

Εκμεταλλεύονται την κινητική ενέργεια του νερού μετατρέποντας τη σε μηχανική και ακολούθως σε ηλεκτρική. Σε αντίθεση με τα μεγάλα υδροηλεκτρικά εργοστάσια, οι μικροί σταθμοί εκμεταλλεύονται την φυσική ροή και τις φυσικές υδατοπτώσεις του νερού χωρίς την κατασκευή τεχνητών λιμνών και μεγάλων φραγμάτων. Επιπλέον, η εγκατεστημένη ισχύ τους φθάνει μέχρι τα 300KW. Τα μεγάλα υδροηλεκτρικά εργοστάσια ανήκουν μεν στις ΑΠΕ αλλά δεν εντάσσονται στη ΔΠ λόγω της ισχύος τους που φθάνει τις εκατοντάδες MW, και της σύνδεσής τους στο ΣΜ. Άλλωστε η μεταφορά της ΗΕ από τα μεγάλα υδροηλεκτρικά ήταν η αιτία για την δημιουργία των πρώτων ΣΜ.

- Οι μονάδες Συμπαγωγής Ηλεκτρισμού-Θερμότητας (ΣΗΘ)

Στις μονάδες ΣΗΘ, η χημική ενέργεια του καυσίμου μετατρέπεται σε μηχανική και θερμική. Η μηχανική ενέργεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή ΗΕ και η θερμική χρησιμοποιείται συνήθως για την παραγωγή ατμού, θερμού αέρα ή νερού. Το κύριο πλεονέκτημα της ΣΗΘ είναι η καλύτερη αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου του καυσίμου σε σύγκριση με τις απλές βιομηχανικές εγκαταστάσεις που παράγουν ατμό ή θερμό νερό για τις ανάγκες κάποιου σταδίου της παραγωγικής τους διαδικασίας (process heat) και ταυτόχρονα αγοράζουν το ρεύμα που χρειάζονται για άλλες διεργασίες από προμηθευτές ΗΕ. Επίσης, οι μονάδες ΣΗΘ αξιοποιούν καλύτερα το ενεργειακό περιεχόμενο του καυσίμου συγκριτικά με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής αποκλειστικά ρεύματος. Αν και στις μονάδες ΣΗΘ γίνεται συνήθως πρώτα η παραγωγή θερμότητας, είναι δυνατή η παραγωγή ΗΕ και ατμού (ή χρήσιμης θερμικής ενέργειας σε άλλη μορφή) με διαφορετική σειρά και σε διάφορες αναλογίες. Γενικά, με κριτήριο το αν η βιομηχανική μονάδα έχει μεγαλύτερες ανάγκες σε θερμότητα ή σε ρεύμα μπορεί να παράγεται πρώτα ΗΕ και να αξιοποιείται στην συνέχεια η θερμότητα, που σε άλλη περίπτωση θα αποβαλλόταν, για την παραγωγή ατμού ή θερμού νερού χρήσιμου σε κάποιο στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας (topping-cycle-systems). Είναι δυνατό να συμβαίνει το αντίστροφο, δηλαδή να παράγεται πρώτα θερμότητα και, δευτερευόντως, από το περίσσειμά της, να παράγεται ΗΕ (bottoming-cyclesystems). Απλοποιημένα, τα συστήματα συμπαγωγής αποτελούνται από τρία βασικά μέρη, έναν κινητήρα για την οδήγηση μιας γεννήτριας (συνήθως ατμοστρόβιλος, αεριοστρόβιλος ή σε μικρότερες εφαρμογές εμβολοφόρος μηχανή εσωτερικής καύσης), την ίδια τη γεννήτρια, και έναν μηχανισμό ανάκτησης θερμότητας που συνήθως περιλαμβάνει κάποιον λέβητα.



Σχηματική αναπαράσταση μονάδας ΣΗΘ

### 1.5.3: Πλεονεκτήματα της ΔΠ, Εμπόδια για την διείσδυση της ΔΠ, Περαιτέρω προβλήματα στη διείσδυση ΔΠ από ΑΠΕ & Προϋποθέσεις για την αύξηση της διείσδυσης της ΔΠ

Η παραγωγή ΗΕ από εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας, συνδεδεμένες απευθείας στο ΔΔ παρουσιάζει πολλαπλά οφέλη, τα οποία συνοψίζονται στα παρακάτω:

- Η παραγωγή ΗΕ στην περιοχή όπου καταναλώνεται ελαχιστοποιεί τις απώλειες μεταφοράς, όπως επίσης και το κόστος μεταφοράς, που αποτελούν ένα σημαντικό τμήμα (άνω του 30%) του συνολικού κόστους της παροχής ΗΕ.
- Η ΔΠ συμβάλλει στην αποσυμφόρηση των ήδη υπαρχόντων δικτύων.
- Επιτρέπει τη χρήση της θερμικής ενέργειας σε εφαρμογές συμπαραγωγής, αυξάνοντας έτσι τη συνολική απόδοση του συστήματος.
- Παρέχει πολλά πλεονεκτήματα στους καταναλωτές που έχουν θερμικά φορτία μέσω των εφαρμογών συμπαραγωγής καθώς επίσης και σε εκείνους που έχουν πρόσβαση σε φθηνά καύσιμα, όπως για παράδειγμα φυσικό αέριο, αλλά και σε εκείνους που ευνοούνται από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής όπου είναι εγκατεστημένοι και είναι σε θέση να αξιοποιήσουν ανανεώσιμες πηγές.
- Η εκτεταμένη χρήση των ΑΠΕ μειώνει την κατανάλωση των ορυκτών καυσίμων και τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου αλλά και τις επιβλαβείς εκπομπές όπως, ενδεικτικά, οξειδίων του θείου και του αζώτου



(SOx/NOx), συνεισφέροντας έτσι με ουσιαστικό τρόπο στην προστασία του περιβάλλοντος.

- Η ΔΠ καλύπτει ένα μεγάλο εύρος τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένου πολλών ανανεώσιμων τεχνολογιών που παρέχουν ηλεκτρική ισχύ μικρής κλίμακας σε θέσεις κοντά στη κατανάλωση. Όλες αυτές οι τεχνολογίες δημιουργούν νέες ευκαιρίες στην αγορά ΗΕ και αυξημένο βιομηχανικό ανταγωνισμό.
- Από την επενδυτική σκοπιά του θέματος είναι πρακτικά ευκολότερο να εξευρεθούν θέσεις εγκατάστασης για ΑΠΕ και άλλες ΔΠ σε σχέση με θέσεις εγκατάστασης μεγάλων εργοστασίων παραγωγής ΗΕ. Μάλιστα, είναι ευκολότερο και κυρίως ταχύτερο οι μονάδες αυτές να συνδεθούν με το δίκτυο. Ο κίνδυνος των επενδύσεων κεφαλαίου μειώνεται, και αποφεύγονται οι περιττές δαπάνες.

Μέχρι σήμερα η ΔΠ έχει μειωμένη διείσδυση στα ΣΗΕ διότι προσκρούει στους περιορισμούς και τις προδιαγραφές που σχετίζονται με την ευστάθεια των συστημάτων και την ποιότητα της παρεχόμενης ενέργειας.

Μια μονάδα παραγωγής ΗΕ πρέπει να συνδέεται στο δίκτυο με εξασφαλισμένη την τήρηση αυστηρών προδιαγραφών που αποσκοπούν στην ομαλή λειτουργία του δικτύου. Αυτές οι προδιαγραφές αφορούν:

- Την επάρκεια των στοιχείων του δικτύου

Τα στοιχεία του δικτύου στο οποίο πρόκειται να συνδεθεί η εγκατάσταση παραγωγής πρέπει να μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες λειτουργίας και προστασίας του δικτύου και της εγκατάστασης. Τα βασικά στοιχεία είναι ο Υ/Σ που εξυπηρετεί την εγκατάσταση, οι Μ/Σ, οι γραμμές του δικτύου και τα μέσα ζεύξης και προστασίας

- Τη συμβολή στο ρεύμα βραχυκύκλωσης του σημείου σύνδεσης

Η ισχύς μιας μονάδας παραγωγής επηρεάζει την ισχύ βραχυκύκλωσης του δικτύου και, κατά συνέπεια, τα ρεύματα βραχυκύκλωσης που προκύπτουν σε ενδεχόμενα σφάλματα στο δίκτυο

- Τις αργές μεταβολές της τάσης

Έτσι ονομάζονται οι μεταβολές της τάσης μόνιμης κατάστασης του δικτύου που υπολογίζονται από την διακύμανση του μέσου όρου της τάσης σε διάστημα 10 min από την ονομαστική τιμή της τάσης. Οι μεταβολές αυτές

μπορεί να οφείλονται σε αντίστοιχες διακυμάνσεις της ισχύος εξόδου των εγκαταστάσεων παραγωγής ή σε μεταβολές του φορτίου του δικτύου.

- Τις ταχείες μεταβολές της τάσης

Έτσι αποκαλούνται οποιεσδήποτε ταχείες μεταβολές της τάσης που παρατηρούνται χρονικές κλίμακες έως μερικά δευτερόλεπτα. Ταχείες μεταβολές συμβαίνουν λόγω χειρισμών στις εγκαταστάσεις παραγωγής (π.χ. ζεύξη-απόζευξη, αλλαγή γεννητριών) αλλά και εξαιτίας της μεταβλητότητας της ισχύος εξόδου.

- Τις εκπομπές flicker

Είναι το φαινόμενο της οπτικής ενόχλησης από την διακύμανση της φωτεινότητας (τρεμόπαιγμα) σε λαμπτήρες πυράκτωσης. Οφείλεται και αυτό σε διακυμάνσεις στην τάση που προκαλούν οι εγκαταστάσεις παραγωγής ΗΕ. Να σημειωθεί ότι οι κύριες πηγές εκπομπών έντονων flicker είναι οι Α/Γ.

- Τη δημιουργία αρμονικών συνιστωσών της τάσης και του ρεύματος

Η τάση και τα ρεύματα του δικτύου εμφανίζουν απόκλιση από την ιδεατή καθαρά ημιτονοειδή κυματομορφή. Οι εξάρσεις και οι βυθίσεις που εμφανίζονται στις κυματομορφές προσδίδουν πριονωτή μορφή είναι και αυτές μικρές κυματομορφές με αρμονικές συχνότητες πολλαπλάσιες της θεμελιώδους συχνότητας της τάσης ή του ρεύματος, οι οποίες μπορούν να εντοπιστούν και να αναλυθούν. Οι εγκαταστάσεις παραγωγής και τα μη γραμμικά κυκλώματα ισχύος προκαλούν τη δημιουργία αρμονικών συνιστωσών που πρέπει να καταπιέζονται.

Παρά την τήρηση των ανωτέρω προδιαγραφών για τη σύνδεση των μονάδων παραγωγής, η σύνδεσή τους στο ΔΔ μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα. Τα προβλήματα αυτά είναι απόρροια της μορφής που έχει το ΔΔ που είναι συνήθως ακτινικό ή βροχοειδές που λειτουργεί ως ακτινικό και όχι διασυνδεδεμένο, με αποτέλεσμα η ροή ισχύος να είναι προς μια κατεύθυνση. Μεγάλο πρόβλημα επίσης, είναι η αδυναμία του διαχειριστή να εποπτεύει σε πραγματικό χρόνο τις ροές ενέργειας εντός των ΔΔ.

Οι κύριες δυσλειτουργίες είναι:

- υπερτάσεις σε περιπτώσεις όπου τα εξυπηρετούμενα φορτία είναι χαμηλά, με αποτέλεσμα να απαιτείται συντονισμένη λειτουργία των μονάδων και ειδικός εξοπλισμός όπως οι μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ (Load Tap Changers, μεταβλητού λόγου μετασχηματισμού) για το συνεχή έλεγχο της τάσης
-

- μεταβολές της συχνότητας του ΣΗΕ, η οποία, όπως έχει ήδη αναφερθεί, εξαρτάται κάθε στιγμή από το ισοζύγιο παραγωγής- κατανάλωσης. Οποιαδήποτε απόκλιση από αυτή την ισορροπία μεταφράζεται είτε σε απόκλιση από την επιθυμητή συχνότητα του ευρωπαϊκού δικτύου των 50Hz, είτε σε μεγάλες ροές ισχύος στις γραμμές διασύνδεσης του τοπικού δικτύου με τα γειτονικά του, που επιφέρουν καταπόνηση του εξοπλισμού των ΔΔ.

Το μεγαλύτερο και συνεχώς ραγδαία αναπτυσσόμενο κομμάτι της ΔΠ έχει σχέση με τις ΑΠΕ, κυρίως τις Α/Γ και τα Φ/Β συστήματα. Όμως η διείσδυση αυτών των δύο μορφών παραγωγής ΗΕ έχει φθάσει, πλέον, στα όρια της. Οι λόγοι της χαμηλής διείσδυσης ΑΠΕ είναι:

- Ένα βασικό πρόβλημα που εμφανίζουν οι εγκαταστάσεις που εκμεταλλεύονται την ηλιακή και την αιολική ενέργεια (και δεν το εμφανίζουν οι άλλες μορφές ΔΠ) είναι η μειωμένη δυνατότητα βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης της παραγωγής τους. Η στοχαστικότητα των καιρικών φαινομένων μεταφράζεται, αντίστοιχα, σε συνεχώς μεταβαλλόμενη ισχύ εξόδου των εγκαταστάσεων. Το χαρακτηριστικό αυτό δυσκολεύει το βραχυχρόνιο προγραμματισμό παραγωγής εκ μέρους του διαχειριστή.

