

Νικόλαος Α. Βοβός

Καθηγητής Πανεπιστημίου

Γαβριήλ Β. Γιαννακόπουλος

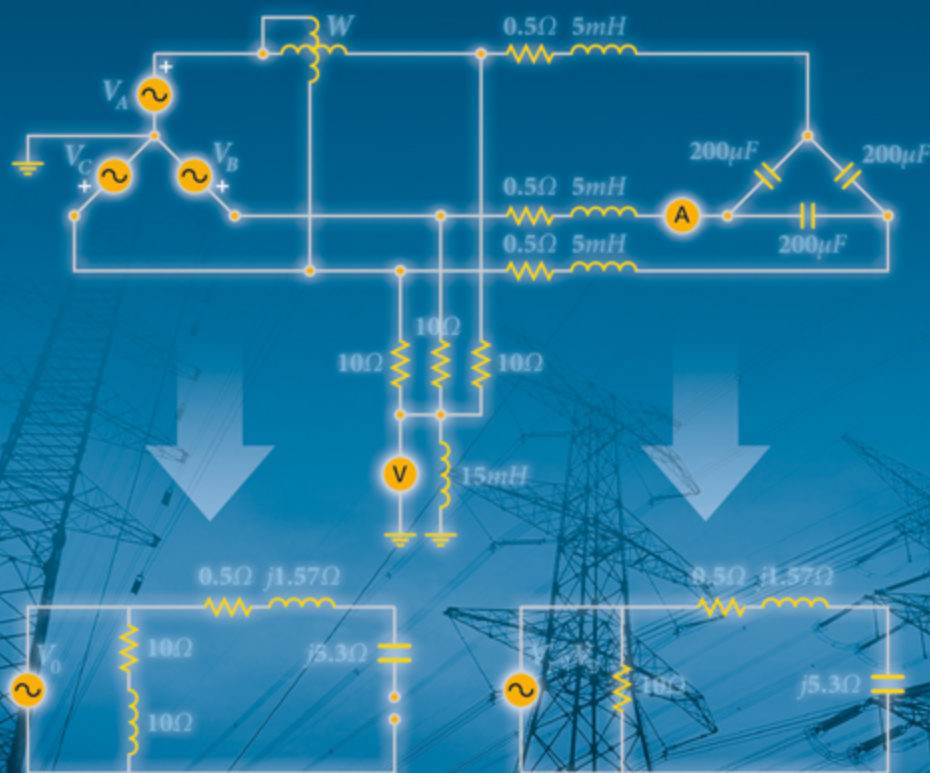
Καθηγητής Πανεπιστημίου

Ιωάννης Μήλιας-Αργείτης

Πανεπιστήμιο Πατρών

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών

# ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ



ISBN 978-960-456-361-6

© Copyright, Ιανουάριος 2013, Βοβός Α. Νικόλαος, Γιαννακόπουλος Β. Γαβριήλ,  
Μήλιας - Αργείτης Ιωάννης, Εκδόσεις Ζήτη

---

*Το παρόν έργο πνευματικής ιδιοκτησίας προστατεύεται κατά τις διατάξεις του ελληνικού νόμου (Ν.2121/1993 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει σήμερα) και τις διεθνείς συμβάσεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Απαγορεύεται απολύτως η άνευ γραπτής άδειας του εκδότη κατά οποιοδήποτε τρόπο ή μέσο αντιγραφή, φωτοανατύπωση και εν γένει αναπαραγωγή, εκμίσθωση ή δανεισμός, μετάφραση, διασκευή, αναμετάδοση στο κοινό σε οποιαδήποτε μορφή (ηλεκτρονική, μηχανική ή άλλη) και η εν γένει εκμετάλλευση του συνόλου ή μέρους του έργου.*

---

**Φωτοστοιχειοθεσία**

**Εκτύπωση**  
**Βιβλιοδεσία**

**Π. ΖΗΤΗ & Σια ΟΕ**

18<sup>ο</sup> χλμ Θεσσαλονίκης - Περαιάς  
Τ.Θ. 4171 • Περαιά Θεσσαλονίκης • Τ.Κ. 570 19  
Τηλ.: 2392.072.222 - Fax: 2392.072.229 • e-mail: info@ziti.gr



**ΕΚΔΟΣΕΙΣ**  
**ΖΗΤΗ**

**www.ziti.gr**

**ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ - ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΔΙΑΘΕΣΗ:**

Αρμενοπούλου 27 - 546 35 Θεσσαλονίκη • Τηλ.: 2310-203.720 • Fax 2310-211.305  
e-mail: sales@ziti.gr

**ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΑΘΗΝΩΝ - ΕΝΩΣΗ ΕΚΔΟΤΩΝ ΒΙΒΛΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ:**

Στοά του Βιβλίου (Πεσμαζόγλου 5) - 105 64 ΑΘΗΝΑ • Τηλ.-Fax: 210-3211.097

**ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ - ΑΠΟΘΗΚΗ ΑΘΗΝΩΝ:**

Χαριλάου Τρικoupη 22 - Τ.Κ. 106 79, Αθήνα • Τηλ.-Fax: 210-3816.650  
e-mail: athina@ziti.gr

**ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ:** [www.ziti.gr](http://www.ziti.gr)

## Πρόλογος

Το βιβλίο αυτό γράφτηκε για να καλύψει τις βασικές ανάγκες διδασκαλίας του μαθήματος Ανάλυση Κυκλωμάτων Ισχύος, που διδάσκεται στο 4<sup>ο</sup> εξάμηνο σπουδών του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών. Επειδή το μάθημα είναι υποχρεωτικό για όλους τους φοιτητές του Τμήματος έχει διπλό σκοπό. Να αποτελέσει το βασικό υπόβαθρο γνώσεων για την αποτελεσματικότερη κατανόηση των αντικειμένων που διδάσκονται στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, για τους φοιτητές που επιλέγουν αυτόν τον κύκλο σπουδών, ενώ για τους φοιτητές που επιλέγουν άλλους κύκλους σπουδών δίνει τις απαραίτητες γνώσεις για την επίλυση απλών κυκλωμάτων ισχύος.

Μία βασική επιδίωξη του βιβλίου είναι να διδάξει την κατανόηση του τρόπου που οι νέες γνώσεις συνδυάζονται με τις προηγούμενες στην επίλυση πρακτικών προβλημάτων, θεμελιώδες χαρακτηριστικό του αναδυόμενου ηλεκτρολόγου μηχανικού στα πρώτα έτη σπουδών. Επίσης επιδιώκεται η ανάπτυξη των ικανοτήτων των φοιτητών να λύνουν πρακτικά προβλήματα μέσα από την κατανόηση των εννοιών και όχι με τη χρήση μηχανιστικών τεχνικών. Η κατανόηση αυτής της πορείας επίλυσης προβλημάτων είναι προϋπόθεση για την αντιμετώπιση των μελλοντικών προκλήσεων που θα συναντήσει στις σπουδές του ο φοιτητής. Στην επίτευξη των προαναφερθέντων στόχων βασικό εργαλείο είναι και τα πολλά παραδείγματα που συνοδεύουν το κείμενο.

Το βιβλίο περιλαμβάνει πέντε κεφάλαια.

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μία εισαγωγική παρουσίαση των δύο βασικών επιλογών που χαρακτηρίζουν την λειτουργία των συστημάτων ισχύος, δηλαδή ότι είναι κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος και είναι τριφασικά. Ανακαλώντας ιστορικά στοιχεία και με τη βοήθεια παραδειγμάτων και αναλυτικών σχέσεων τεκμηριώνονται οι λόγοι που οδήγησαν σε αυτές τις επιλογές.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μία σύντομη ανασκόπηση βασικών εννοιών από τη θεωρία κυκλωμάτων που κρίνονται πολύ χρήσιμες για τον μηχανικό που ασχολείται με τα κυκλώματα ισχύος και γίνεται αναφορά στη μέθοδο που ακολουθούμε για την ανάλυση κυκλωμάτων εναλλασσόμενου ρεύματος στην μόνιμη ημιτονοειδή κατάσταση λειτουργίας. Εξηγείται, τέλος, η ανάλυση γραμμικού κυκλώματος με περιοδική μη ημιτονοειδή διέγερση.

Στο κεφάλαιο 3 εισάγονται οι έννοιες της πραγματικής και άεργου ισχύος σε μονοφασικά κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος καθώς και η έννοια της μιγαδικής ισχύος. Ορίζονται τα ισοδύναμα κυκλώματα καταναλωτών και εξηγείται αναλυτικά η τεχνική της αντιστάθμισης άεργου ισχύος. Συζητούνται, τέλος, θέματα ορισμού ισχύος παρουσία αρμονικών σε κυκλώματα με περιοδική μη ημιτονοειδή διέγερση.

Στο κεφάλαιο 4 αναλύονται τα τριφασικά συστήματα, που έχουν επικρατήσει στη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας από την παραγωγή στην κατανάλωση. Γίνεται ανάλυση όλων των τύπων φορτίων που τροφοδοτούνται από συμμετρικές τάσεις θετικής ή αρνητικής ακολουθίας. Το μονοφασικό ισοδύναμο συμμετρικού τριφασικού συστήματος χρησιμοποιείται ως βασική μέθοδος για την επίλυσή του. Εξηγείται ο τρόπος υπολογισμού και μέτρησης ισχύος σε τριφασικά κυκλώματα και το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με τους τρόπους προσδιορισμού της ακολουθίας των φάσεων.