- Η παραγωγή από τις μεγάλες κεντρικές εγκαταστάσεις, όπως οι λιγνιτικές μονάδες παραγωγής ΗΕ, παρουσιάζει χαμηλή ευελιξία. Οι μονάδες αυτές απαιτούν μεγάλο χρονικό διάστημα έναυσης, της τάξης των 5h, και όταν εκκινήσουν δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε ποσοστό χαμηλότερο από 50%-65% της ονομαστικής τους ισχύος. Αυτός ο περιορισμός ονομάζεται Τεχνικό Ελάχιστο (Minimum Load) και οφείλεται στο το ότι οι σύγχρονες γεννήτριες των μεγάλων αυτών μονάδων παραγωγής δεν μπορούν να λειτουργήσουν με φορτίο χαμηλότερο από το ανωτέρω ποσοστό διότι απορρυθμίζονται, με αποτέλεσμα το ρεύμα που παράγουν εμφανίζει πολλές διακυμάνσεις. Αυτό έχει δυσμενείς επιπτώσεις στην ευστάθεια του συστήματος που μπορούν να οδηγήσουν μέχρι και την ολική κατάρρευσή του (blackout).

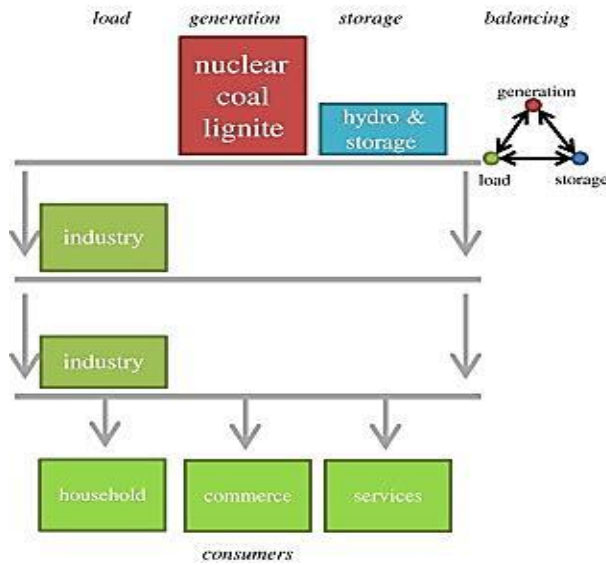
- Ορισμένοι παραγωγοί ΗΕ έχουν προσυμφωνημένη εγγυημένη απορρόφηση της παραγωγής τους ( π.χ. Μονάδες Φυσικού Αερίου). Αυτό περιορίζει περαιτέρω τη διείσδυση των ΑΠΕ στη συνολική παραγωγή. Οι τρεις ανωτέρω λόγοι καθιστούν ιδιαίτερα δύσκολη τη διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ παραγωγής και ζήτησης ΗΕ. Συνολικά, η διείσδυση των ΑΠΕ φθάνει σε ένα ποσοστό 30- 40% ως προς την εγκατεστημένη ισχύ, ενώ είναι κάτω από το 20% ως προς την συνολική κατανάλωση ενέργειας και κάνουν τη διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ παραγωγής και ζήτησης ιδιαίτερα δύσκολη

- Η βασική προϋπόθεση για την αύξηση της διείσδυσης της ΔΠ στα ΣΗΕ είναι η εισαγωγή εποπτείας και ελέγχου στα δίκτυα ΔΔ, ώστε να καταστεί εφικτή η αποφυγή των προαναφερθέντων προβλημάτων ευστάθειας. Τα τρέχοντα ΔΔ χαρακτηρίζονται από τον παθητικό τρόπο λειτουργίας τους, το χαμηλό επίπεδο αυτοματισμού και τις μειωμένες δυνατότητες κεντρικής διαχείρισης.
- Η αύξηση της ευελιξίας της παραγωγής αλλά, κυρίως, η εισαγωγή ευελιξίας και στη ζήτηση είναι απαραίτητες για το δυναμικό έλεγχο του ισοζυγίου παραγωγής και ζήτησης, που είναι κρίσιμος για την ευστάθεια και την αξιοπιστία του δικτύου.
- Ένας τρόπος περαιτέρω αύξησης της ευελιξίας της παραγωγής είναι ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (energy storage) και μικρών μονάδων παραγωγής με ικανότητα παροχής σταθερής ισχύος (π.χ. γεννήτριες ΣΥΘ, βιοκαυσίμων), για άμεση ανταπόκριση στη ζήτηση. Οι γεννήτριες αυτές πρέπει να έχουν αρκετή στρεφόμενη εφεδρεία, δηλαδή να λειτουργούν σε ποσοστό 70-80% της ονομαστικής τους ισχύος ώστε να μπορούν άμεσα να παρέχουν την πρόσθετη ισχύ.

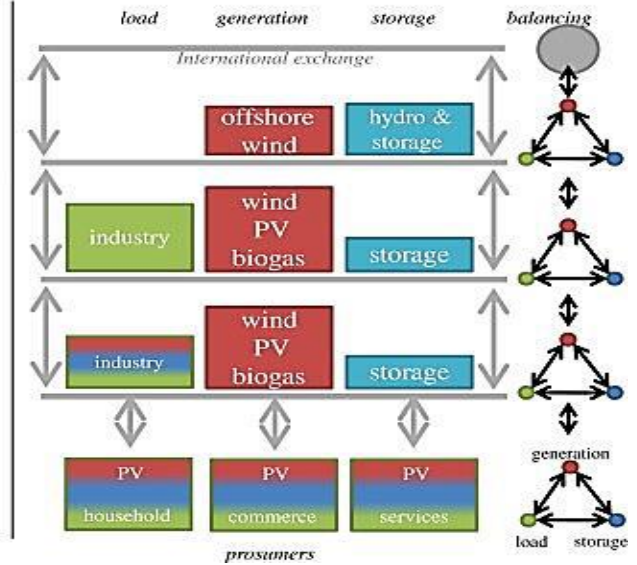
Όμως, οι ανωτέρω λύσεις είναι οικονομικά ασύμφωρες. Πλέον, οι διαχειριστές των συστημάτων προσανατολίζονται στο να εφαρμόζουν μεθόδους που να εποπτεύουν και να ελέγχουν όχι μόνο την παραγωγή αλλά και την κατανάλωση ΗΕ. Η τάση για εξηλεκτισμό των υπολοίπων τομέων κατανάλωσης ενέργειας και κυρίως των τομέων της θέρμανσης και των μεταφορών (φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων) αυξάνουν την ευελιξία των φορτίων και παρέχουν τη δυνατότητα ελέγχου μεγάλου μέρους της ζήτησης. Με τη μετατροπή μέρους της ζήτησης από ανελαστική σε ευέλικτη επιτυγχάνεται η διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος χωρίς να υπάρχει ανάγκη εφεδρείας μέσω γεννητριών και χωρίς να απαιτείται ενίσχυση του εξοπλισμού των δικτύων.

---

### Top-down supply system (central control)



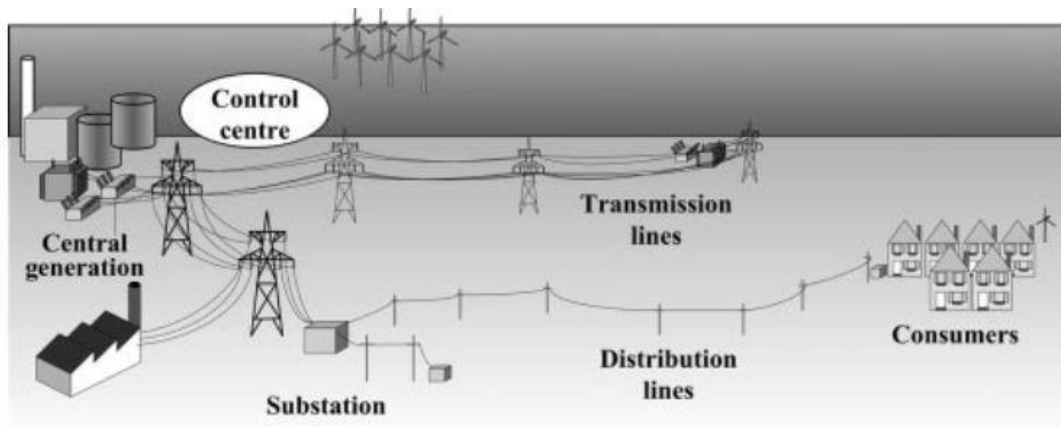
### → Multi-level exchange system (subsidiarity, shared responsibility)



Μεταβολή του τρόπου διατήρησης της ισορροπίας παραγωγής και ζήτησης στο σύγχρονο δίκτυο

#### 1.5.4: Εποπτικός Έλεγχος και Απόκτηση Δεδομένων (SCADA)

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, τα παραδοσιακά ηλεκτρικά δίκτυα τροφοδοτούνται από μεγάλες – κεντρικές μονάδες παραγωγής που εγχέουν ΗΕ στο δίκτυο μεταφοράς ΥΤ του διασυνδεδεμένου Συστήματος. Η ΗΕ μεταφέρεται συνήθως σε μεγάλες αποστάσεις πριν περάσει στο ΔΔ μέσω σειράς Μ/Σ διανομής, ενώ στο τελικό στάδιο φθάνει στα σημεία κατανάλωσης.



Παραδοσιακό ΣΗΕ

Η εποπτεία και ο έλεγχος της παραγωγής καθώς και της μεταφοράς της ΗΕ μέχρι τους Υ/Σ διανομής πραγματοποιείται μέσω των συστημάτων SCADA.

Ο όρος SCADA είναι ακρωνύμιο του όρου Supervisory Control And Data Acquisition, που σημαίνει Εποπτικός Έλεγχος και Συλλογή Δεδομένων. Ένα τέτοιο σύστημα επιτρέπει στο χειριστή να εποπτεύει και να ελέγχει διεργασίες οι οποίες βρίσκονται κατανεμημένες μεταξύ διαφόρων απομακρυσμένων σημείων. Ένα σύστημα SCADA δεν είναι ένα πλήρες σύστημα ελέγχου αλλά πραγματοποιεί κυρίως εποπτεία του δικτύου και του συστήματος. Οι διαδικασίες που επιτελεί ένα σύστημα SCADA είναι η συλλογή των πληροφοριών, η αποστολή τους σε ένα κεντρικό σημείο επεξεργασίας, η εκτέλεση της απαραίτητης ανάλυσης και ελέγχου και ,τέλος, η παρουσίαση της πληροφορίας σε οθόνες χειρισμού και εποπτείας, σε πραγματικό χρόνο ή κατ' απαίτηση. Ο έλεγχος μπορεί να είναι αυτόματος ή να ενεργοποιείται με εντολή του χειριστή.

Ένα σύστημα SCADA επιτρέπει στους χειριστές του να παρατηρούν και να ελέγχουν διαδικασίες με μεγάλη γεωγραφική εξάπλωση, από μια κεντρική τοποθεσία. Τα πλεονεκτήματα ενός SCADA γίνονται περισσότερο αισθητά όταν μια διαδικασία ή ένα σύστημα καλύπτει μια μεγάλη γεωγραφική έκταση. Αντί να αποστέλλεται προσωπικό σε διάφορα σημεία για μετρήσεις και ρυθμίσεις, η εποπτεία και ο έλεγχος του συστήματος μπορούν να πραγματοποιηθούν από απόσταση, και, κυρίως, με μεγάλες ταχύτητες απόκρισης.

Από άποψη υλικοτεχνικής υποδομής εκτός από το λογισμικό εποπτείας και ελέγχου, ένα σύστημα SCADA περιλαμβάνει ένα σύνολο αισθητήρων και διατάξεων μετατροπής, που είναι συνδεδεμένοι σε απομακρυσμένες τερματικές μονάδες (Remote Terminal Units – RTUs). Οι RTUs επικοινωνούν μέσω κάποιας τηλεπικοινωνιακής υποδομής με ένα κεντρικό υπολογιστικό σταθμό όπου είναι εγκατεστημένο και το σύστημα ελέγχου του SCADA.

---



Κεντρικός σταθμός Scada



Εσωτερική εγκατάσταση RTU

- SCADA για το Σύστημα Μεταφοράς

Έχοντας δυνατότητα ελέγχου από απόσταση τα συστήματα SCADA ουσιαστικά είναι υπεύθυνα για τη σύνδεση όλων των στοιχείων του ΣΜ. Ελέγχουν τους Υ/Σ μεταφοράς καθώς και τις μονάδες παραγωγής κατά τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η ασφάλεια του συστήματος. Ο κεντρικός έλεγχος αφορά τις γεννήτριες στις μονάδες παραγωγής ενώ ο τοπικός σχετίζεται με

τους τοπικούς ελεγκτές που είναι υπεύθυνοι για τον έλεγχο της τάσης και της ροής ισχύος.