Στο κεφάλαιο 5 αναλύονται με τη μέθοδο των συμμετρικών συνιστωσών συμμετρικά τριφασικά κυκλώματα που διεγείρονται από ασύμμετρες πηγές τάσης. Το κεφάλαιο είναι εισαγωγικό στην πρακτική εφαρμογή της μεθόδου που είναι στον υπολογισμό των ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων, όπου ένα συμμετρικό σύστημα γίνεται ασύμμετρο με το βραχυκύκλωμα, ενώ οι πηγές τάσης είναι συμμετρικές. Αναλύεται επίσης ο τρόπος προσδιορισμού των ακολουθιακών κυκλωμάτων στα ηλεκτρικά συστήματα και ο υπολογισμός της τριφασικής ισχύος με τη χρήση των συμμετρικών συνιστωσών.

Το βιβλίο αφιερώνεται στη μνήμη του αγαπημένου και πρόωρα χαμένου φίλου και συν-συγγραφέα Ιωάννη Μήλια - Αργεΐτη που μας λείπει πολύ. Με πολύ κόπο διαμόρφωσε την αρχική ύλη του μαθήματος με αρχικό τίτλο «Ενεργειακά Κυκλώματα» και εισηγήθηκε την εισαγωγή του στο πρόγραμμα σπουδών του Τμήματός μας.

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2012

Νικόλαος Α. Βοβός  
Γαβριήλ Β. Γιαννακόπουλος

## Περιεχόμενα

### Κεφάλαιο 1

#### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Χαρακτηριστικά των συστημάτων ισχύος.....	13
1.2	Η μάχη του εναλλασσόμενου ρεύματος εναντίον του συνεχούς ρεύματος.....	14
	Παράδειγμα 1.1 .....	15
	Παράδειγμα 1.2 .....	16
1.3	Γιατί τριφασικά συστήματα; .....	22
	Σύγκριση με βάση την τροφοδότηση ίδιου φορτίου .....	22
	Σύγκριση με βάση τη χρησιμοποίηση ίδιας ποσότητας αγωγίμου υλικού .....	24

### Κεφάλαιο 2

#### ΜΟΝΙΜΗ ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

2.1	Γενικά .....	31
2.2	Παραγωγή ημιτονοειδούς τάσης.....	31
2.3	Γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος .....	32
2.4	Η ημιτονοειδής κυματομορφή .....	36
	Παράδειγμα 2.1 .....	38
	Παράδειγμα 2.2 .....	39
2.5	Ενεργός η ενδεικνύομενη τιμή .....	40
2.6	Απόκριση κυκλώματος σε ημιτονοειδή διέγερση.....	42
2.7	Παράσταση ημιτονοειδούς συνάρτησης με φασικό διάνυσμα .....	44
	Παράδειγμα 2.3 .....	48
2.8	Πρόσθεση ημιτονοειδών συναρτήσεων της ίδιας συχνότητας.....	48
	Παράδειγμα 2.4 .....	50
2.9	Φασικά διανύσματα και νόμοι του Kirchhoff.....	50
2.10	Διανυσματικά διαγράμματα.....	51
2.11	Υπολογισμοί με μιγαδικούς αριθμούς.....	51
2.12	Σύνθετες αντιστάσεις και σύνθετες αγωγιμότητες των βασικών παθητικών στοιχείων.....	54
2.13	Σύνθετη αντίσταση και σύνθετη αγωγιμότητα αυθαίρετου παθητικού δικτύου δύο ακροδεκτών .....	58

2.13.1	Εν σειρά RL κύκλωμα.....	59
2.13.2	Εν σειρά RC κύκλωμα.....	60
2.13.3	Παράλληλο RL κύκλωμα.....	61
2.13.4	Παράλληλο RC κύκλωμα .....	62
2.13.5	Εν σειρά RLC κύκλωμα – Συντονισμός σειράς .....	63
2.13.6	Παράλληλο RLC κύκλωμα – Παράλληλος συντονισμός .....	65
2.14	Μεθοδολογία επίλυσης κυκλωμάτων εναλλασσόμενου ρεύματος στη μόνιμη ημιτονοειδή κατάσταση λειτουργίας .....	68
	Παράδειγμα 2.5 .....	68
	Παράδειγμα 2.6 .....	71
	Παράδειγμα 2.7 .....	72
2.15	Κυκλώματα με περιοδική διέγερση – Αρμονικές.....	74
2.15.1	Ανάλυση Fourier .....	74
	Παράδειγμα 2.8 .....	76
2.15.2	Ανάλυση γραμμικού κυκλώματος με περιοδική μη ημιτονοειδή διέγερση .....	76
	Παράδειγμα 2.8 .....	77

### Κεφάλαιο 3

#### ΙΣΧΥΣ ΣΕ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ

3.1	Γενικά.....	81
3.2	Ο θεμελιώδης τύπος της ηλεκτρικής ισχύος – Μορφές ηλεκτρικής ενέργειας.....	81
	Ενέργεια ηλεκτρικού πεδίου $w_{ef}$ .....	83
	Ενέργεια μαγνητικού πεδίου $w_{mf}$ .....	83
	Ωμική ή σπαταλούμενη ενέργεια $w_\Omega$ .....	84
3.3	Στιγμιαία ισχύς, πραγματική και άεργος ισχύς.....	84
	Παράδειγμα 3.1 .....	89
3.4	Ισχύς βασικών παθητικών στοιχείων.....	90
	Καθαρά ωμικά φορτία .....	90
	Καθαρά επαγωγικά φορτία.....	91
	Καθαρά χωρητικά φορτία .....	92
	Απορροφούμενη ενέργεια.....	93
	Στοιχεία L, C σε σειρά και εν παραλλήλω .....	94
3.5	Μιγαδική ισχύς .....	96
	Παράδειγμα 3.2 .....	101
	Παράδειγμα 3.3 .....	102
	Παράδειγμα 3.4 .....	103
	Παράδειγμα 3.5 .....	106

3.6	Ισοδύναμα κυκλώματα φορτίων.....	107
3.6.1	Φορτία σταθερής μιγαδικής ισχύος.....	107
	<i>Παράδειγμα 3.6</i> .....	110
3.6.2	Φορτία σταθερής σύνθετης αντίστασης.....	111
	Ισοδύναμο με παράλληλη σύνδεση στοιχείων.....	112
	Ισοδύναμο με εν σειρά σύνδεση στοιχείων .....	113
	<i>Παράδειγμα 3.7</i> .....	115
3.7	Αντιστάθμιση έργου ισχύος – Βελτίωση συντελεστή ισχύος.....	116
3.7.1	Προβλήματα σχετιζόμενα με την έργο ισχύ .....	116
3.7.2	Βελτίωση συντελεστή ισχύος .....	119
3.7.3	Υπολογισμός στοιχείου αντιστάθμισης .....	122
	Φορτίο σταθερής μιγαδικής ισχύος.....	122
	Φορτίο σταθερής σύνθετης αντίστασης .....	123
	<i>Παράδειγμα 3.8</i> .....	125
	<i>Παράδειγμα 3.9</i> .....	129
3.8	Ροή ισχύος μέσω διασυνδετικής γραμμής μεταφοράς μικρού μήκους .....	131
	<i>Παράδειγμα 3.10</i> .....	134
3.9	Ισχύς σε κυκλώματα με περιοδική μη ημιτονοειδή διέγερση .....	136
	<i>Παράδειγμα 3.11</i> .....	141
	<i>Παράδειγμα 3.12</i> .....	142

## Κεφάλαιο 4

### ΤΡΙΦΑΣΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

4.1	Εισαγωγή.....	143
4.2	Διφασικό σύστημα τάσεων .....	144
4.3	Τριφασικό σύστημα τάσεων.....	145
4.3.1	Παραστατικοί μιγάδες τριφασικών συστημάτων τάσεων.....	149
4.4	Συμμετρικά τριφασικά φορτία.....	151
4.4.1	Τριφασικό ABC σύστημα τριών αγωγών τροφοδοτεί συμμετρικό τριφασικό επαγωγικό φορτίο συνδεδεμένο σε τρίγωνο.....	151
	<i>Παράδειγμα 4.1</i> .....	153
4.4.2	Τριφασικό CBA σύστημα τεσσάρων αγωγών τροφοδοτεί συμμετρικό τριφασικό χωρητικό φορτίο συνδεδεμένο σε αστέρα.....	155
	<i>Παράδειγμα 4.2</i> .....	156
4.5	Μονοφασικό ισοδύναμο συμμετρικού τριφασικού φορτίου.....	158
4.5.1	Ορισμός των παραμέτρων τετράπολων .....	158
4.5.2	Μετασχηματισμός τριγώνου σε αστέρα .....	161
4.6	Μονοφασικό ισοδύναμο συμμετρικού τριφασικού κυκλώματος .....	163
	<i>Παράδειγμα 4.3</i> .....	166

<i>Παράδειγμα 4.4</i> .....	167
<i>Παράδειγμα 4.5</i> .....	169
4.7 Ασύμμετρα τριφασικά φορτία.....	170
4.7.1 Ασύμμετρο τριφασικό φορτίο συνδεδεμένο σε τρίγωνο .....	171
<i>Παράδειγμα 4.6</i> .....	172
4.7.2 Ασύμμετρο τετρασυρματικό φορτίο συνδεδεμένο σε αστέρα.....	173
<i>Παράδειγμα 4.7</i> .....	174
4.7.3 Ασύμμετρο φορτίο τριών αγωγών συνδεδεμένο σε αστέρα .....	175
<i>Παράδειγμα 4.8</i> .....	177
<i>Παράδειγμα 4.9</i> .....	180
<i>Παράδειγμα 4.10</i> .....	181
4.8 Υπολογισμός ισχύος σε τριφασικά κυκλώματα.....	183
4.8.1 Ισχύς σε συμμετρικά τριφασικά φορτία .....	183
4.8.1.1 Φορτίο συνδεδεμένο σε τρίγωνο .....	183
4.8.1.2 Φορτίο συνδεδεμένο σε αστέρα.....	184
Γενικό συμπέρασμα για συμμετρικό τριφασικό φορτίο.....	185
4.8.2 Ισχύς σε ασύμμετρα τριφασικά φορτία .....	186
4.8.2.1 Ασύμμετρο τριφασικό φορτίο τεσσάρων αγωγών συνδεδεμένο σε αστέρα.....	186
4.8.2.2 Ασύμμετρο τριφασικό φορτίο τριών αγωγών συνδεδεμένο σε αστέρα.....	187
4.8.2.3 Ασύμμετρο τριφασικό φορτίο συνδεδεμένο σε τρίγωνο.....	187
4.8.3 Στιγμαία ισχύς σε συμμετρικά τριφασικά κυκλώματα .....	188
4.9 Διόρθωση συντελεστή ισχύος .....	190
<i>Παράδειγμα 4.11</i> .....	191
<i>Παράδειγμα 4.12</i> .....	194
<i>Παράδειγμα 4.13</i> .....	198
4.10 Μέτρηση της τριφασικής ισχύος.....	201
4.10.1 Επαγωγικό βαττόμετρο.....	201
4.10.2 Ηλεκτροδυναμικό βαττόμετρο .....	203
4.10.3 Σύμβολα και σύνδεση βαττόμετρων.....	204
4.11 Η μέθοδος των δύο βαττόμετρων (Διάταξη ARON) .....	207
4.11.1 Ασύμμετρα φορτία .....	209
4.11.1.1 Ασύμμετρο τριφασικό φορτίο συνδεδεμένο σε τρίγωνο.....	209
4.11.1.2 Ασύμμετρο τριφασικό φορτίο τριών αγωγών συνδεδεμένο σε αστέρα.....	210
4.11.2 Συμμετρικά φορτία.....	212
4.11.2.1 Συμμετρικό τριφασικό φορτίο συνδεδεμένο σε τρίγωνο.....	212
4.11.2.2 Συμμετρικό φορτίο τριών αγωγών συνδεδεμένο σε αστέρα.....	213
<i>Παράδειγμα 4.14</i> .....	216
<i>Παράδειγμα 4.15</i> .....	220
<i>Παράδειγμα 4.16</i> .....	221



<i>Παράδειγμα 4.17</i> .....	222
<i>Παράδειγμα 4.18</i> .....	224
4.12 Προσδιορισμός της ακολουθίας των φάσεων .....	228
<i>Παράδειγμα 4.19</i> .....	234
4.13 Περίληψη.....	237
<i>Προβλήματα</i> .....	239

## **Κεφάλαιο 5**

### **ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΕΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ**

5.1 Εισαγωγή.....	247
5.2 Μετασχηματισμός συμμετρικών συνιστωσών .....	248
5.3 Ρεύμα ουδετέρου .....	252
<i>Παράδειγμα 5.1</i> .....	253
<i>Παράδειγμα 5.2</i> .....	253
5.4 Ακολουθιακές μιγαδικές αντιστάσεις και ακολουθιακά δίκτυα .....	254
5.5 Ακολουθιακά κυκλώματα φορτίων .....	255
5.5.1 Σταθερής μιγαδικής αντίστασης, συμμετρικό τριφασικό φορτίο συνδεδεμένο σε Υ γειωμένο .....	255
<i>Παράδειγμα 5.3</i> .....	259
<i>Παράδειγμα 5.4</i> .....	261
5.5.2 Γενικό τριφασικό φορτίο συμμετρικό ή μη .....	263
<i>Παράδειγμα 5.5</i> .....	264
5.6 Ακολουθιακά κυκλώματα μιγαδικών αντιστάσεων σειράς.....	265
<i>Παράδειγμα 5.6</i> .....	267
<i>Παράδειγμα 5.7</i> .....	270
<i>Παράδειγμα 5.8</i> .....	272
5.7 Σύνοψη των βημάτων για λύση κυκλωμάτων με τη μέθοδο των συμμετρικών συνιστωσών .....	274
5.8 Τριφασική ισχύς συναρτήσει συμμετρικών συνιστωσών.....	274
<i>Παράδειγμα 5.9</i> .....	275
5.9 Ορισμός της μήτρας μετασχηματισμού.....	276
<i>Παράδειγμα 5.10</i> .....	277
5.10 Περίληψη.....	279
<i>Προβλήματα</i> .....	280
 <i>Βιβλιογραφία</i> .....	285
<i>Ευρετήριο Όρων</i> .....	287



## 1.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

Κατά την ανάπτυξη των συστημάτων ισχύος έγιναν κάποιες επιλογές που χαρακτηρίζουν την λειτουργία τους. Κάποιες από αυτές τις επιλογές ήταν βασικές, ενώ κάποιες άλλες ήταν απόρροια των βασικών αυτών επιλογών. Είναι κοινά αποδεκτό ότι δύο ήταν οι βασικές επιλογές για τα συστήματα ισχύος, τις οποίες και θα εξηγήσουμε στη συνέχεια:

- Να είναι κυκλώματα *εναλλασσόμενου ρεύματος* (ΕΡ), παρόλο που ξεκίνησαν ως κυκλώματα *συνεχούς ρεύματος* (ΣΡ).
- Να είναι κυκλώματα *τριφασικά*, αν και στα χαμηλά επίπεδα τάσης στο επίπεδο διανομής είναι και μονοφασικά.

Αποτέλεσμα της πρώτης επιλογής είναι ότι και οι τρεις βασικές λειτουργίες των συστημάτων ισχύος, δηλαδή η *παραγωγή*, η *μεταφορά* και η *διανομή* της ηλεκτρικής ενέργειας, γίνονται ουσιαστικά υπό συνθήκες μόνιμης ημιτονοειδούς κατάστασης σταθερής συχνότητας. Επίσης, λόγω της δυνατότητας λειτουργίας μετασχηματιστών, τα συστήματα ισχύος αποτελούνται από πολλά τμήματα που λειτουργούν σε διαφορετικά επίπεδα τάσης.

Αποτέλεσμα της δεύτερης επιλογής είναι ότι η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις με οικονομικό τρόπο αφού συνήθως τα κέντρα κατανάλωσής της απέχουν πολύ από τους σταθμούς παραγωγής.

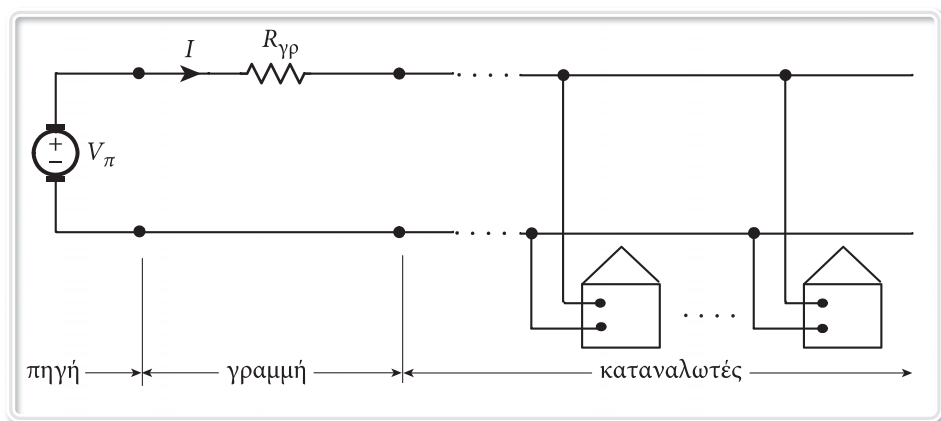
Ένα, τέλος, χαρακτηριστικό των συστημάτων ισχύος που έχει να κάνει με την δυσκολία ανάλυσής τους είναι ότι αυτά είναι μεγάλα σε μέγεθος και *πολύπλοκα* λόγω του μεγάλου αριθμού των συνιστωσών που έχουν, όπως γεννήτριες, γραμμές μεταφοράς και μετασχηματιστές. Απαιτούν, συνεπώς, ειδικές μεθοδολογίες ανάλυσης, όπου εκτός από τις τάσεις και τα ρεύματα, που είναι τα βασικά μεγέθη που συνήθως ζητούνται να υπολογιστούν σε αυτά, μας ενδιαφέρει και ο υπολογισμός της ισχύος που διακινείται σε αυτά.

## 1.2 Η ΜΑΧΗ ΤΟΥ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΕΝΑΝΤΙΟΝ ΤΟΥ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

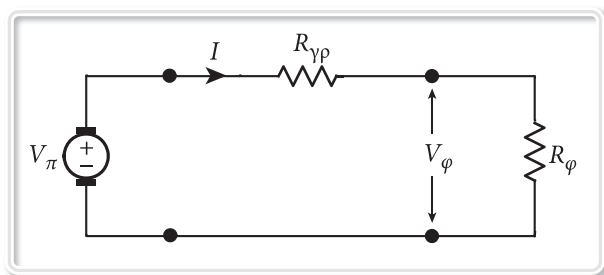
Αυτό που ιστορικά ονομάστηκε η «μάχη» μεταξύ συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος και συστημάτων συνεχούς ρεύματος, ήταν στην ουσία μία αντιπαράθεση επιστημονική αλλά και επιχειρηματική δύο πρωτοπόρων εφευρετών στα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα, του *Thomas Edison* (1847-1931) και του *Nikola Tesla* (1856-1943).