Έχοντας δυνατότητα ελέγχου από απόσταση τα συστήματα SCADA ουσιαστικά είναι υπεύθυνα για τη σύνδεση όλων των στοιχείων του ΣΜ. Ελέγχουν τους Υ/Σ μεταφοράς καθώς και τις μονάδες παραγωγής κατά τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η ασφάλεια του συστήματος. Ο κεντρικός έλεγχος αφορά τις γεννήτριες στις μονάδες παραγωγής ενώ ο τοπικός σχετίζεται με τους τοπικούς ελεγκτές που είναι υπεύθυνοι για τον έλεγχο της τάσης και της ροής ισχύος.

- SCADA για το Δίκτυο Διανομής

Παραδοσιακά, το ΔΔ είναι παθητικό με περιορισμένη δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ των διαφόρων στοιχείων του. Κάποια στοιχεία αυτοματισμού χρησιμοποιούνται όπως οι ΣΑΤΥΦ (onload tap changers) και οι στατοί πυκνωτές (shunt capacitors) για τον έλεγχο της τάσης ή οι αυτόματοι διακόπτες για τη διαχείριση των σφαλμάτων. Όμως, η εποπτεία και ο έλεγχος αυτός προς το παρόν λειτουργεί μόνο σε τοπικό επίπεδο και δεν υπάρχει δυνατότητα ευρείας εποπτείας (wide area monitoring). Μέχρι τώρα, ήταν απαραίτητη η συνεχής επέμβαση των διαχειριστών του συστήματος σε καταστάσεις κινδύνου με χειροκίνητες διαδικασίες, με αποτέλεσμα να εγκυμονούν σοβαροί κίνδυνοι.

Στη κατάσταση αυτή βρίσκεται το ελληνικό ΔΔ μέχρι και σήμερα καθώς μόλις τώρα βρίσκεται σε κίνηση το πλάνο για ενδεικτικούς χάρτες GIS αντί για τους ήδη υπάρχοντες χειρογραφικούς. Επίσης, το 2009 λειτούργησε σύστημα τηλεμέτρησης ΜΤ που διαχειρίζεται, όμως, μόνο το 23% της διανεμόμενης ενέργειας [23]. Η επικοινωνία γίνεται μέσω GSM/GPRS και αφορά 13.500 καταναλωτές/παραγωγούς ΜΤ. Προς την ίδια κατεύθυνση είναι και η δημιουργία νέων κέντρων ελέγχων διανομής (ΚΕΔΔ) στα οποία παρακολουθείται συνεχώς η κατάσταση λειτουργίας μέρους του ΔΔ και εκτελούνται τηλεχειρισμοί στα σημαντικά του στοιχεία τόσο εντός των Υ/Σ υποβιβασμού ΥΤ προς ΜΤ (Υ/Σ 150kV/20-15-6.6kV) όσο και στα δίκτυα ΜΤ.

Αν και τα ανωτέρω βήματα αλλάζουν την εικόνα του δικτύου, παραμένει η ανάγκη για ελαχιστοποίηση των επιτόπιων μεταβάσεων για καταμέτρηση σε σημεία του δικτύου που δεν εποπτεύονται, για άμεσο εντοπισμό και απομόνωση των βλαβών και βελτίωση του χρόνου ανταπόκρισης σε βλάβες του ΔΔ. Για την ομαλότερη ένταξη της διεσπαρμένης παραγωγής καθώς και της νέας τεχνολογίας των ηλεκτροκίνητων οχημάτων, τεχνολογίας που επηρεάζει άμεσα την ποιότητα τάσης του ΔΔ, η διατήρηση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας του δικτύου είναι σημαντικότερη από ποτέ .

---



- SCADA για τη Χαμηλή Τάση

Στη ΧΤ μέχρι σήμερα δεν υπάρχει η παραμικρή εποπτεία για μεγάλους ή μικρούς πελάτες. Το δεύτερο εξάμηνο του 2013 άρχισε η υλοποίηση του προγράμματος τηλεμέτρησης μεγάλων πελατών ΧΤ που περιλαμβάνει την κατασκευή του κύριου και του εφεδρικού Κέντρου Τηλεμέτρησης στις εγκαταστάσεις του ΔΕΔΔΗΕ, 60.000 μετρητές παροχών 85 kVA, 135 kVA και 250 kVA και 5.000 μετρητές παροχών 35 kVA και 55 kVA (επικοινωνία μέσω GSM/GPRS) [24]. Το πρόγραμμα αυτό θα παρουσιαστεί λεπτομερώς στη συνέχεια. Η εγκατάσταση εποπτείας και ελέγχου στο σύνολο του δικτύου ΧΤ είναι πολύ σημαντική τόσο για τους παρόχους όσο και για τους καταναλωτές. Στόχος του διαχειριστή του δικτύου είναι ένα πλήρες διασυνδεδεμένο δίκτυο μεταξύ καταναλωτών και παρόχων ΗΕ με αμφίδρομη επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο. Η εισαγωγή εποπτείας και ελέγχου στο δίκτυο ΧΤ είναι επιτακτική ανάγκη αν ληφθούν υπόψη ότι:

- 1). Ο οικιακός τομέας είναι ο πλέον ενεργοβόρος στον τομέα της ΗΕ [25]
- 2). Η απελευθέρωση της αγοράς ΗΕ προσφέρει στον καταναλωτή τη δυνατότητα να διαλέγει πάροχο και να προγραμματίζει την καθημερινή κατανάλωση ΗΕ με βάση τις προσφορές που λαμβάνει.
- 3). Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα θα αποκτήσουν σημαντικό ποσοστό στην καθημερινή μας μετακίνηση.

### 1.5.5: Προβλήματα ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού

Στις περισσότερες χώρες, η ανάπτυξη των ΣΗΕ ξεκίνησε τη δεκαετία του '50. Ένα μεγάλο ποσοστό του εξοπλισμού που εγκαταστάθηκε τότε και σχετίζεται με τις ΓΜ, τους Υ/Π και τους Μ/Σ έχει υπερβεί το χρόνο ζωής του και χρειάζεται αλλαγή. Σε σημαντικό μέρος του ΣΜ, σε αντίθεση με το ΔΔ, έχουν γίνει επενδύσεις προς τον εκσυγχρονισμό του εξοπλισμού. Όμως, αυτό που κυρίως απαιτείται είναι η αξιοποίηση του ΣΜ με σύγχρονες τεχνικές και ευφυείς μεθόδους.

#### 1. Προβλήματα γήρανσης εξοπλισμού

- Κόστος αντικατάστασης Το κόστος που απαιτείται για αντικατάσταση του εξοπλισμού παλαιάς τεχνολογίας με ίδια μοντέλα (like-for-like replacement) είναι πολύ υψηλό και είναι αμφίβολο αν τα ανταλλακτικά επαρκούν και αν το εξειδικευμένο προσωπικό θα είναι διαθέσιμο λόγω συνταξιοδοτήσεων.

- Δυσκολία στη διασύνδεση με ΑΠΕ Σε πολλές χώρες τα συστήματα εναέριων γραμμών μεταφοράς που χρειάζονται για να υποστηρίξουν τη διασύνδεση με

ΑΠΕ εμφανίζουν σημαντικές καθυστερήσεις στην ανάπτυξή τους λόγω των δυσκολιών στην απόκτηση δικαιωμάτων και περιβαλλοντικών αδειών.

- Περιορισμοί ισχύος Ορισμένες ΓΜ λειτουργούν κοντά στα όρια μεταφοράς ισχύος, με αποτέλεσμα να μη μπορούν να υποστηρίξουν την αύξηση του φορτίου ή τη σύνδεση με ΑΠΕ.

## 2. Θερμικοί περιορισμοί

Οι θερμικοί περιορισμοί των γραμμών και του εξοπλισμού του υπάρχοντος Συστήματος Μεταφοράς και των ΔΔ θέτουν ένα ανώτατο όριο στην ικανότητα μεταφοράς ΗΕ. Όταν ο εξοπλισμός μεταφέρει ρεύμα που υπερβαίνει τις θερμικές του αντοχές, προκαλείται υπερθέρμανση και η μόνωση καταστρέφεται ταχέως. Αυτό οδηγεί στη μείωση του χρόνου ζωής του εξοπλισμού του δικτύου και την αύξηση βλαβών και σφαλμάτων. Όταν σε μια εναέρια ΓΜ διέλθει ισχυρότερο ρεύμα από το προδιαγραφόμενο, οι αγωγοί επιμηκύνονται λόγω θερμικής διαστολής, η χαλάρωση της γραμμής αυξάνεται, και η απόσταση από έδαφος μειώνεται. Οποιαδήποτε μείωση στην απόσταση μεταξύ μιας εναέριας γραμμής και του εδάφους έχει σημαντικές συνέπειες τόσο στην αύξηση του πλήθους βλαβών όσο και στον κίνδυνο για τη δημόσια ασφάλεια. Οι θερμικοί περιορισμοί εξαρτώνται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες που, με τη σειρά τους, μεταβάλλονται δυναμικά.

## 3. Λειτουργικοί περιορισμοί

Κάθε ΣΗΕ λειτουργεί μέσα σε προκαθορισμένα όρια τάσης και συχνότητας. Αν η τάση υπερβεί το ανώτατο όριο, η μόνωση του εξοπλισμού του ΣΗΕ αλλά και των καταναλωτών μπορεί να καταστραφεί, προκαλώντας τοπικά σφάλματα. Αντίθετα, η πολύ μικρή τάση μπορεί να προκαλέσει δυσλειτουργία στον εξοπλισμό των καταναλωτών καθώς αυξάνεται το ρεύμα και προκαλείται υπερφόρτωση ορισμένων γραμμών και γεννητριών.

Ως προς το ελληνικό ΣΜ πρέπει να σημειωθεί ότι έχουν ήδη γίνει σημαντικές επενδύσεις που αφορούν:

- το δίκτυο ΥΥΤ που αποτελείται από τις τρεις εναέριας γραμμές διπλού κυκλώματος των 400kV
  - τις διεθνείς διασυνδέσεις με τις γειτονικές χώρες
  - το σχεδιασμό εγκατάστασης σύγχρονων ΚΥΤ “κλειστού τύπου” (όπως το ήδη ολοκληρωμένο ΚΥΤ Αλιβερίου)
  - τη διαγωνιστική διαδικασία του έργου διασύνδεσης των Κυκλάδων με το ΣΜ.
-

Το ότι ο Η/Μ εξοπλισμός των ΣΗΕ βρίσκεται σε διαδικασία ανανέωσης ή αναβάθμισης προσφέρει την ευκαιρία για αντικατάσταση μέρους του εξοπλισμού με εγκαταστάσεις ισχύος που ενσωματώνουν ηλεκτρονικά-ψηφιακά συστήματα ελέγχου και τεχνολογίες επικοινωνίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα σύγχρονου εξοπλισμού είναι τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς (FACTS), που αποτελούνται από συσκευές με ηλεκτρονικά ισχύος (π.χ. θυρίστορ GTO, τρανζίστορ I-GBT) και παρέχουν τη δυνατότητα ελέγχου πολλών παραμέτρων ευστάθειας, καθιστώντας αποδοτικότερη τη χρήση των υπάρχοντων πόρων των ΣΗΕ.

Τα ανωτέρω οδηγούν στην εφαρμογή ευφυών μεθόδων, αφενός για την αύξηση της ικανότητας μεταφοράς ΗΕ κατά δυναμικό τρόπο, και αφετέρου για την ανακατεύθυνση της ροής ισχύος μέσα από λιγότερο φορτωμένα δίκτυα.

## 1.6: Αξιοπιστία ΣΗΕ

Τις τελευταίες δυο δεκαετίες, σε πολλές χώρες του κόσμου εφαρμόζονται νομοθετικά πλαίσια με ιδιαίτερη μέριμνα ως προς την εξασφάλιση επαρκούς στάθμης αξιοπιστίας και ασφαλούς λειτουργίας των ΣΗΕ. Συγκεκριμένα, η Αξιοπιστία Λειτουργίας (Operational Reliability) των ΣΗΕ, όπως έχει καθιερωθεί να αποκαλείται, αναφέρεται στα εξής χαρακτηριστικά:

- Επάρκεια του ΣΗΕ Η ικανότητα του συστήματος να ικανοποιεί τις απαιτήσεις των πελατών του (σε ισχύ, ενέργεια) λαμβάνοντας υπόψη τις τυχαίες βλάβες και τις προγραμματισμένες διακοπές (συντηρήσεις) του εξοπλισμού του.
- Ασφάλεια του ΣΗΕ Ικανότητα του συστήματος να παραμένει σε λειτουργία μετά από ξαφνικές διαταραχές που μπορεί να συμβούν (π.χ. βραχυκύκλωμα, απώλεια εξοπλισμού, κλπ.). Πρέπει το σύστημα να μπορεί να ανταποκρίνεται σε οποιαδήποτε φαινόμενα ή ενέργειες που μπορούν να προκαλέσουν τέτοιες διαταραχές (θεομηνίες, ανθρώπινα σφάλματα, κλπ.)

Με τις αλλαγές που υφίστανται τα ΣΗΕ στη δομή και τη λειτουργία τους, εγείρεται σημαντικό ερώτημα ως προς το αν διατηρείται η στάθμη Αξιοπιστίας Λειτουργίας των ΣΗΕ.