Ο *Thomas Edison*, που εκτός από λαμπρός εφευρέτης ήταν επίσης και ταλαντούχος επιχειρηματίας, εγκατέστησε στην πόλη της Νέας Υόρκης το πρώτο πλήρες ηλεκτρικό σύστημα, που αποτελείτο από γεννήτρια, καλώδιο, ασφάλεια, μετρητή και φορτία. Ήταν ο ιστορικός σταθμός της *Pearl Street* που τέθηκε σε λειτουργία το 1882. Η ηλεκτρική ενέργεια που παραγόταν πουλιόταν σε καταναλωτές που την χρησιμοποιούσαν βασικά για φωτισμό με λαμπτήρες πυρακτώσεως που εκείνη την εποχή αντικαθιστούσαν τις λυχνίες πετρελαίου, οι οποίες με την κάπνα που εξέπεμπαν προκαλούσαν ανεπιθύμητες αναθυμιάσεις και ρύπανση. Το σύστημα του *Edison* είχε την μορφή του Σχ. 1.1. Ο σταθμός που δημιουργήθηκε χρησιμοποιούσε μία γεννήτρια συνεχούς ρεύματος 100 V και τροφοδοτούσε με ηλεκτρική ενέργεια ένα σύνολο καταναλωτών που εκτείνονταν σε μία περιοχή ακτίνας 1.5 km. Μία απλή παράσταση του συστήματος συνεχούς ρεύματος του *Edison* φαίνεται στο Σχ. 1.2.

Το σύστημα αυτό αντιμετώπισε δύο πολύ σοβαρά προβλήματα που είχαν να κάνουν με το πόσοι καταναλωτές θα μπορούσαν να τροφοδοτηθούν κατά τρόπο



Σχήμα 1.1 Η μορφή του συστήματος συνεχούς ρεύματος του Edison.



Σχήμα 1.2 Απλή παράσταση του συστήματος του Edison.

αποδεκτό από συγκεκριμένη πηγή τάσης και μέχρι ποιά απόσταση από την πηγή.

Το πρώτο πρόβλημα ήταν αποτέλεσμα της αυξανόμενης ζήτησης. Καθώς περισσότεροι καταναλωτές επιθυμούσαν να τροφοδοτηθούν με ηλεκτρική ενέργεια, η γραμμή μεταφοράς μετέφερε μεγαλύτερα ρεύματα που με τη σειρά τους προκαλούσαν μεγάλες πτώσεις τάσης κατά μήκος των αγωγών, μειώνοντας, έτσι, την τάση τροφοδοσίας των καταναλωτών  $V_\varphi$ . Με αναφορά το Σχ. 1.2, η τάση τροφοδοσίας καταναλωτών προκύπτει:

$$V_\varphi = IR_\varphi = \frac{V_\pi}{R_\varphi + R_{\gamma\rho}} R_\varphi = \frac{V_\pi}{1 + (R_{\gamma\rho} / R_\varphi)} \quad (1.1)$$

Επειδή περισσότεροι καταναλωτές σημαίνει περισσότερες αντιστάσεις φορτίου συνδεδεμένες παράλληλα, η συνολική αντίσταση φορτίου  $R_\varphi$  μειώνεται όταν περισσότεροι καταναλωτές συνδέονται στο σύστημα. Όπως φαίνεται από τη σχέση (1.1), αυτό προκαλεί αύξηση του παρονομαστή και συνεπώς μείωση της τάσης τροφοδοσίας του φορτίου  $V_\varphi$ . Για να κρατηθεί η τάση τροφοδοσίας του φορτίου, συνεπώς, σε επιθυμητά επίπεδα, θα έπρεπε να περιοριστεί ο αριθμός των καταναλωτών που εξυπηρετούνταν από την συγκεκριμένη γραμμή μεταφοράς.

Το δεύτερο πρόβλημα ήταν αποτέλεσμα της εξάρτησης της πτώσης τάσης κατά μήκος της γραμμής και από την αντίσταση της γραμμής. Η πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής θα μπορούσε να μειωθεί αν μειωνόταν η αντίσταση της γραμμής  $R_{\gamma\rho}$ , που, ως γνωστό, δίνεται από τη σχέση:

$$R_{\gamma\rho} = \rho \frac{l}{A} \quad (1.2)$$

όπου  $\rho$  η ειδική αντίσταση του αγωγού της γραμμής σε  $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$  που εξαρτάται

από το υλικό του αγωγού,  $A$  η διατομή του αγωγού σε  $\text{mm}^2$  και  $l$  το μήκος του αγωγού σε  $\text{m}$ .

Όπως φαίνεται από τη σχέση (1.2), η μείωση της αντίστασης γραμμής που αποτελείται από συγκεκριμένο υλικό (δεδομένο  $\rho$ ) μπορεί να γίνει είτε μειώνοντας το μήκος  $l$  της γραμμής είτε αυξάνοντας τη διατομή  $A$  αυτής. Για αγωγούς δεδομένης διατομής, η μείωση της αντίστασης γραμμής επιτυγχάνεται με μείωση του μήκους αυτής. Για να κρατηθεί η τάση τροφοδοσίας του φορτίου, συνεπώς, σε επιθυμητά επίπεδα, δεν θα έπρεπε να τροφοδοτηθούν καταναλωτές πέραν μίας κρίσιμης απόστασης.

Τα παραδείγματα που ακολουθούν διευκρινίζουν πλήρως τα προβλήματα που αντιμετώπιζε το σύστημα ισχύος του Σχ. 1.2.

### Παράδειγμα 1.1

Στο σύστημα ισχύος του Σχ. 1.2, η τάση της πηγής συνεχούς ρεύματος είναι  $V_\pi = 100 \text{ V}$  και η αντίσταση της γραμμής  $R_{\gamma\rho} = 0.5 \text{ }\Omega$ . Από το σύστημα τροφοδοτούνται  $\kappa = 180$  όμοιοι καταναλωτές που ο καθένας εισάγει αντίσταση  $R_\kappa = 360 \text{ }\Omega$ . Να υπολογιστούν:

- α) Η τάση τροφοδοσίας του φορτίου.
- β) Η αντίσταση φορτίου που δεν θα προκαλεί μείωση της τάσης τροφοδοσίας του φορτίου μεγαλύτερη του 10% της τάσης πηγής.
- γ) Πόσοι καταναλωτές μπορούν να τροφοδοτηθούν σε αυτήν την περίπτωση;

**Λύση:**

- α) Η συνολική αντίσταση φορτίου των 180 καταναλωτών προκύπτει συνδέοντας παράλληλα 180 αντιστάσεις των  $360 \text{ }\Omega$  η κάθε μία. Η αντίσταση αυτή είναι:

$$R_\varphi = \frac{R_\kappa}{\kappa} = \frac{360}{180} = 2 \text{ }\Omega.$$

Από τη σχέση (1.1) προκύπτει:

$$V_\varphi = \frac{V_\pi}{1 + (R_{\gamma\rho} / R_\varphi)} = \frac{100}{1 + (0.5/2)} = 80 \text{ V}$$

Η τάση τροφοδοσίας του φορτίου, δηλαδή, είναι το  $80/100 = 80 \%$  της τάσης της πηγής.

- β) Αν είναι επιθυμητό η τάση τροφοδοσίας του φορτίου να είναι το 90% της τά-

σης πηγής, δηλαδή  $V_\varphi = 0.9V_\pi$ , τότε από τη σχέση (1.1) αν λύσουμε ως προς την αντίσταση φορτίου λαμβάνουμε:

$$R_\varphi = \frac{R_{\gamma\rho}}{\frac{V_\pi}{V_\varphi} - 1} = \frac{0.5}{\frac{1}{0.9} - 1} = 4.5 \, \Omega$$

γ) Παρατηρούμε ότι η αντίσταση φορτίου αυξάνεται και γίνεται 4.5 Ω. Οι καταναλωτές που μπορεί να τροφοδοτηθούν είναι, πλέον, λιγότεροι, δηλαδή:

$$\kappa = \frac{R_\kappa}{R_\varphi} = \frac{360}{4.5} = 80 \text{ καταναλωτές.}$$

### Παράδειγμα 1.2

Στο σύστημα ισχύος του Σχ. 1.2, η τάση της πηγής συνεχούς ρεύματος είναι  $V_\pi = 100 \text{ V}$  και η συνολική αντίσταση φορτίου  $R_\varphi = 1 \, \Omega$ . Να υπολογιστεί το μήκος που πρέπει να έχει η γραμμή μεταφοράς ώστε να μην προκαλείται μείωση της τάσης τροφοδοσίας του φορτίου μεγαλύτερη του 10% της τάσης πηγής.

Η γραμμή μεταφοράς είναι από χαλκό και έχει διάμετρο 3 cm. Η ειδική αντίσταση του χαλκού είναι  $\rho_{Cu} = 0.01673 \, \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ .

#### Λύση:

Από τη σχέση (1.1) αν λύσουμε ως προς  $R_{\gamma\rho}$  λαμβάνουμε:

$$R_{\gamma\rho} = R_\varphi \left( \frac{V_\pi}{V_\varphi} - 1 \right) = 1 \times \left( \frac{1}{0.9} - 1 \right) = 0.111 \, \Omega$$

Το μήκος του αγωγού υπολογίζεται από τη σχέση (1.2) ως εξής:

$$l = \frac{AR_{\gamma\rho}}{\rho_{Cu}} = \frac{(\pi r^2)R_{\gamma\rho}}{\rho_{Cu}} = \frac{(\pi \times 15^2) \times 0.111}{0.01673} = 4687.5 \text{ m}$$

Γραμμή μήκους μεγαλύτερου από 4.69 km θα προκαλέσει μείωση της τάσης φορτίου πάνω από το 10% της τάσης πηγής.

Για να ξεπεραστούν τα προβλήματα που αναφέρθηκαν, προτάθηκαν οι εξής τρεις λύσεις:

1. Μείωση της αντίστασης της γραμμής μεταφοράς αυξάνοντας τη διατομή της.

Αυτή η λύση ήταν ακριβή διότι:

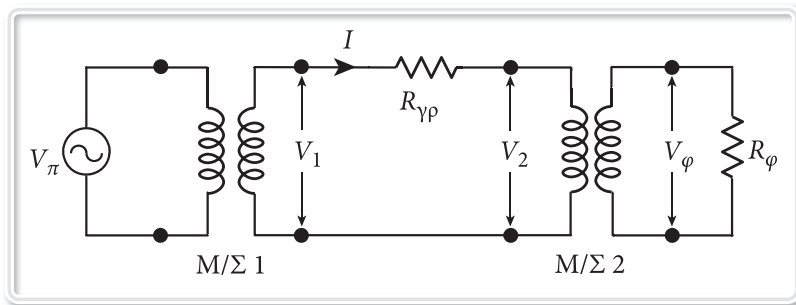
- α) Αγωγοί με μεγαλύτερη διατομή κοστίζουν περισσότερο.
  - β) Οι αγωγοί μεγαλύτερης διατομής είναι βαρύτεροι και έχουν μεγαλύτερο κόστος όδευσης και ανάρτησης.
2. Εγκατάσταση περισσότερων αγωγών για την τροφοδοσία περιοχών με υψηλή ζήτηση ισχύος, λύση που είχε επίσης μεγάλο κόστος.
  3. Εγκατάσταση σταθμών παραγωγής σε κάθε γειτονιά, λύση καθόλου πρακτική και επί πλέον πολύ ακριβή.

Ο *Edison* ήρθε αντιμέτωπος με την πρώτη πραγματική τεχνική πρόκληση στον σχεδιασμό και λειτουργία συστημάτων ισχύος. Αναζήτησε όλες τις πιθανές λύσεις από οποιονδήποτε θα μπορούσε να τον βοηθήσει. Αυτός ήταν άλλωστε ο λόγος που προσέλαβε τον *Nikola Tesla* στο εργαστήριό του και του υποσχέθηκε προσοδοφόρα μπόνους στην περίπτωση που θα του έλυνε αυτό το πρόβλημα.

Ο *Tesla* από την πρώτη στιγμή κατάλαβε ότι το πρόβλημα σχετίζεται με την χαμηλή τάση (100 V) που χρησιμοποιούσε ο *Edison* στο σύστημά του. Η βιώσιμη εναλλακτική λύση θα ήταν να αυξηθεί η τάση τροφοδοσίας της πηγής συνεχούς ώστε να μειωθεί το ρεύμα δια της γραμμής και συνακόλουθα να μειωθεί η πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής. Επειδή η ισχύς που καταναλώνεται από το φορτίο είναι το γινόμενο της τάσης επί το ρεύμα (σύμφωνα με τη σχέση  $P = VI$ ), μία αύξηση της τάσης της πηγής προκαλεί μία μείωση του ρεύματος. Η πτώση τάσης  $IR_{\gamma\rho}$  κατά μήκος της γραμμής μειώνεται και η τάση τροφοδοσίας του φορτίου  $V_{\phi} = V_{\pi} - IR_{\gamma\rho}$  είναι ένα μεγαλύτερο ποσοστό της τάσης πηγής. Αν και όλα αυτά ήταν απολύτως λογικά, η ρύθμιση της τάσης σε συστήματα συνεχούς ρεύματος ήταν μία τεχνολογία άγνωστη εκείνη την εποχή.

Αντί του συστήματος συνεχούς ρεύματος, ο *Tesla* πρότεινε μία εντελώς διαφορετική ιδέα. Από νωρίς στην ζωή του είχε συλλάβει την ιδέα του εναλλασσόμενου ρεύματος που ήθελε να το χρησιμοποιήσει για να παράγει στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που θα μπορούσε να περιστρέψει κινητήρες. Ήταν ενήμερος, επίσης, για μία συσκευή, που πρόσφατα είχε ανακαλυφθεί, η οποία μπορούσε να ρυθμίζει τις εναλλασσόμενες τάσεις. Η συσκευή αυτή τελειοποιήθηκε αργότερα από τον ίδιο και έγινε ο γνωστός σήμερα μετασχηματιστής. Ο μετασχηματιστής απαιτεί μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία που να συζευγνύουν τα δύο του τυλίγματα. Ήταν, συνεπώς, σχεδιασμένος για εναλλασσόμενες κυματομορφές και αναποτελεσματικός για συστήματα συνεχούς ρεύματος.

Ο *Tesla* συνένωσε αυτές τις ποικίλες τεχνολογίες σε μία νέα σχεδίαση του συστήματος ισχύος βασισμένη στο εναλλασσόμενο ρεύμα, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.3. Η πηγή τάσης στο προτεινόμενο σύστημα ήταν μία γεννήτρια εναλλασσό-



Σχήμα 1.3 Η δομή του προταθέντος από τον Tesla συστήματος.

μενου ρεύματος χαμηλής εν γένει τάσης. Ο μετασχηματιστής 1 χρησιμοποιήθηκε για να ανυψώσει την τάση στην αρχή της γραμμής μεταφοράς στην τιμή  $V_1$ . Η υψηλή τάση στην γραμμή είχε ως αποτέλεσμα μείωση του ρεύματος δια αυτής. Η πτώση τάσης, συνεπώς,  $IR_{\gamma\rho}$  κατά μήκος της γραμμής μειώθηκε. Στην πλευρά των καταναλωτών, η υψηλή τάση της γραμμής μεταφοράς  $V_2$  μειώθηκε με τον μετασχηματιστή 2 σε ένα επίπεδο  $V_\phi$  ασφαλές για οικιακή χρήση.

Τέσσερα ήταν τα κύρια πλεονεκτήματα του προταθέντος από τον Tesla συστήματος:

1. Η ισχύς στα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος μπορεί να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις υπό μικρό ρεύμα, με μειωμένες απώλειες μεταφοράς, μικρή πτώση τάσης στις γραμμές μεταφοράς και μειωμένη διατομή των αγωγών των γραμμών.
2. Δεν απαιτείται η εγκατάσταση σταθμών παραγωγής κοντά σε κατοικημένες περιοχές.
3. Τα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος μπορούν να δημιουργήσουν στρεφόμενα μαγνητικά πεδία για τη λειτουργία των ηλεκτρικών κινητήρων που είναι η πλειονότητα των ηλεκτρικών φορτίων.
4. Η τάση του συστήματος εναλλασσόμενου ρεύματος μπορεί να αυξηθεί σε υψηλά επίπεδα και να ρυθμιστεί με τους μετασχηματιστές που είναι απλές συσκευές.

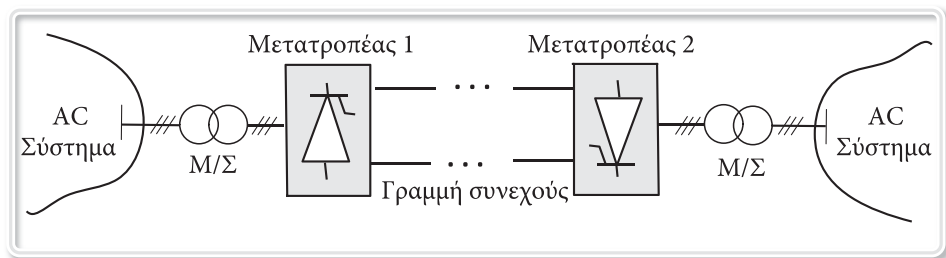
Ο Edison δεν εντυπωσιάστηκε από το σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος του Tesla εξαιτίας των επικίνδυνων αγωγών υψηλής τάσης που θα έπρεπε να οδεύσουν δια μέσου κατοικημένων περιοχών. Οι περισσότεροι ιστορικοί, πάντως, πιστεύουν ότι ο Edison απέρριψε την ιδέα του Tesla επειδή εφαρμογή της ιδέας θα απαζίωνε μεγάλα ποσά που είχαν επενδυθεί από αυτόν σε υποδομές που στηρίζονταν στο σύστημα συνεχούς ρεύματος. Η διαφωνία αυτή δημιούργησε ανε-



πανόρθωτο ρήγμα μεταξύ των δύο μεγάλων επιστημόνων. Ο *Tesla* εγκατέλειψε τα εργαστήρια του *Edison* και εργάστηκε στην συνέχεια για τον *Westinghouse*.

Παρά τις αθέμιτες πολλές φορές μεθόδους που χρησιμοποίησε ο *Edison* για να επιχειρηματολογήσει εναντίον του εναλλασσόμενου ρεύματος, επικαλούμενος τους κινδύνους για την ασφάλεια των καταναλωτών που αυτό συνεπάγεται λόγω της υψηλής τάσης των αγωγών, δεν χρειάστηκε και πολύς χρόνος για να αναγνωριστούν τα εμφανή πλεονεκτήματα του εναλλασσόμενου έναντι του συνεχούς ρεύματος, ώστε τελικά αυτό να επικρατήσει και να καθιερωθεί παγκοσμίως ως πρότυπο.