Για να εκτιμηθούν τα θέματα αξιοπιστίας που ανακύπτουν στο τρέχον ΣΗΕ, πρέπει να αναγνωριστούν οι κύριες θεσμικές αλλαγές στις οποίες υπόκειται. Το παλαιό μονοπωλιακό καθεστώς διαδέχεται ένα ανταγωνιστικό περιβάλλον, στο οποίο εμπλέκονται: πολλοί ανεξάρτητοι παραγωγοί, η

διαχωρισμένη διαχείριση ΣΜ και ΔΔ, πολλοί προμηθευτές ΗΕ , και περισσότερο απαιτητικοί καταναλωτές.

Η ενίσχυση της παραγωγής τείνει να γίνει εξαρτώμενη από τους νόμους της αγοράς και όχι από ένα κεντρικό σχεδιασμό επάρκειας της παραγόμενης ισχύος. Οι παραγωγοί διαθέτουν εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος αλλά δεν είναι υπεύθυνοι για τη συνολική επάρκεια, ενδιαφέρονται μόνο για την εξυπηρέτηση αναγκών που τους επιφέρουν κέρδος. Επιπλέον, η αύξηση των μονάδων παραγωγής από ΑΠΕ και των υπόλοιπων μορφών διασπαρμένης παραγωγής θέτουν με τη σειρά τους σε κίνδυνο την ευστάθεια του συστήματος, άρα και την Αξιοπιστία Λειτουργίας του.

Οι περιορισμοί στην επέκταση των ΣΜ και ΔΔ, τόσο λόγω των απαιτούμενων αυξημένων επενδύσεων, όσο και περιβαλλοντικών περιορισμών, επηρεάζουν δυσμενώς την Αξιοπιστία Λειτουργίας του ΣΗΕ.

Οι καταναλωτές από την πλευρά τους αναμένεται να εντείνουν τις πιέσεις τους για χαμηλότερες χρεώσεις και να απαιτούν αυξημένη αξιοπιστία. Οι απαιτήσεις αυτές στο πλαίσιο ενός ανταγωνιστικού περιβάλλοντος οδηγούν τους προμηθευτές ΗΕ σε προσπάθειες μείωσης του κόστους επενδύσεων και του κόστους λειτουργίας και συντήρησης των δικτύων για να συγκρατήσουν τα επίπεδα των τιμών. Η μη ελεγχόμενη περικοπή όμως των δαπανών αυτών μπορεί να αποβεί σε βάρος της αξιοπιστίας της παρεχόμενης ΗΕ.

Συνοπτικά, οι νέες συνθήκες που επικρατούν στα ΣΗΕ και επηρεάζουν την Αξιοπιστία Λειτουργίας σχετίζονται με τα παρακάτω:

- Αύξηση ΔΠ, κυρίως ΑΠΕ
  - Εξασφάλιση παροχής Φυσικού Αερίου στις νέες μονάδες
  - Καθορισμός των απαιτήσεων για στρεφόμενη εφεδρεία
  - Διασυνδέσεις με ΣΗΕ γειτονικών χωρών
  - Πραγματική ικανότητα μεταφοράς ΗΕ του ΣΜ
  - Δυνατότητες επέκτασης ΣΜ
  - Περιβαλλοντικοί περιορισμοί
  - Πάροχοι ΗΕ που λειτουργούν σύμφωνα με τους κανόνες της αγοράς
  - Αύξηση της στάθμης αβεβαιότητας για την πρόβλεψη της ζήτησης φορτίου
  - Αύξηση των απαιτήσεων των καταναλωτών για αξιόπιστη παροχή ΗΕ
  - Αύξηση των απαιτήσεων των καταναλωτών για οικονομική παροχή ΗΕ
-

## Κεφάλαιο 2: Συμμετρικές Συνιστώσες

### 2.1: Εισαγωγή

Η ανάλυση και η μελέτη συμμετρικών τριφασικών και πολυφασικών συστημάτων είναι απλή, επειδή κάθε τέτοιο σύστημα μπορεί να σηκώσει ένα μονοφασικό σύστημα, για το οποίο ισχύει το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα. Η προϋπόθεση της ίδιας σύνθετης αντίστασης για κάθε φάση και συμμετρικών τάσεων και ρευμάτων δεν ισχύει πάντοτε. Η συμμετρία ενός συστήματος διαταράσσεται από τα ασύμμετρα σφάλματα, όπως μονοπολικό βραχυκύκλωμα, διπολικό βραχυκύκλωμα, πολλαπλάσφαλατα, διακοπή ενός ή δύο αγωγών, από τα μέσα ζεύξεως, διακόπτες μονοπολικής διακοπής και αυτόματης επαναφοράς και από τα ασύμμετρα φορτία που προκαλούνται από μονοφασικούς καταναλωτές. Επομένως, σε όλες αυτές τις περιπτώσεις έχουμε ασυμμετρίες στις σύνθετες αντιστάσεις που προκαλούν ασυμμετρίες στις τάσεις και στις εντάσεις.

Για την ανάλυση ασυμμέτρων τριφασικών ή πολύφασικών συστημάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολύπλοκα τριφασικά ή πολύφασικά ισοδύναμα κυκλώματα τα οποία οδηγούν σε πολύ περίπλοκους υπολογισμούς που οφείλονται κυρίως στις ζεύξεις μεταξύ των αγωγών. Είναι όμως δυνατοί μετασχηματισμοί του αρχικού ασύμμετρου συστήματος abc (φυσικό σύστημα) σε άλλα συστήματα συνιστώσεων, για τα οποία ισχύουν μονοφασικά ισοδύναμα κυκλώματα, με ζεύξεις μόνο σε εκείνα τα σημεία του κυκλώματος, που αντιστοιχούν στα σημεία ασύμμετρων του συστήματος abc. Τα ισοδύναμα κυκλώματα που προκύπτουν από τους μετασχηματισμούς αυτούς είναι απλούστερα και έτσι απλοποιείται η σχετική ανάλυση, τα αποτελέσματα της οποίας μεταφέρονται με αντιστρόφους μετασχηματισμούς στο φυσικό σύστημα abc.

Χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα συστήματα συνιστωσών:

- Συνιστώσες 012 (συμμετρικές συνιστώσες).
- Συνιστώσες 0αβ (διαγώνιες συνιστώσες).
- Συνιστώσες 0dq (συνιστώσες δύο αξόνων).
- Συνιστώσες 0sz (συνιστώσες διανυσμάτων χώρου).

Οι συμμετρικές συνιστώσες χρησιμοποιούνται για την ανάλυση μόνιμων ασυμμετριών σε δίκτυα. Τα στοιχεία του πίνακα μετασχηματισμού είναι

μιγαδικές σταθερές. Η πρώτη βασική εργασία για τις συμμετρικές συνιστώσες δημοσιεύθηκε το 1918 Charles LeGeyt Fortescue.

Οι διαγώνιες συνιστώσες χρησιμοποιούνται για την ανάλυση μονίμων και μεταβατικών καταστάσεων των δικτύων, όχι όμως των μηχανών. Τα στοιχεία του πίνακα μετασχηματισμού είναι σταθερές. Το σύστημα των συνιστωσών Οαβ αναπτύχθηκε από την E. Clarke.

Οι συνιστώσες 2 αξόνων χρησιμοποιούνται για την ανάλυση μονίμων και μεταβατικών καταστάσεων στις στρεφόμενες ισότροπες και ανισότροπες μηχανές, μηχανές με κυλινδρικό δρομέα και μηχανές με εκτύπους πόλους. Τα στοιχεία του πίνακα μετασχηματισμού είναι χρονικές συναρτήσεις. Οι συνιστώσες  $0dq$  είναι γνωστές και ως συνιστώσες του Park, ο οποίος τις εισήγαγε το 1929 στην ανάλυση συγχρόνων μηχανών.

Οι συνιστώσες ανυσμάτων χώρου παρουσιάζουν πλεονεκτήματα στην ανάλυση μεταβατικών φαινομένων σε διασυνδεδεμένα συστήματα ηλεκτρικής ενεργείας με πολλές μηχανές. Τα στοιχεία του πίνακα μετασχηματισμού είναι μιγαδικές συναρτήσεις του χρόνου. Το σύστημα αυτό δεν έχει ερευνηθεί ακόμη αρκετά, ώστε να είναι σαφής η περιοχή πλεονεκτικής χρησιμοποίησής του. Οι συνιστώσες αυτές χρησιμοποιήθηκαν αρχικά στην ανάλυση μίας μηχανής από τον K.P. Conacs και γενικεύθηκαν στην ανάλυση διασυνδεδεμένων συστημάτων με περισσότερες μηχανές από τον G. Hosemann.

Οι συμμετρικές συνιστώσες χρησιμοποιούνται πολύ περισσότερο από τα άλλα συστήματα συνιστωσών. Η χρησιμοποίησή των συνιστωσών αυτών μετά το 1950 είναι ευρεία και πολύ αποτελεσματική στην ανάλυση σφαλμάτων και στην ανάπτυξη συστημάτων προστασίας. Για τους λόγους αυτούς στα επόμενα κεφάλαια χρησιμοποιούνται μόνο οι συμμετρικές συνιστώσες. Καταβάλλεται προσπάθεια απλής και κατανοητής ανάπτυξεως και χρησιμοποίησεως των συνιστωσών αυτών, οι οποίες δεν απορρέουν μόνο από ένα μαθηματικό μετασχηματισμό αλλά έχουν και φυσική υπόσταση. Αυτό καθιστά δυνατή τη μέτρηση των συμμετρικών συνιστωσών και συμβάλει στην κατανόησή τους.

---

## 2.2:Ορισμός συμμετρικών συνιστωσών και πίνακες μετασχηματισμού

### 2.2.1: Ορισμός

Σε κάθε τριφασικό ασύμμετρο σύστημα ισχύει:

$$K_a + K_b + K_c = 3K_0 \neq 0 \quad (1.1.)$$

$K_a, K_b, K_c$  είναι φασικά διανύσματα των φάσεων a,b,c που μπορεί να είναι ρεύματα, τάσεις, εντάσεις ηλεκτρικού ή μαγνητικού πεδίου, μαγνητικές ροές κ.λ.π., όχι όμως αντιστάσεις. Το διάνυσμα  $K_0$  καλείται ομοιοπολική συνιστώσα, με δείκτη 0 και ορίζεται με την σχέση (1.2).

$$K_0 = \frac{1}{3}(K_a + K_b + K_c) \quad (1.2)$$

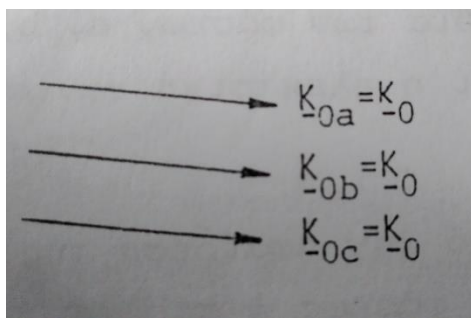
Η σχέση (1.1) μπορεί να γραφεί:

$$(K_a - K_0) + (K_b - K_0) + (K_c - K_0) = 0 \quad (1.3)$$

Για τριφασικό συμμετρικό σύστημα είναι  $K_0 = 0$  επειδή  $K_a + K_b + K_c = 0$ . Η ομοιοπολική συνιστώσα είναι ίδια και για τις τρεις φάσεις:

$$K_{0a} = K_{0b} = K_{0c} = K_0 \quad (1.4)$$

Τα τρία διανύσματα  $K_{0a}, K_{0b}$  και  $K_{0c}$  των φάσεων a,b,c σχηματίζουν το ομοιοπολικό σύστημα ή σύστημα μηδενικής ακολουθίας που φαίνεται στο σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1 Ομοιοπολικό σύστημα

Ως ευθεία συνιστώσα του διανύσματος  $K_a$ , με δείκτη 1, ορίζεται το μέγεθος:

$$K_{1a} = \frac{1}{3}(K_a + aK_b + a^2K_c) \quad (1.5), \quad \text{με } a = e^{j2\pi/3}.$$

Αντίστοιχα ορίζεται για τις φάσεις b και c:

$$K_{1b} = \frac{1}{3}(K_b + aK_c + a^2K_a) \quad (1.6)$$

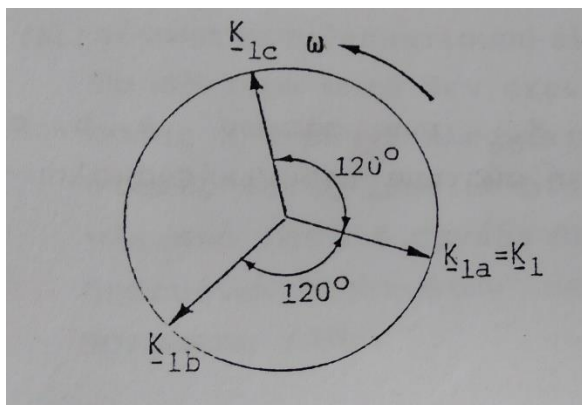
$$K_{1c} = \frac{1}{3}(K_c + aK_a + a^2K_b) \quad (1.7)$$

Από την σχέση (1.5) φαίνεται η σύνθεση της ευθείας συνιστώσας  $K_{1a}$  της φάσεως a από το διάνυσμα  $K_a$ , το διάνυσμα  $K_b$  αφού στραφεί κατά a και από το διάνυσμα  $K_c$  αφού στραφεί κατά  $a^2$ . Κατά όμοιο τρόπο σχηματίζονται οι συνιστώσες  $K_{1b}$  και  $K_{1c}$  όπως φαίνεται από τις εξισώσεις (1.6) & (1.7).