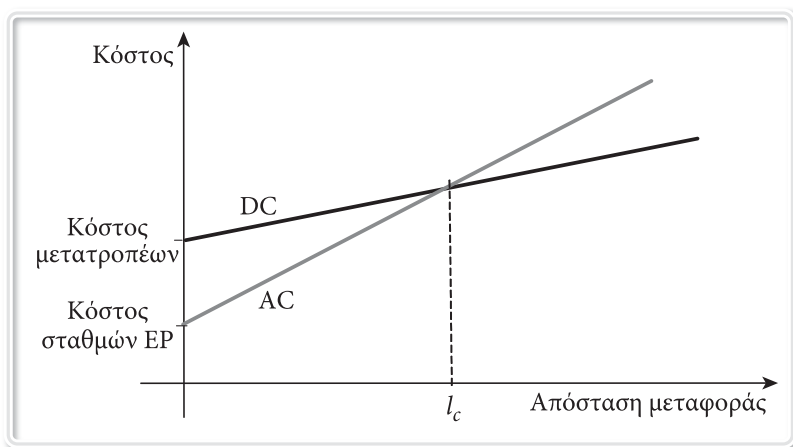
Στις ημέρες μας, υπάρχουν συσκευές ηλεκτρονικών ισχύος που καθιστούν δυνατή την μετατροπή ΕΡ σε ΣΡ, ΣΡ σε ΕΡ και ΣΡ σε ΣΡ με υψηλό βαθμό αποδοτικότητας και το εμπόδιο της μεταβολής των επιπέδων τάσης σε συστήματα συνεχούς ρεύματος έχει πλέον εκλείψει. Η μεταφορά με συνεχές ρεύμα επανήλθε υπό τη μορφή μεταφοράς με συνεχές ρεύμα υψηλής τάσης (High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission) και χρησιμοποιείται συμπληρωματικά προς την μεταφορά με εναλλασσόμενο ρεύμα. Μία διασύνδεση συνεχούς ρεύματος, η δομή της οποίας δείχνεται στο Σχ. 1.4, απαιτεί την εγκατάσταση *σταθμών μετατροπής* σε κάθε της άκρο. Ο κύριος εξοπλισμός ενός σταθμού μετατροπής είναι ο μετασχηματιστής (Μ/Σ) και οι *βαλβίδες* θυρίστορ. Στο άκρο αναχώρησης οι βαλβίδες θυρίστορ δρουν ως *ανορθωτές* για να μετατρέψουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές το οποίο μεταφέρεται μέσω της διασύνδεσης. Στο άκρο άφιξης οι βαλβίδες θυρίστορ δρουν ως *αντιστροφείς* για να μετατρέψουν το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο. Κάθε σταθμός μετατροπής μπορεί να λειτουργήσει ως ανορθωτής ή ως αντιστροφέας, επιτρέποντας έτσι τη μεταφορά ισχύος και προς τις δύο κατευθύνσεις.



**Σχήμα 1.4** Η δομή μίας διασύνδεσης συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης.

Τι είναι αυτό που καθορίζει την επιλογή μεταφοράς με εναλλασσόμενο ή συνεχές ρεύμα; Φυσικά, τον σπουδαιότερο ρόλο τον παίζουν οι χρηματοοικονομικές ε-

πενδύσεις. Το κόστος μεταφοράς με συνεχές ρεύμα πέραν μίας ορισμένης απόστασης είναι *μικρότερο* από το κόστος μεταφοράς με εναλλασσόμενο ρεύμα, διότι η μεταφορά με συνεχές απαιτεί δύο αγωγούς ενώ η τριφασική μεταφορά με εναλλασσόμενο ρεύμα απαιτεί τρεις αγωγούς. Από την άλλη πλευρά, όμως, οι μετατροπείς που απαιτούνται για την μετατροπή από ΕΡ σε ΣΡ στην μία πλευρά και από ΣΡ σε ΕΡ στην άλλη πλευρά μίας γραμμής μεταφοράς με συνεχές ρεύμα κοστίζουν περισσότερο από ότι κοστίζουν οι απλοί τερματικοί σταθμοί εναλλασσόμενου ρεύματος. Αν η απόσταση μεταφοράς είναι αρκετά μεγάλη, η εξοικονόμηση από τους λιγότερους αγωγούς υπερκαλύπτει το κόστος των μετατροπών, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.5, και η μεταφορά με συνεχές ρεύμα είναι, από τη σκοπιά επένδυσης κεφαλαίου, μία εναλλακτική λύση έναντι της μεταφοράς με εναλλασσόμενο ρεύμα.



**Σχήμα 1.5** Σύγκριση κόστους μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με εναλλασσόμενο και συνεχές ρεύμα συναρτήσει της απόστασης.

Η κρίσιμη απόσταση  $l_c$  πέραν της οποίας η μεταφορά με συνεχές ρεύμα πλεονεκτεί από οικονομικής απόψεως της μεταφοράς με εναλλασσόμενο ρεύμα είναι: για εναέριες γραμμές 600-900 km, για υπόγεια καλώδια 50-100 km και για υποβρύχια καλώδια 25-50 km. Σε επίπεδο διανομής, βέβαια, χρησιμοποιείται αποκλειστικά το εναλλασσόμενο ρεύμα.

### 1.3 ΓΙΑΤΙ ΤΡΙΦΑΣΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Δύο είναι οι βασικοί λόγοι για τους οποίους τα τριφασικά συστήματα πλεονεκτούν στην μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, έναντι των μονοφασικών. Ο ένας αφορά την οικονομία που επιτυγχάνεται στην μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας και ο άλλος έχει να κάνει με την σταθερότητα της στιγμιαίας ισχύος που αποδίδεται στο τριφασικό φορτίο.

Για να τεκμηριώσουμε τον πρώτο λόγο, θα συγκρίνουμε το τριφασικό και μονοφασικό σύστημα μεταφοράς χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές θεωρήσεις. Με την πρώτη θεώρηση, δεχόμαστε ότι πρόκειται να τροφοδοτήσουν ίδιο φορτίο και τα συγκρίνουμε από άποψη απαιτούμενου αγωγίμου υλικού των γραμμών μεταφοράς έχοντας ως κριτήριο τις απώλειες μεταφοράς. Με τη δεύτερη θεώρηση, δεχόμαστε ότι εγκαθίστανται γραμμές μεταφοράς με ίδια ποσότητα αγωγίμου υλικού και τα συγκρίνουμε από άποψη δυνατοτήτων μεταφοράς ισχύος.

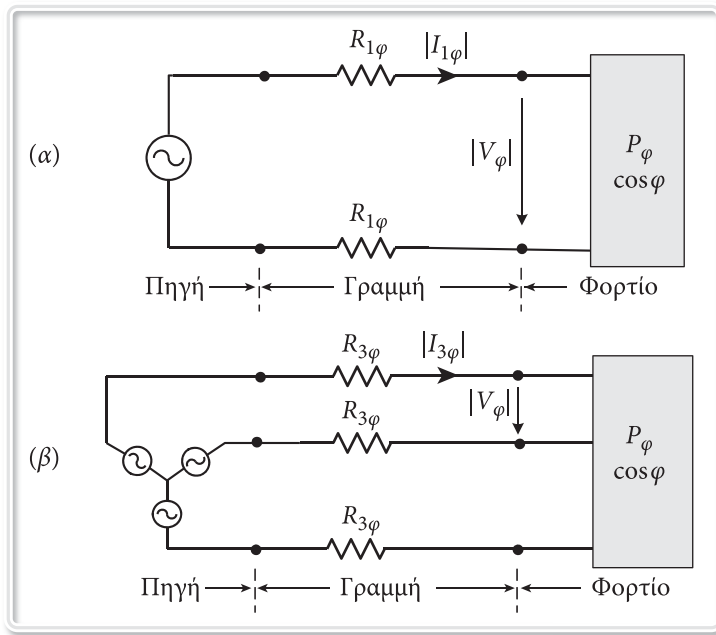
#### *Σύγκριση με βάση την τροφοδότηση ίδιου φορτίου*

Θεωρούμε δύο φορτία που καταναλώνουν την ίδια μέση πραγματική ισχύ  $P_\varphi$  υπό τον ίδιο συντελεστή ισχύος  $\cos\varphi$ , αλλά το ένα τροφοδοτείται από μονοφασική ημιτονοειδή πηγή με μονοφασικό σύστημα μεταφοράς, ενώ το άλλο τροφοδοτείται από τριφασική ημιτονοειδή πηγή με τριφασικό σύστημα μεταφοράς, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.6. Για να είναι ισοδύναμη η σύγκριση των δύο συστημάτων, δεχόμαστε ότι η τάση στα άκρα του μονοφασικού φορτίου και η τάση ανάμεσα στις φάσεις (πολική τιμή) του τριφασικού φορτίου έχουν την ίδια ενεργό τιμή  $|V_\varphi|$ . Οι δύο αγωγοί του μονοφασικού συστήματος έχουν αντίσταση  $R_{1\phi}$  έκαστος, ενώ οι τρεις αγωγοί του τριφασικού συστήματος έχουν αντίσταση  $R_{3\phi}$  έκαστος. Τα μήκη των γραμμών των δύο συστημάτων μεταφοράς είναι τα ίδια. Οι ενεργές τιμές των ρευμάτων γραμμής στο μονοφασικό και τριφασικό δίκτυο είναι  $|I_{1\phi}|$  και  $|I_{3\phi}|$  αντίστοιχα.