Από τις σχέσεις (1.5), (1.6) & (1.7) προκύπτει ότι το  $K_{1b}$  και  $K_{1c}$  προέρχονται από την στρέψη του  $K_{1a}$  κατά  $a^2$  και a και αντίστροφα:

$$\begin{pmatrix} K_{1a} \\ K_{1b} \\ K_{1c} \end{pmatrix} = K_{1a} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix} \quad (1.8)$$

Το σύστημα  $K_{1a}$ ,  $K_{1b}$  και  $K_{1c}$  που φαίνεται στο σχήμα 1.2 καλείται ευθύ σύστημα ή θετικό σύστημα ή σύστημα θετικής ακολουθίας.



Σχήμα 1.2 Ευθύ σύστημα (θετική ακολουθία των φάσεων a,b,c).

$\omega$  είναι η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα.

Το υπόλοιπο  $K_{2a}$ , που προκύπτει από την αφαίρεση της ευθείας και της ομοπολικής συνιστώσας της φάσεως a από το διάνυσμα  $K_a$  καλείται αντίστροφη συνιστώσα:

$$\begin{aligned} K_{2a} &= K_a - K_{1a} - K_0 = K_a - \frac{1}{3}(K_a + aK_b + a^2K_c) - \frac{1}{3}(K_a + K_b + K_c) \\ &= \frac{1}{3}[K_a - (a-1)K_b - (a^2+1)K_c] \end{aligned}$$

(1.9)



Εύκολα φαίνεται ότι  $a+1=-a^2$  και  $a^2+1=-a$ , οπότε η σχέση (1.9) απλοποιείται:

$$K_{2a} = \frac{1}{3}(K_a + a^2K_b + aK_c)(1.10)$$

Με τον ίδιο τρόπο προκύπτει από τις σχέσεις (1.2),(1.6)&(1.7):

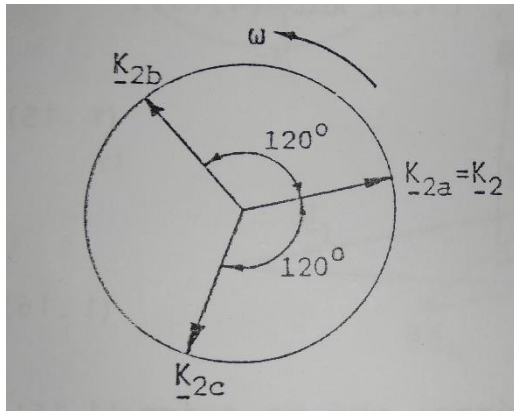
$$K_{2b} = K_b - K_{1b} - K_0 = \frac{1}{3}(K_b + a^2K_c + aK_a)(1.11)$$

$$K_{2c} = K_c - K_{1c} - K_0 = \frac{1}{3}(K_c + a^2K_a + aK_b)(1.12)$$

Από τις σχέσεις (1.10),(1.11)&(1.12) προκύπτει ότι το  $K_{2b}$  και  $K_{2c}$  προέρχονται από στρέψη του  $K_{2a}$  κατά  $a$  και  $a^2$  αντίστοιχα:

$$\begin{pmatrix} K_{2a} \\ K_{2b} \\ K_{2c} \end{pmatrix} = K_{2a} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix} (1.13)$$

Τα διανύσματα  $K_{2a}, K_{2b}$  &  $K_{2c}$  σχηματίζουν το σύστημα που φαίνεται στο σχήμα 1.3. Στο σύστημα αυτό, που καλείται αντίστροφο ή αρνητικό ή αρνητικής ακολουθίας δεν εμφανίζεται η θετική ακολουθία φάσεων  $a, b, c$  όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2 αλλά την αντίστροφη ακολουθία  $a, b, c$ .



Σχήμα 1.3: Αντίστροφο σύστημα (αρνητική ακολουθία των φάσεων  $a, b, c$ )

Η άθροιση των συνιστώσων του ομοπολικού, του θετικού και του αντιστρόφου συστήματος οδηγεί στο αρχικό ή φυσικό σύστημα  $abc$ . Π.Χ. για τη φάση  $a$  προκύπτει από τις σχέσεις (1.2),(1.5)&(1.10):

$$K_0 + K_{1a} + K_{2a} = \frac{1}{3}(K_a + K_b + K_c) + \frac{1}{3}(K_a + aK_b + a^2K_c) + \frac{1}{3}(K_a + a^2K_b + aK_c) = \frac{1}{3}(K_a + K_a + K_a) + \frac{1}{3}(1 + a + a^2)K_b + \frac{1}{3}(1 + a + a^2)K_c = K_a$$

Αποδείχθηκε συνεπώς ότι ένα τυχαίο ασύμμετρο τριφασικό σύστημα abc μπορεί να αναλυθεί σε τρία συμμετρικά συστήματα συνιστωσών, το ομοπολικό, το ευθύ και το αντίστροφο.

Επειδή και τα τρία συστήματα  $(K_{0a}, K_{0b}, K_{0c}), (K_{1a}, K_{1b}, K_{1c})$  και  $(K_{2a}, K_{2b}, K_{2c})$  είναι συμμετρικά, επαρκούν για την περιγραφή των συστημάτων αυτών οι συνιστώσες μιας φάσεως. Συνήθως χρησιμοποιούνται οι συνιστώσες  $K_{0a}, K_{1a}, K_{2a}$  της φάσεως a και γράφονται χωρίς το δείκτη a. Οι συνιστώσες των άλλων φάσεων προκύπτουν από τις σχέσεις (1.4), (1.8) & (1.13).

## 2.2.2: Πίνακες μετασχηματισμού

Ο μετασχηματισμός του φυσικού συστήματος abc στο σύστημα (012) γίνεται με τον πίνακα μετασχηματισμού (1.15), που προκύπτει από τις σχέσεις (1.2), (1.5) & (1.10):

$$\begin{pmatrix} K_{0a} \\ K_{1a} \\ K_{2a} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_0 \\ K_1 \\ K_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_a \\ K_b \\ K_c \end{pmatrix} \quad (1.15), \quad \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} = (S)$$

$$\text{ή } (K_{012}) = (S)(K_{abc}) \quad (1.16)$$

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός προκύπτει από τη σχέση (1.15):

$$\begin{pmatrix} K_a \\ K_b \\ K_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_0 \\ K_1 \\ K_2 \end{pmatrix} \quad (1.17), \quad \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} = (T)$$

$$\text{ή } (K_{abc}) = (T)(K_{012}) \quad (1.18)$$

$$\text{με } (T) = (S)^{-1} \quad (1.19)$$

Το σχήμα 1.4 δείχνει τη γραφική μέθοδο καθορισμού των συμμετρικών συνιστωσών για το ασύμμετρο σύστημα  $(K_a, K_b, K_c)$  που βασίζεται στη σχέση (1.15). Το σχήμα 1.5α δείχνει τη σύνθεση ασυμμέτρου συστήματος όταν είναι γνωστές οι συμμετρικές συνιστώσες του.

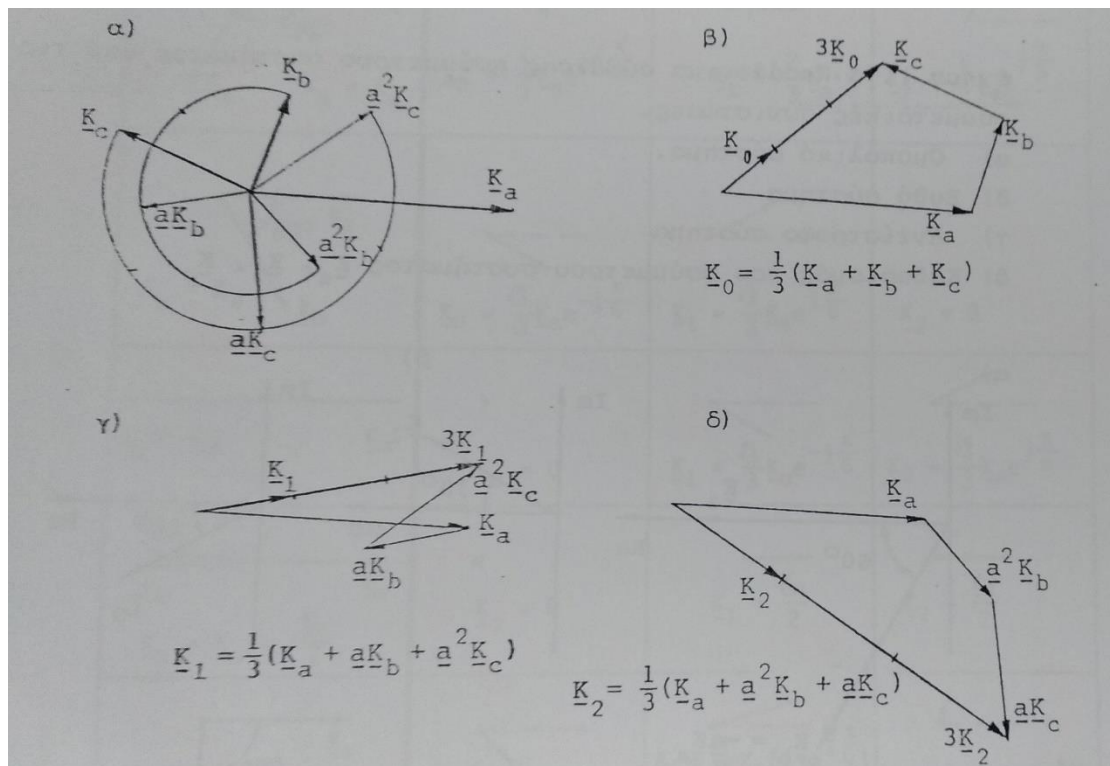
Φυσικά οι συμμετρικές συνιστώσες ασύμμετρου συστήματος μπορούν να καθορισθούν και αναλυτικά σύμφωνα με τη σχέση (1.15). Π.χ. για το σύστημα του σχήματος 1.5β ισχύει:

$$\begin{pmatrix} K_0 \\ K_1 \\ K_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_a \\ -aK_a \\ 0 \end{pmatrix}.$$

$$K_0 = \frac{1}{3}(1-a)K_a = \frac{\sqrt{3}}{3}K_a e^{-j\frac{\pi}{6}}$$

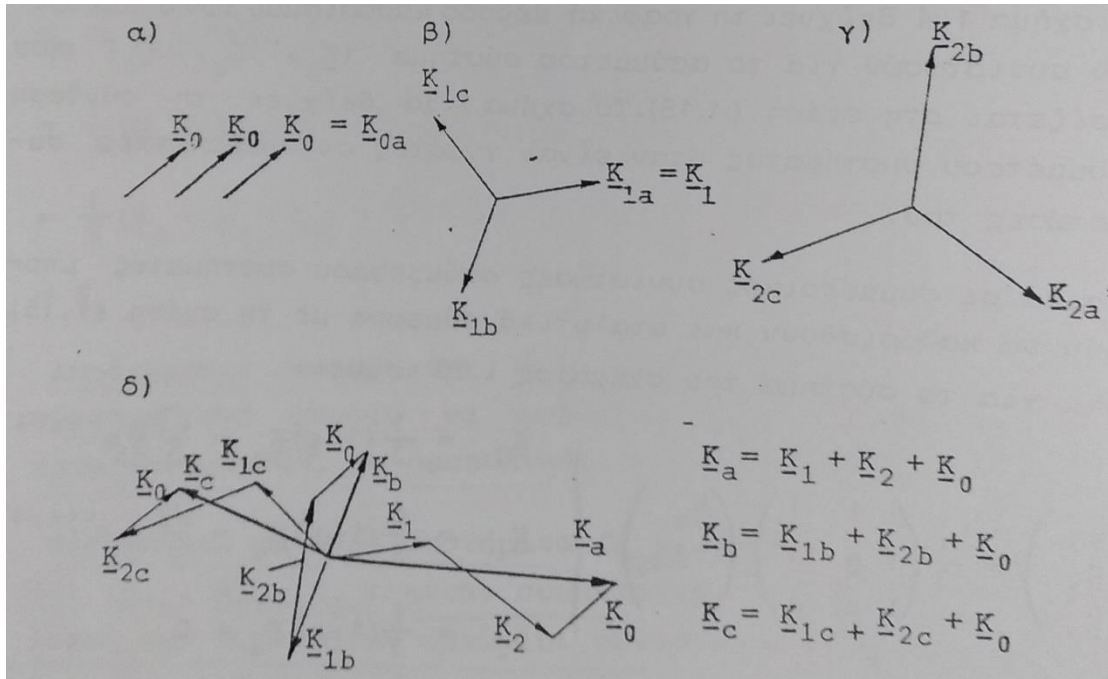
$$K_1 = \frac{1}{3}(1-a^2)K_a = \frac{\sqrt{3}}{3}K_a e^{+j\frac{\pi}{6}}$$

$$K_2 = \frac{1}{3}(1-a^3)K_a = 0$$



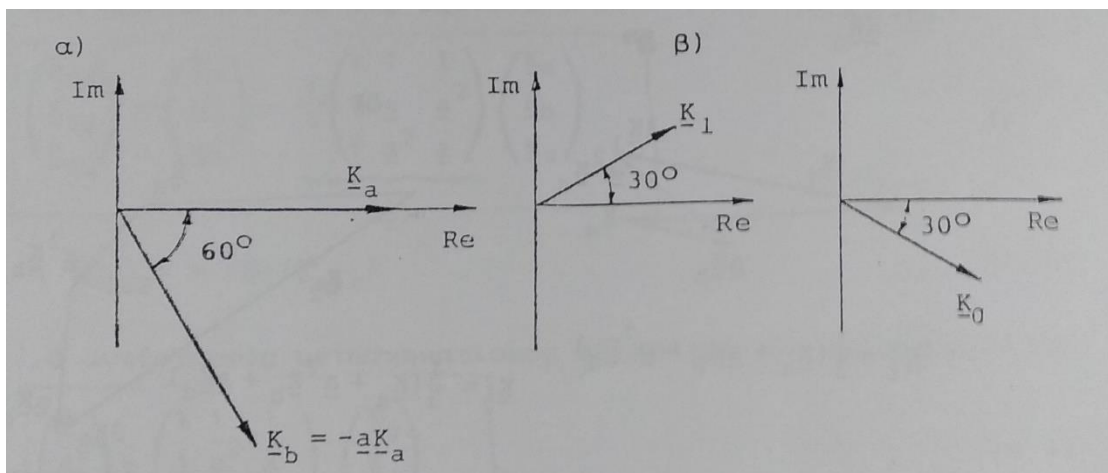
Σχήμα 1.4. Παράδειγμα γραφικού καθορισμού συμμετρικών συνιστωσών ασύμμετρου συστήματος.

- α) Ασύμμετρο τριφασικό σύστημα με τις συνιστώσες  $K_a, K_b, K_c$ .
- β) Καθορισμός της ομοπολικής συνιστώσας  $K_0$ .
- γ) Καθορισμός της συνιστώσας θετικής ακολουθίας  $K_1$ .
- δ) Καθορισμός της συνιστώσας αρνητικής ακολουθίας  $K_2$ .

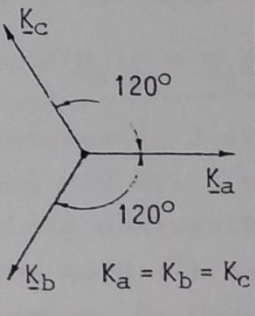

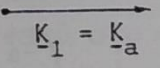

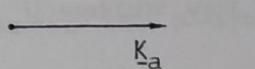
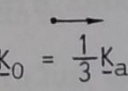
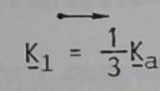
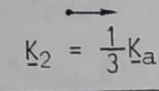
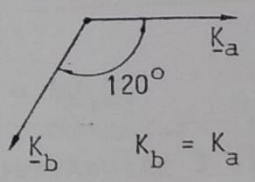

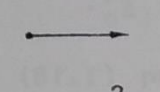
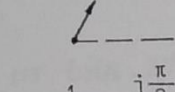
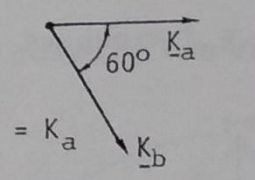
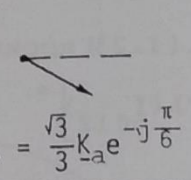
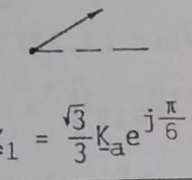
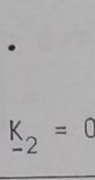

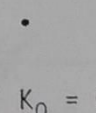
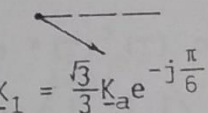
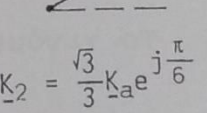
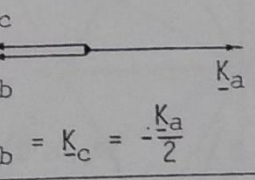
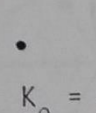
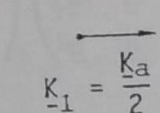
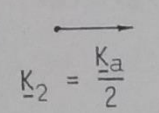
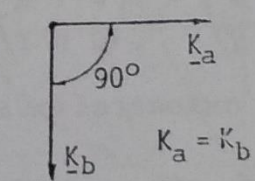
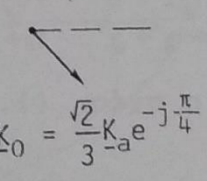
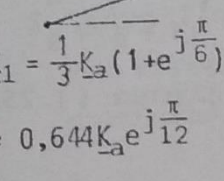
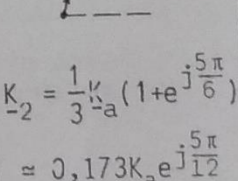


Σχήμα 1.5α: Παράδειγμα για σύνθεσης ασύμμετρου συστήματος από τις συμμετρικές συνιστώσες.

- α) Ομοπολικό σύστημα
- β) Ευθύ σύστημα
- γ) Αντίστροφο σύστημα
- δ) Καθορισμός του ασύμμετρου συστήματος  $K_a, K_b, K_c$ .



Σχήμα 1.5β: Ασύμμετρο τριφασικό σύστημα α) και οι συμμετρικές του συνιστώσες β).

Φυσικό σύστημα $\underline{K}_a, \underline{K}_b, \underline{K}_c$	Συμμετρικές συνιστώσες		
	ομοπολική $\underline{K}_0$	ευθεία $\underline{K}_1$	αντίστροφη $\underline{K}_2$
 <p><math>K_a = K_b = K_c</math></p>	 <p><math>\underline{K}_0 = 0</math></p>	 <p><math>\underline{K}_1 = \underline{K}_a</math></p>	 <p><math>\underline{K}_2 = 0</math></p>
 <p><math>\underline{K}_a</math></p>	 <p><math>\underline{K}_0 = \frac{1}{3}\underline{K}_a</math></p>	 <p><math>\underline{K}_1 = \frac{1}{3}\underline{K}_a</math></p>	 <p><math>\underline{K}_2 = \frac{1}{3}\underline{K}_a</math></p>
 <p><math>K_b = K_a</math></p>	 <p><math>\underline{K}_0 = \frac{1}{3}\underline{K}_a e^{-j\frac{\pi}{3}}</math></p>	 <p><math>\underline{K}_1 = \frac{2}{3}\underline{K}_a</math></p>	 <p><math>\underline{K}_2 = \frac{1}{3}\underline{K}_a e^{j\frac{\pi}{3}}</math></p>
 <p><math>K_b = K_a</math></p>	 <p><math>\underline{K}_0 = \frac{\sqrt{3}}{3}\underline{K}_a e^{-j\frac{\pi}{6}}</math></p>	 <p><math>\underline{K}_1 = \frac{\sqrt{3}}{3}\underline{K}_a e^{j\frac{\pi}{6}}</math></p>	 <p><math>\underline{K}_2 = 0</math></p>
 <p><math>\underline{K}_b = -\underline{K}_a</math></p>	 <p><math>\underline{K}_0 = 0</math></p>	 <p><math>\underline{K}_1 = \frac{\sqrt{3}}{3}\underline{K}_a e^{-j\frac{\pi}{6}}</math></p>	 <p><math>\underline{K}_2 = \frac{\sqrt{3}}{3}\underline{K}_a e^{j\frac{\pi}{6}}</math></p>
 <p><math>\underline{K}_b = \underline{K}_c = -\frac{\underline{K}_a}{2}</math></p>	 <p><math>\underline{K}_0 = 0</math></p>	 <p><math>\underline{K}_1 = \frac{\underline{K}_a}{2}</math></p>	 <p><math>\underline{K}_2 = \frac{\underline{K}_a}{2}</math></p>
 <p><math>K_a = K_b</math></p>	 <p><math>\underline{K}_0 = \frac{\sqrt{2}}{3}\underline{K}_a e^{-j\frac{\pi}{4}}</math></p>	 <p><math>\underline{K}_1 = \frac{1}{3}\underline{K}_a (1 + e^{j\frac{\pi}{6}})</math>  <math>\approx 0,644\underline{K}_a e^{j\frac{\pi}{12}}</math></p>	 <p><math>\underline{K}_2 = \frac{1}{3}\underline{K}_a (1 + e^{j\frac{5\pi}{6}})</math>  <math>\approx 0,173\underline{K}_a e^{j\frac{5\pi}{12}}</math></p>

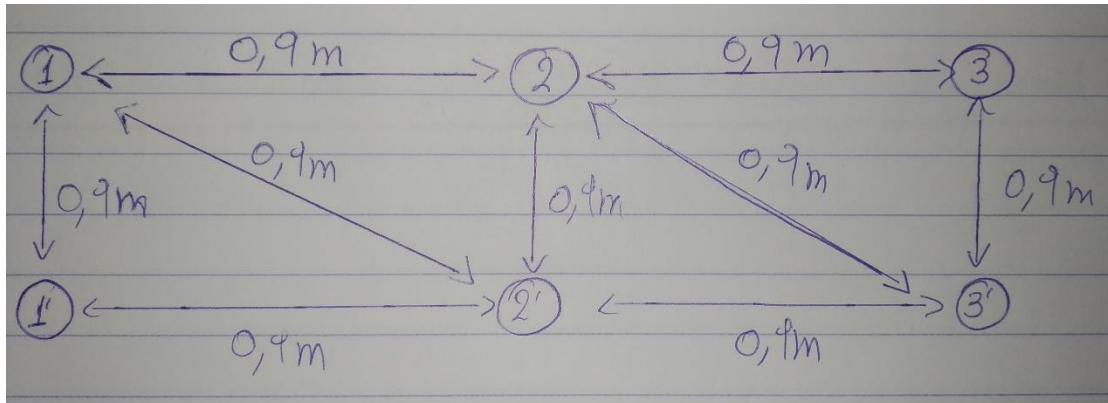
Συμμετρικές συνιστώσες για ειδικές περιπτώσεις ασύμμετρων συστημάτων.

## 2.3:Θεωρητικός Υπολογισμός

### 2.3.1:Μέση Τάση

Υπολογισμός Μέσης Τάσης

6 Κλώνοι Al,  $d_{\xi}=3,43\text{mm}^2$ ,  $q=65,06\text{mm}^2$ ,  $D_s'=3,94\text{mm}^2$



$$R_K = \frac{1}{34,8 \cdot 65,06} = 0,44 \Omega/\text{Km}$$

$$R'_K = 9,869 \cdot 10^{-7} \cdot 50 = 0,049345 \Omega/\text{Km}.$$

$$F=50\text{Hz}, p=100\Omega\text{m}, D_{kk'}=658,5 \cdot \sqrt{p/f}=931,25 \text{ m}$$

$$Z_{KK} = R_K + R'_K + j \cdot \omega \cdot 2 \cdot$$

$$10^{-7} \ln_{D_s'}^{D_{kk'}} = 0,44 + 0,049345 + j \cdot 628 \cdot 10^{-7} \ln_{3,94 \cdot 10^{-7}}^{931} \Rightarrow Z_{KK} = 0,489 + j \cdot 0,77 \Omega/\text{Km}$$

$$Z_{K_m} = R'_K + j \cdot \omega \cdot 2 \cdot 10^{-7} \ln_{D_{km}}^{D_{km'}} = 0,049345 + j \cdot 0,0628 \Omega/\text{Km}.$$

$$\gg z_{11} = 0,489 + 0,777j$$

$$z_{11} =$$

$$0,4890 + 0,7770j$$

```
>> z12=0.0493+0.436*i
```

```
z12 =
```

```
0.0493 + 0.4360i
```

```
>> z13=0.0493+0.392*i
```

```
z13 =
```

```
0.0493 + 0.3920i
```

```
>> z21=z12
```

```
z21 =
```

```
0.0493 + 0.4360i
```

```
>> z22=z11
```

```
z22 =
```

```
0.4890 + 0.7770i
```

>> z23=z12

z23 =

0.0493 + 0.4360i

>> z31=z13

z31 =

0.0493 + 0.3920i

>> z32=z23

z32 =

0.0493 + 0.4360i

>> z33=z11

z33 =

0.4890 + 0.7770i

---



```
>> ZA=[z11 z12 z13;z21 z22 z23; z31 z32 z33]
```

ZA =

```
0.4890 + 0.7770i 0.0493 + 0.4360i 0.0493 + 0.3920i
0.0493 + 0.4360i 0.4890 + 0.7770i 0.0493 + 0.4360i
0.0493 + 0.3920i 0.0493 + 0.4360i 0.4890 + 0.7770i
```

```
>> Zp=ZA
```

Zp =

```
0.4890 + 0.7770i 0.0493 + 0.4360i 0.0493 + 0.3920i
0.0493 + 0.4360i 0.4890 + 0.7770i 0.0493 + 0.4360i
0.0493 + 0.3920i 0.0493 + 0.4360i 0.4890 + 0.7770i
```

```
>> A=[1 1 1;1 -0.5-0.866*i -0.5+0.866*i;1 -0.5+0.866*i -0.5-0.866*i]
```

A =

```
1.0000 + 0.0000i 1.0000 + 0.0000i 1.0000 + 0.0000i
1.0000 + 0.0000i -0.5000 - 0.8660i -0.5000 + 0.8660i
```

1.0000 + 0.0000i -0.5000 + 0.8660i -0.5000 - 0.8660i

>> A2=inv(A)

A2 =

0.3333 + 0.0000i 0.3333 - 0.0000i 0.3333 + 0.0000i  
0.3333 - 0.0000i -0.1667 + 0.2887i -0.1667 - 0.2887i  
0.3333 + 0.0000i -0.1667 - 0.2887i -0.1667 + 0.2887i

>> ZS=A2\*Zp\*A

ZS =

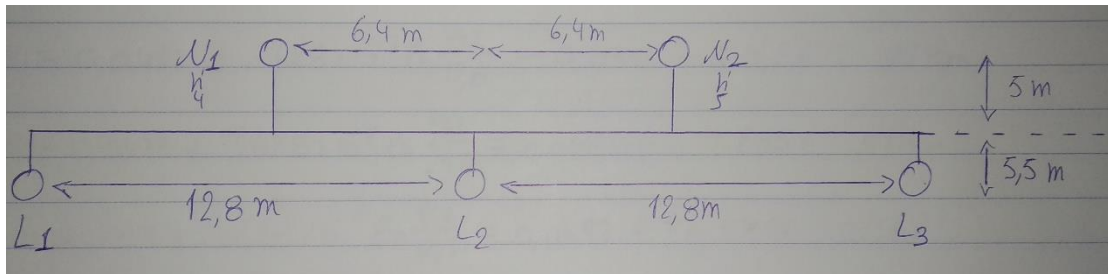
0.5876 + 1.6197i 0.0127 - 0.0073i -0.0127 - 0.0073i  
-0.0127 - 0.0073i 0.4397 + 0.3557i -0.0254 + 0.0147i  
0.0127 - 0.0073i 0.0254 + 0.0147i 0.4397 + 0.3557i

---

## 2.3.2:Υψηλή Τάση

Υπολογισμός Υψηλής Τάσης

$dεξ=3,92 \text{ cm}$  ,  $q=92,87 \text{ mm}^2$  ,  $Ds'=1,58 \text{ cm}$



$$R_K = \frac{1}{34.8 * 92.87} = 0.3095 \Omega / \text{Km}.$$

$$R'_K = 9.869 * 10^{-7} * 50 = 0.049345 \Omega / \text{Km}.$$

$$D_{kk'} = 658.5 \sqrt{p/f} = 931.25 , p=100 \Omega \text{m} , f=50 \text{Hz}$$

$$Z_{KK} = R_K + R'_K + j * \omega * 2 * 10^{-7} \ln \frac{D_{KK}}{D_{S'}}$$

$$Ds' = D11 = D22 = D33 = D44 = 55$$

$$D12 = D21 = D23 = D32 = D45 = D54 = 12.8 \text{m}$$

$$D13 = D31 = 25.6 \text{m}$$

$$D14 = D24 = D25 = D35 = D41 = D42 = D52 = D53 = 12.3 \text{m}$$

$$D15 = D34 = D43 = D51 = 21.89 \text{m}$$

$$\gg z_{11} = 0.3588 + 0.689 * i$$

$$z_{11} =$$

$$0.3588 + 0.6890i$$

>> z12=0.0463+0.2692\*i

z12 =

0.0493 + 0.2692i

>> z13=0.0493+0.2256\*i

z13 =

0.0493 + 0.2256i

>> z14=0.0493+0.2717\*i

z14 =

0.0493 + 0.2717i

>> z15=0.0493+0.2355\*i

z15 =

0.0493 + 0.2355i

---

>> z21=z21

z21 =

0.0493 + 0.2692i

>> z22=z11

z22 =

0.3588 + 0.6890i

>> z23=z12

z23 =

0.0493 + 0.2692i

>> z24=z14

z24 =

0.0493 + 0.2717i

>> z25=z14

z25 =

0.0493 + 0.2717i

>> z31=z13

z31 =

0.0493 + 0.2256i

>> z32=z12

z32 =

0.0493 + 0.2692i

>> z33=z11

z33 =

0.3588 + 0.6890i

---

>> z34=z15

z34 =

0.0493 + 0.2355i

>> z35=z14

z35 =

0.0493 + 0.2717i

>> z41=z14

z41 =

0.0493 + 0.2717i

>> z42=z14

z42 =

0.0493 + 0.2717i

>> z43=z15

z43 =

0.0493 + 0.2355i

>> z44=z11

z44 =

0.3588 + 0.6890i

>> z45=z12

z45 =

0.0493 + 0.2692i

>> z51=z15

z51 =

0.0493 + 0.2355i

---



>> z52=z14

z52 =

0.0493 + 0.2717i

>> z53=z14

z53 =

0.0493 + 0.2717i

>> z54=z12

z54 =

0.0493 + 0.2692i

>> z55=z11

z55 =

0.3588 + 0.6890i

>> ZA=[z11 z12 z13;z21 z22 z23;z31 z32 z33];

ZA =

0.3588 + 0.6890i 0.0493 + 0.2692i 0.0493 + 0.2256i  
0.0493 + 0.2692i 0.3588 + 0.6890i 0.0493 + 0.2692i  
0.0493 + 0.2256i 0.0493 + 0.2692i 0.3588 + 0.6890i

>> ZB=[z14 z15;z24 z25;z34 z35]

ZB =

0.0493 + 0.2717i 0.0493 + 0.2355i  
0.0493 + 0.2717i 0.0493 + 0.2717i  
0.0493 + 0.2355i 0.0493 + 0.2717i

>> ZC=[z41 z42 z43;z51 z52 z53]

ZC =

0.0493 + 0.2717i 0.0493 + 0.2717i 0.0493 + 0.2355i  
0.0493 + 0.2355i 0.0493 + 0.2717i 0.0493 + 0.2717i

---

```
>> ZD=[z44 z45;z54 z55]
```

ZD =

```
0.3588 + 0.6890i 0.0493 + 0.2692i
0.0493 + 0.2692i 0.3588 + 0.6890i
```

```
>> Zp=[ZA-ZB*inv(ZD)*ZC]
```

Zp =

```
0.3619 + 0.5598i 0.0536 + 0.1323i 0.0509 + 0.0985i
0.0536 + 0.1323i 0.3652 + 0.5427i 0.0536 + 0.1323i
0.0509 + 0.0985i 0.0536 + 0.1323i 0.3619 + 0.5598i
```

```
>> A=[1 1 1;1 -0.5-0.866i -0.5+0.866i;1 -0.5+0.866i -0.5-0.866i]
```

A =

```
1.0000 + 0.0000i 1.0000 + 0.0000i 1.0000 + 0.0000i
1.0000 + 0.0000i -0.5000 - 0.8660i -0.5000 + 0.8660i
1.0000 + 0.0000i -0.5000 + 0.8660i -0.5000 - 0.8660i
```

```
>> ZS=inv(A)*Zp*A
```

```
ZS =
```

```
0.4684 + 0.7961i 0.0038 - 0.0045i -0.0058 - 0.0011i  
-0.0058 - 0.0011i 0.3103 + 0.4331i -0.0241 + 0.0147i  
0.0038 - 0.0045i 0.0248 + 0.0135i 0.3103 + 0.4331i
```

---

## Κεφάλαιο 3: Μέτρηση συμμετρικών συνιστωσών

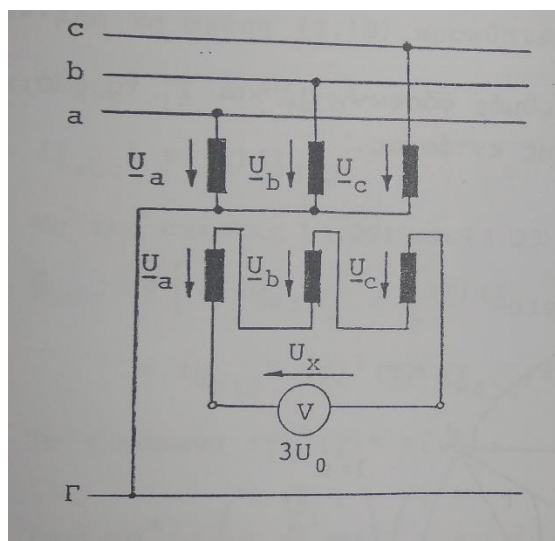
### 3.1: Μέτρηση της ομοπολικής τάσεως και εντάσεως

Το σχήμα 1.6 δείχνει τη μέτρηση της ομοπολικής τάσεως με τη βοήθεια μετασχηματιστή τάσεως με ανοικτό το δευτερεύον τύλιγμα συνδεσμολογίας τριγώνου. Η ένδειξη του βολτομέτρου  $V$ , με την προϋπόθεση του ίδιου αριθμού ελιγμάτων στο πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα, είναι:

$$U_X = U_a + U_b + U_c \quad (1.20)$$

Από τη σύγκριση των εξισώσεων (1.20) & (1.1) προκύπτει:

$$U_0 = \frac{1}{3}(U_a + U_b + U_c) = \frac{U_X}{3} \quad (1.21)$$



Σχήμα 1.6: Μέτρηση της ομοπολικής τάσεως με μετασχηματιστή τάσεως.

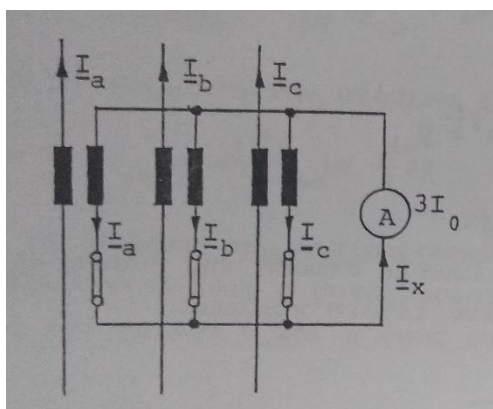
Το σχήμα 1.7 δείχνει το κύκλωμα μετρήσεως της ομοπολικής εντάσεως με τη βοήθεια τριών μονοφασικών μετασχηματιστών εντάσεως. Η ένδειξη του αμπερομέτρου  $A$ , υποθέτοντας τον ίδιο αριθμό ελιγμάτων στο πρωτεύον και δευτερεύον τύλιγμα, είναι:

$$I_X = I_a + I_b + I_c \quad (1.22)$$

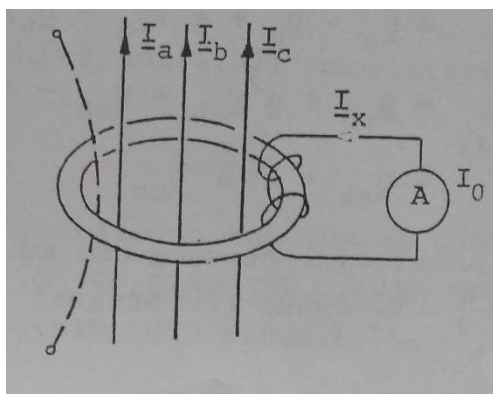
Από τη σύγκριση των εξισώσεων (1.22) & (1.1) προκύπτει:

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) = \frac{I_X}{3} \quad (1.23)$$

Στο βραχυκυκλωμένα ζεύγη ακροδεκτών μπορούν να μετρηθούν τα φασικά ρεύματα  $I_{abc}$ .



Σχήμα 1.7: Μέτρηση της ομοπολικής εντάσεως με τρεις μονοφασικούς μετασχηματιστές εντάσεως.



Σχήμα 1.8: Μέτρηση του ομοπολικού ρεύματος με μετασχηματιστή εντάσεως τύπου δακτυλίου.

Το σχήμα 1.8 δείχνει τη μέτρηση του ομοπολικού ρεύματος με τη βοήθεια μετασχηματιστή εντάσεως τύπου δακτυλίου. Το αμπερόμετρο A δείχνει το ομοπολικό ρεύμα  $I_0$ , εάν το δευτερεύον έχει 3 ελίγματα:

$$3I_x = I_a + I_b + I_c \quad (1.24)$$

$$I_x = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) = I_0 \quad (1.25)$$

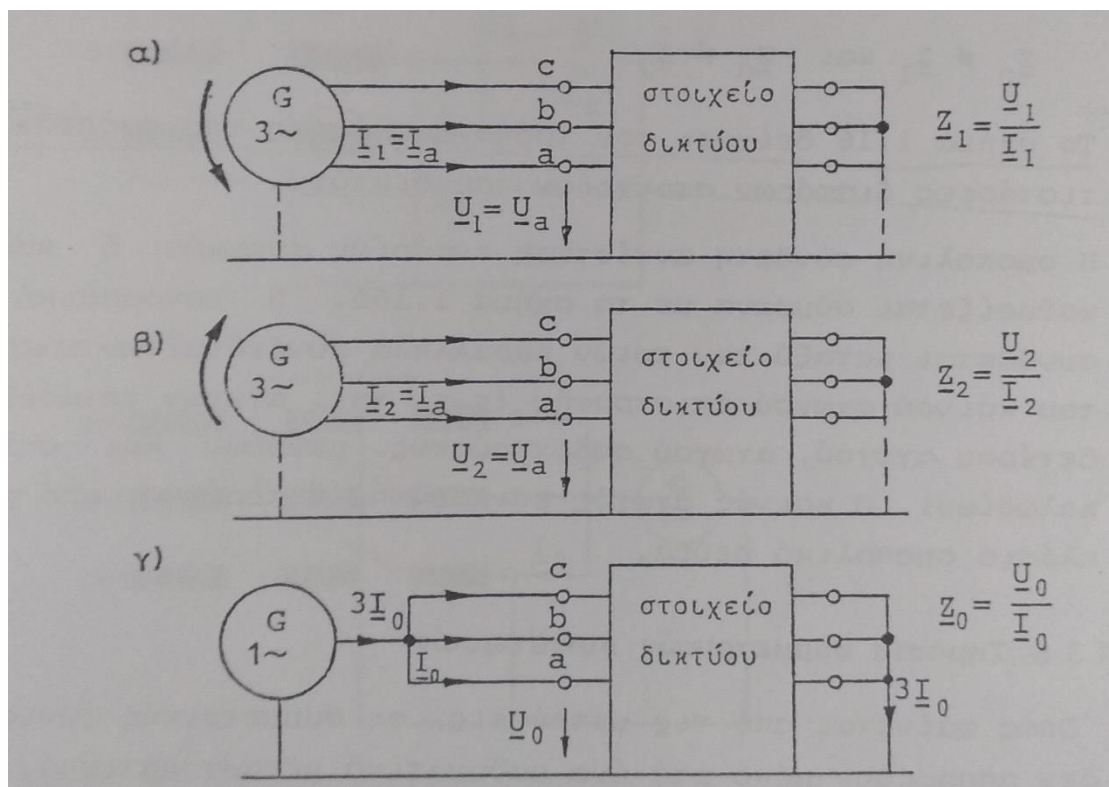
Πρόσθετοι αγωγοί, που διέρχονται από το δακτύλιο και συμβολίζονται με διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα 1.8, δεν πρέπει να είναι βραχυκυκλωμένοι ή γειωμένοι σε δύο σημεία, επειδή έτσι θα σχηματίζονται πρόσθετα κλειστά δευτερεύοντα τυλίγματα. Τέτοιοι αγωγοί είναι π.χ. οι μεταλλικοί μανδύες των καλωδίων.

### 3.2: Έννοια συνθέτων αντιστάσεων συμμετρικών συνιστωσών

Στις συμμετρικές συνιστώσες τάσεως και εντάσεως αντιστοιχούν συμμετρικές συνιστώσες συνθέτων αντιστάσεων.

Η ευθεία σύνθετη αντίσταση  $Z_1$  ή σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας για ένα στοιχείο του δικτύου αντιστοιχεί στην ισοδύναμη αντίσταση κατά τη συμμετρική λειτουργία με ένα ευθύ συμμετρικό σύστημα τάσεων. Το μέγεθος  $Z_1$  εμφανίζεται στο μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα που χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις συμμετρικής λειτουργίας τριφασικών συστημάτων. Το σχήμα 1.9α δείχνει τη μέτρηση της αντίστασης  $Z_1$ . Η τριφασική πηγή παρέχει το ευθύ σύστημα των τάσεων.

Η αντίστροφη σύνθετη αντίσταση  $Z_2$  ή σύνθετη αντίσταση αρνητικής ακολουθίας αντιστοιχεί στη φόρτιση με ένα αντίστροφο συμμετρικό σύστημα. Το σχήμα 1.9β δείχνει τη μέτρηση της  $Z_2$  με τριφασική πηγή αντίστροφης ακολουθίας των τάσεων. Από τη σύγκριση των σχημάτων 1.9α και 1.9β προκύπτει ότι για στοιχεία του δικτύου χωρίς στρεφόμενες μηχανές η ακολουθία των φάσεων δεν επηρεάζει την σύνθετη αντίσταση. Για σύγχρονες και ασύγχρονες μηχανές τα μεγέθη  $Z_1$  και  $Z_2$  είναι διαφορετικά, επειδή η περιστροφή του δρομέα προκαλεί διαφορετικές συνθήκες για το ευθύ και το αντίστροφο σύστημα.



Σχήμα 1.9. Μέτρηση συνθέτων αντιστάσεων συμμετρικών συνιστωσών

- α) Μέτρηση της ευθείας σύνθετης αντίστασης  $Z_1$
- β) Μέτρηση της αντίστροφης σύνθετης αντίστασης  $Z_2$
- γ) Μέτρηση της ομοπολικής σύνθετης αντίστασης  $Z_0$

Οι συνδέσεις με διακεκομμένη γραμμή προς γη στα σχήματα α) και β) δεν επηρεάζουν το αποτέλεσμα της μετρήσεως.

Μετασχηματιστές: 1) Εναέριες και υπόγειες γραμμές  $Z_1 = Z_2$

2) Σύγχρονες και ασύγχρονες μηχανές  $Z_1 \neq Z_2$

Η ομοπολική σύνθετη αντίσταση ισχύει για τη φόρτιση με ρεύματα του αυτού μεγέθους και της αυτής φασικής γωνίας. Στο σχήμα 1.9γ φαίνεται η μέτρηση της  $Z_0$ . Το άθροισμα των ρευμάτων  $3I_0$  ρέει εκτός των φάσεων του τριφασικού συστήματος δια των αγωγών γειώσεως και της γης. Συνεπώς ο τρόπος γειώσεως των κόμβων των μετασχηματιστών και των γεννητριών είναι αποφασιστικής σημασίας για το μέγεθος  $Z_0$ .

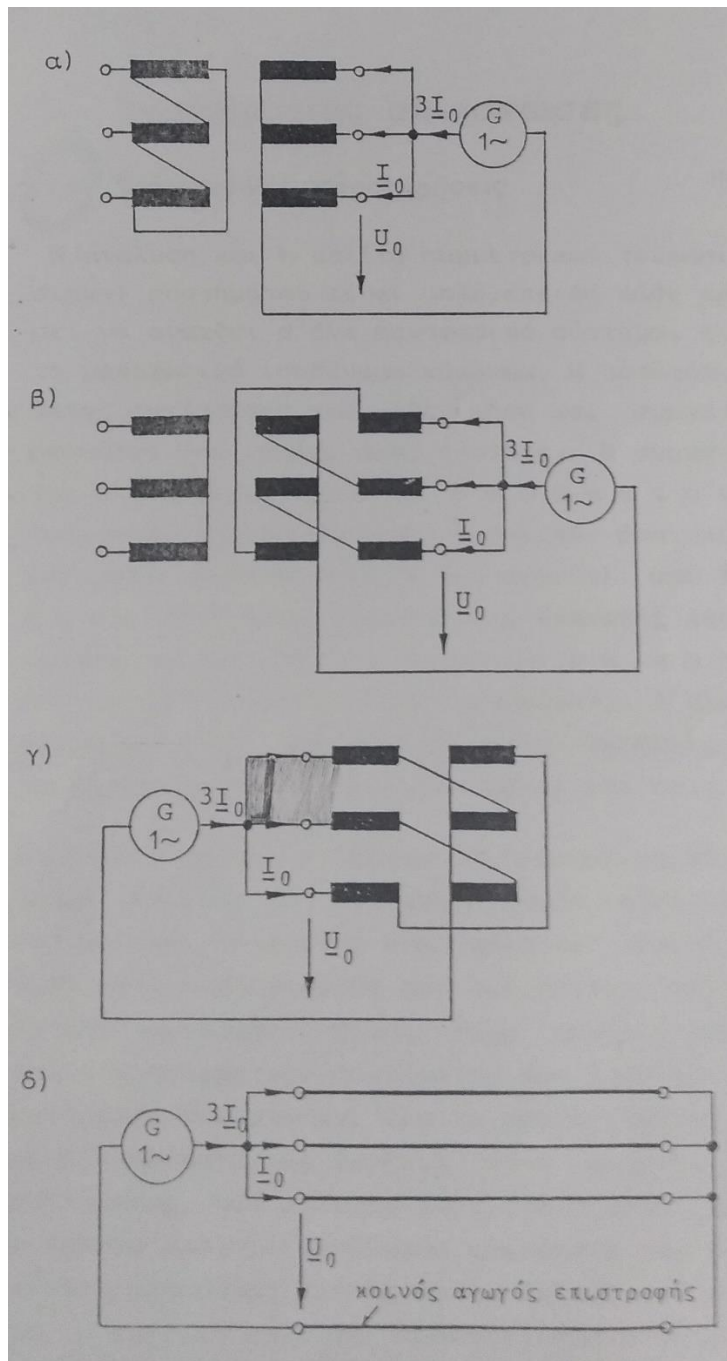
Συνήθως είναι:

$$Z_0 \neq Z_1 \text{ και } Z_0 \neq Z_2$$

Το σχήμα 1.10 δείχνει τον τρόπο μετρήσεως της ομοπολικής αντιστάσεως διαφόρων στοιχείων του δικτύου.

Η ομοπολική σύνθετη αντίσταση εναερίων γραμμών ή καλωδίων καθορίζεται σύμφωνα με το σχήμα 1.10δ. Η μονοφασική πηγή συνδέεται μεταξύ των τριών παράλληλα συνδεδεμένων αγωγών και του κοινού αγωγού επιστροφής, π.χ. αγωγών γειώσεως, ουδετέρου αγωγού, αγωγού ουδετερώσεως κ.τ.λ.. Ο κοινός αγωγός επιστροφής διαρέεται από το τριπλάσιο ομοπολικό ρεύμα.





Σχήμα 1.10. Μέτρηση της ομοπολικής αντιστάσεως διαφόρων στοιχείων του δικτύου.

- α) Μετασχηματιστής ζεύξεως  $D_y$ .
- β) Μετασχηματιστής ζεύξεως  $Y_z$ .
- γ) Πηνίο τεθλασμένου αστέρα για τον σχηματισμό ουδετέρου κόμβου.
- δ) Εναέρια γραμμή ή καλώδιο.

### 3.3:Πειραματικός Υπολογισμός

Στον Πειραματικό Υπολογισμό χρησιμοποιήσαμε μια Γεννήτρια Εναλλασόμενου Ρεύματος. Αρχικά κάναμε συνδεσμολογία για Αστέρα και Βραχυκυλώσαμε τον Δρομέα, αντί να δώσουμε τρεις συφασικές τάσεις δώσαμε μια τάση συφασική, τα συνδέσαμε παράλληλα δηλαδή τα γεφυρώσαμε, και στα τρία τυλίγματα της μηχανής και μετρήσαμε τάση και ρεύμα.

Μετρήσαμε στο 1V και βγάλαμε 0,75A, άρα  $R = \frac{1}{0,75} = 1,34\Omega$ .

Επομένως η αντιστάση που βγάλαμε είναι ίση με 1,34Ω.

Άρα η ομοπολική αντίσταση που υπολογίσαμε στην υπολογίσαμε στην Υψηλή Τάση Θεωρητικά είναι 3-4 φορές περίπου μεγαλύτερη από την Πειραματική ομοπολική αντίσταση.

### 3.4:Η Σημασία των συμμετρικών συνιστωσών

Όπως φανηκέ και από τις μετρήσεις μας, οι συμμετρικές συνιστώσες δεν απορρέουν μόνο από ένα μαθηματικό μετασχηματισμό, αλλά έχουν και φυσική υπόσταση. Το κάθε ένα των τριών συστημάτων 012 επενεργεί σε χαρακτηριστικές καταστάσεις:

- i. Στις τριφασικές στρεφόμενες μηχανές δρα το ευθύ σύστημα.
  - ii. Το αντίστροφο σύστημα προκαλεί στις σύγχρονες μηχανές ασύμμετρη φόρτιση και θερμική καταπόνηση των τυλιγμάτων αποσβέσεως και των πελμάτων των πόλων δινορεύματα. Στις ασύγχρονες μηχανές το αντίστροφο σύστημα προκαλεί ροπές πεδήσεως.
  - iii. Τα ομοπολικά ρεύματα έχουν μεγάλη επαγωγική επίδραση σε γειτονικά κυκλώματα και οι ομοπολικές τάσεις προκαλούν με ζωρητικές ζεύξεις τάσεις με γειτονικές γραμμές. Συνήθως στην περίπτωση σφαλμάτων με επαφή γης τα ομοπολικά ρεύματα και οι ομοπολικές τάσεις περιορίζονται στο τμήμα του δικτύου που εμφανίζει το σφάλμα και με τη μέτρηση των ομοπολικών μεγεθών μπορεί έτσι να καθορισθεί το τμήμα αυτό.
-

## Βιβλιογραφία

- [1] Πέτρος Ντοκόπουλος, “Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις Καταναλωτών”, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2005
- [2] ] Παντελής Β. Μαλατέστας, “Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας” 2η Έκδοση, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑΣ, 2016
- [3] Δ. Τσανάκα, “Ειδικά Κεφάλαια συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 1995
- [4] Λ. Οικονόμου, Δ. Καρβουνιάρη, Α. Μαλάμου, “Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Εκδόσεις Τζιόλας, 2015
- [5] Κ. Βουρνάς, Γ. Κοντάξης, “Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Εκδόσεις Συμμετρία, 2010
- [6] Ν. Α. Βοβός, Γαβριήλ Β. Γιαννακόπουλος, Ι. Μήλιας-Αργείτης, “Ανάλυση Κυκλωμάτων Ισχύος” 2η Έκδοση, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2020