Όπως θα εξηγηθεί αναλυτικά στα κεφάλαια 3 και 4, οι ενεργές τιμές των ρευμάτων γραμμής στο μονοφασικό και τριφασικό σύστημα δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$|I_{1\phi}| = \frac{P_\varphi}{|V_\varphi| \cos\varphi} \quad (1.3)$$

$$|I_{3\phi}| = \frac{P_\varphi}{\sqrt{3} |V_\varphi| \cos\varphi} \quad (1.4)$$



**Σχήμα 1.6** (α) Μονοφασικό σύστημα μεταφοράς.  
(β) Τριφασικό σύστημα μεταφοράς.

Όπως θα δούμε στα επόμενα κεφάλαια, όταν ρεύμα ενεργού τιμής  $|I|$  διέρχεται δια αντίστασης  $R$ , τότε δημιουργούνται απώλειες ισχύος υπό μορφή θερμότητας στην αντίσταση που υπολογίζονται από τη σχέση  $P_{απ} = R|I|^2$ . Με βάση αυτή τη σχέση, οι απώλειες πραγματικής ισχύος στους δύο αγωγούς του μονοφασικού συστήματος είναι:

$$P_{απ,1φ} = 2R_{1φ}|I_{1φ}|^2 = 2R_{1φ} \left( \frac{P_φ}{|V_φ|\cos φ} \right)^2 \quad (1.5)$$

ενώ στους τρεις αγωγούς του τριφασικού συστήματος είναι:

$$P_{απ,3φ} = 3R_{3φ}|I_{3φ}|^2 = 3R_{3φ} \left( \frac{P_φ}{\sqrt{3}|V_φ|\cos φ} \right)^2 = R_{3φ} \left( \frac{P_φ}{|V_φ|\cos φ} \right)^2 \quad (1.6)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις σχέσεις (1.6) και (1.5) λαμβάνουμε:

$$\frac{P_{απ,3φ}}{P_{απ,1φ}} = \frac{R_{3φ}}{2R_{1φ}} \quad (1.7)$$



## 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν τα κυκλώματα που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας από την παραγωγή στην κατανάλωση. Αυτά είναι τα τριφασικά συστήματα, που έχουν επιλεγεί για πολλούς λόγους, μερικοί από τους οποίους ακολουθούν:

1. Είναι η απλούστερη διάταξη από τις πολυφασικές διατάξεις μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν εναλλασσόμενο ρεύμα, έχει ροή σταθερής ισχύος και μεγάλη ικανότητα μεταφοράς. Για αυτό χρησιμοποιεί λεπτότερους αγωγούς για τη μεταφορά της ίδιας ισχύος για την ίδια τάση. Αυτό συνεπάγεται τη χρήση λιγότερου χαλκού (τυπικά γύρω στο 25% λιγότερο).
2. Οι ελαφρότερες γραμμές τοποθετούνται ευκολότερα και χρειάζονται απλούστερους πυλώνες στήριξης, που τοποθετούνται σε μεγαλύτερες αποστάσεις.
3. Οι τριφασικές συσκευές και κινητήρες προτιμώνται από τις διφασικές γιατί έχουν καλύτερα χαρακτηριστικά εκκίνησης και λειτουργίας. Κυρίως οι μεγάλοι κινητήρες είναι τριφασικοί, γιατί αυτοί δεν απαιτούν ειδική σχεδίαση και πρόσθετα κυκλώματα εκκίνησης.

Επιπρόσθετα, σε πολλές περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται μονοφασικές ή διφασικές συσκευές αυτές τροφοδοτούνται από τη μία ή τις δύο φάσεις του τριφασικού συστήματος χωρίς κανένα πρόβλημα.

Η συχνότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος είναι 50 Hz για την Ευρώπη και 60 Hz για την Αμερική. Η συχνότητα προσδιορίζεται από τον αριθμό των πόλων του στρεφόμενου δρομέα της γεννήτριας και τον αριθμό στροφών/λεπτό του δρομέα. Αυτές οι συχνότητες επελέγησαν κυρίως γιατί στη ζητούμενη ισχύ των γεννητριών μπορούν να παραχθούν από σχετικά αποδοτική και ευσταθή μηχανική σχεδίαση, αφού η τιμή της συχνότητας επηρεάζεται πολύ από το μέγεθος της γεννήτριας. Στα πλοία και τα αεροπλάνα το μέγεθος της γεννήτριας επιτρέπει τη χρήση συχνότητας 400 Hz.

Τα πολυφασικά συστήματα που θα εξετάσουμε αποτελούνται από δύο ή περισσότερες πηγές τάσης με ίσα μέτρα και με σταθερές διαφορές φάσης, που τροφοδοτούν ισχύ στα φορτία που είναι συνδεδεμένα στις γραμμές. Σε αυτή την απλή δομή των συστημάτων παραλείπονται οι μετασχηματιστές και απλοποιείται η ανάλυση, χωρίς να περιορίζεται η κατανόηση των υπολογισμών που απαιτούνται. Στο διφασικό σύστημα η διαφορά φάσης είναι  $90^\circ$ , ενώ στο τριφασικό σύστημα είναι  $120^\circ$ . Συστήματα με έξι ή περισσότερες φάσεις χρησιμοποιούνται σε πολυφασικούς ανορθωτές με σκοπό την ελάττωση της κύμανσης της ανορθωμένης τάσης. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των φάσεων, τόσο ομαλότερη είναι η έξοδος συνεχούς ρεύματος του συστήματος ανόρθωσης τάσης.

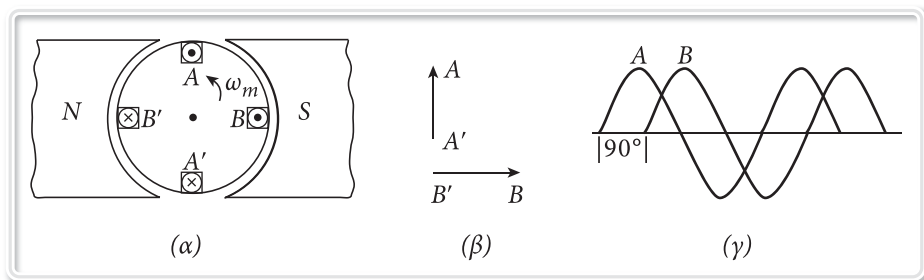
Σε αυτό το κεφάλαιο θα αρχίσουμε με την περιγραφή των πηγών, που είναι ένα σύνολο συμμετρικών τριφασικών τάσεων. Στη συνέχεια θα προχωρήσουμε στον υπολογισμό των τάσεων και ρευμάτων που δημιουργούνται κατά την τροφοδοσία συμμετρικών και ασύμμετρων φορτίων με σύνδεση αστέρα (Υ) ή τριγώνου (Δ). Για τους υπολογισμούς αυτούς χρήσιμος είναι ο μετασχηματισμός Υ σε Δ και αντίστροφα, καθώς και η χρήση του μονοφασικού ισοδύναμου συμμετρικού τριφασικού κυκλώματος, που θα εξηγηθούν. Από τις τάσεις και τα ρεύματα θα προσδιοριστεί η ισχύς των κυκλωμάτων και οι τρόποι μέτρησή της και το κεφάλαιο θα ολοκληρωθεί με τον τρόπο προσδιορισμού της ακολουθίας των φάσεων. Σε όλες τις περιπτώσεις θεωρούμε ότι το σύστημα που αναλύουμε βρίσκεται στη μόνιμη ημιτονοειδή κατάσταση λειτουργίας.

## 4.2 ΔΙΦΑΣΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΑΣΕΩΝ

Η περιστροφή δύο πηνίων κάθετων μεταξύ τους σε σταθερό μαγνητικό πεδίο, όπως στο Σχ. 4.1α, έχει σαν αποτέλεσμα την επαγωγή τάσης στα πηνία με διαφορά φάσης  $90^\circ$  μεταξύ τους. Αν τα πηνία έχουν ίδιο αριθμό σπειρών, οι παραστατικοί μιγάδες (phasors) και οι κυματομορφές των επαγόμενων τάσεων θα έχουν ίσα μέτρα, όπως φαίνεται στα Σχ. 4.1β και 4.1γ αντίστοιχα.

Στο διάγραμμα των παραστατικών μιγάδων του Σχ. 4.1β έχουμε πάρει σαν αναφορά την τάση  $V_{BB'} = |V_{\pi\eta\nu}| \angle 0^\circ$ , οπότε η  $V_{AA'} = |V_{\pi\eta\nu}| \angle 90^\circ$ . Αν οι ακροδέκτες Α' και Β' των πηνίων συνδεθούν μεταξύ τους σχηματίζοντας τη γραμμή Ν, το διφασικό σύστημα θα αποτελείται από τρεις γραμμές, τις Α, Β και Ν. Η διαφορά τάσης μεταξύ των γραμμών Α και Β είναι μεγαλύτερη από την τάση γραμμής-ουδετέρου κατά  $\sqrt{2}$  φορές και υπολογίζεται από το άθροισμα:

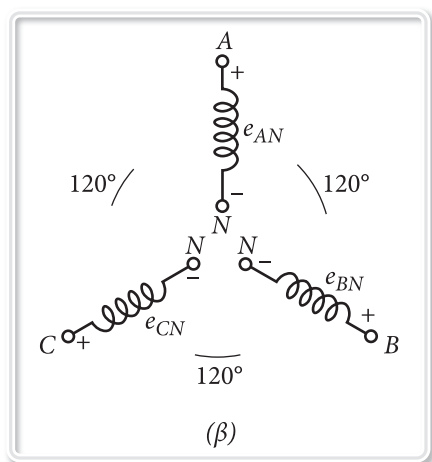
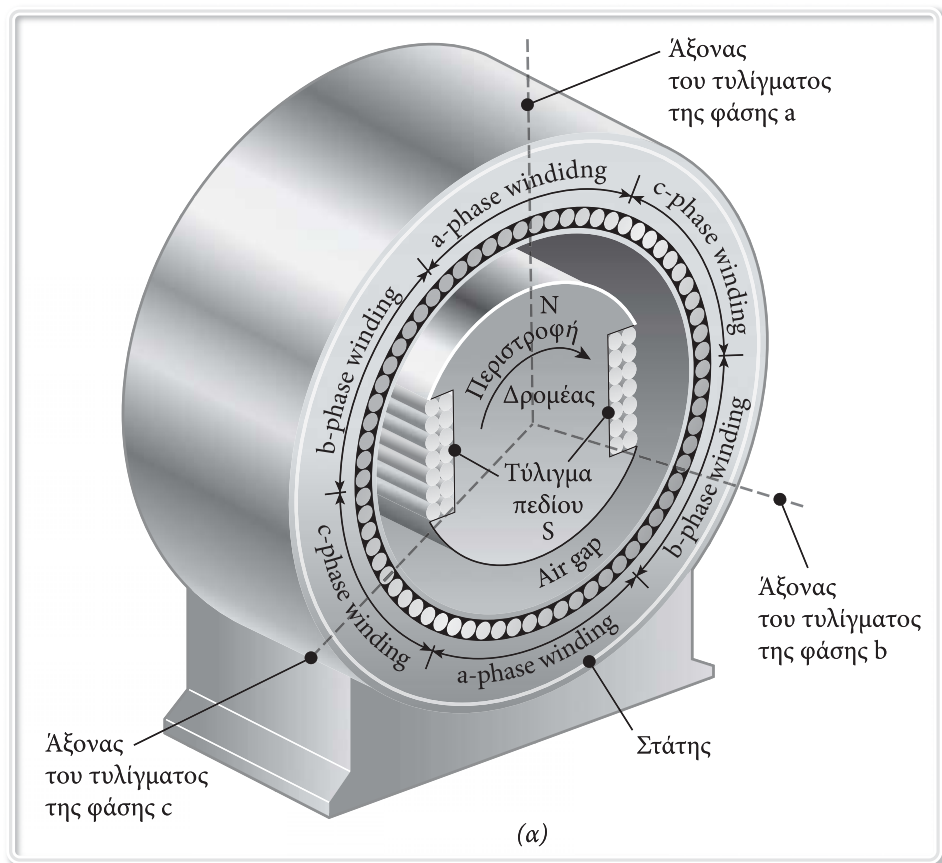
$$\begin{aligned}
 V_{AB} &= V_{AN} + V_{NB} = |V_{\pi\eta\nu}| \angle 90^\circ + |V_{\pi\eta\nu}| \angle 180^\circ = j|V_{\pi\eta\nu}| - |V_{\pi\eta\nu}| = \\
 &= \sqrt{2}|V_{\pi\eta\nu}| \angle 135^\circ
 \end{aligned}
 \quad (4.1)$$



Σχήμα 4.1 Διφασικό σύστημα.

### 4.3 ΤΡΙΦΑΣΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΑΣΕΩΝ

Μία τριφασική πηγή τάσης είναι μία γεννήτρια με τρία διαφορετικά πηνία κατανεμημένα στην περιφέρεια του στάτη της, όπως δείχνεται στο σχέδιο του Σχ. 4.2α. Το τύλιγμα του πεδίου βρίσκεται στο δρομέα, δηλαδή ο δρομέας της γεννήτριας είναι ένας ηλεκτρομαγνήτης που μπορεί να έχει πολλούς πόλους (το πλήθος τους εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και τη συχνότητα που ζητούμε να παραχθεί), ενώ στο Σχ. 4.2α δείχνεται ένας διπολικός δρομέας. Αν και η διάταξη πεδίου-τυμπάνου της γεννήτριας του Σχ. 4.1α συμφωνεί καλύτερα με τη θεωρία, για πρακτικούς λόγους σε μεγάλες γεννήτριες χρησιμοποιείται η διάταξη του Σχ. 4.2α, όπου το τύλιγμα πεδίου βρίσκεται στο δρομέα και το τύλιγμα τυμπάνου στο στάτη. Ο δρομέας της γεννήτριας στρέφεται στη σύγχρονη ταχύτητα από μία κινητήρια μηχανή, όπως είναι ο ατμοστρόβιλος ή ο αεριοστρόβιλος ή ο υδροστρόβιλος ή μία ντιζελομηχανή. Η γεννήτρια μετατρέπει την κινητική ενέργεια που δέχεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Η περιστροφή του ηλεκτρομαγνήτη επάγει μία ημιτονοειδή τάση σε κάθε τύλιγμα του τυμπάνου. Επειδή τα τυλίγματα είναι τοποθετημένα στον στάτη έτσι ώστε ο άξονας τους να βρίσκεται  $120^\circ$  μακριά μεταξύ τους, όπως φαίνεται συμβολικά στο Σχ. 4.2β, οι επαγόμενες ημιτονοειδείς τάσεις σε κάθε πηνίο έχουν το ίδιο μέτρο και συχνότητα και διαφορά φάσης  $120^\circ$  ηλεκτρικές μεταξύ τους. Οι επαγόμενες στιγμιαίες τάσεις  $e_{AN}$ ,  $e_{BN}$  και  $e_{CN}$  παράγονται ταυτόχρονα, όπως δείχνεται στο Σχ. 4.3. Παρατηρήστε στο Σχ. 4.3 ότι κάθε χρονική στιγμή το αλγε-

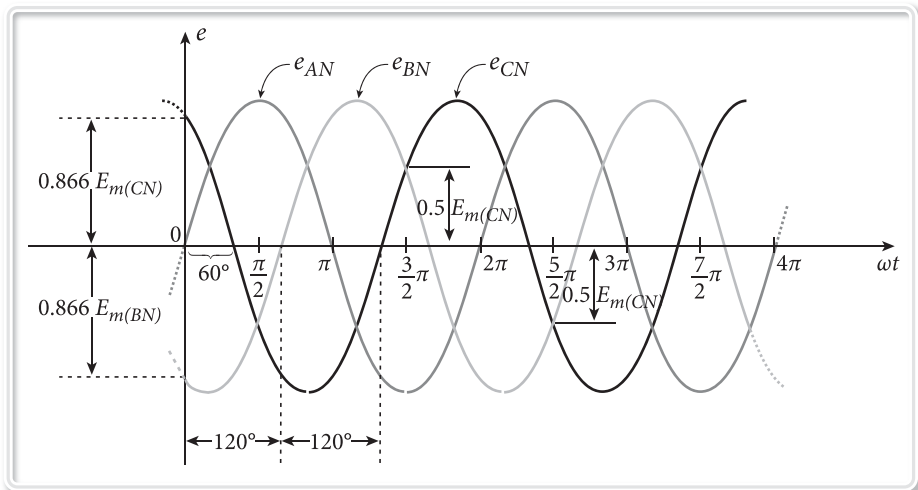
**Σχήμα 4.2**

(α) Σχεδιαστική παράσταση τριφασικής γεννήτριας.

(β) Συμβολική παράσταση πηνίων τριφασικής γεννήτριας.

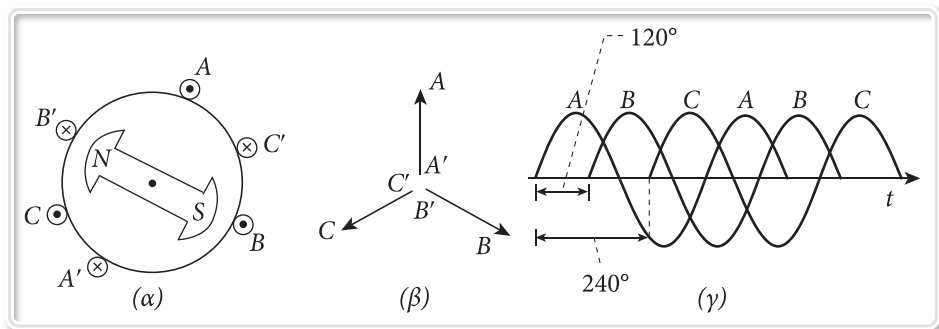


βρικό άθροισμα των τριών φασικών τάσεων είναι μηδέν. Π.χ. για  $\omega t = 0^\circ$ , όπου  $e_{AN} = 0$  οι άλλες δύο φάσεις είναι ίσες και αντίθετες, ενώ για  $\omega t = 270^\circ (= 3\pi/2)$  που οι δύο τάσεις είναι ίσες με  $0,5E_m$  η τρίτη είναι αρνητική και ίση με  $E_m$ .

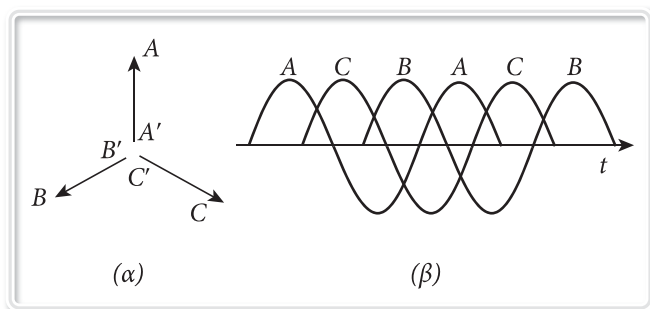


Σχήμα 4.3 Στιγμιαίες τάσεις τριφασικής γεννήτριας.

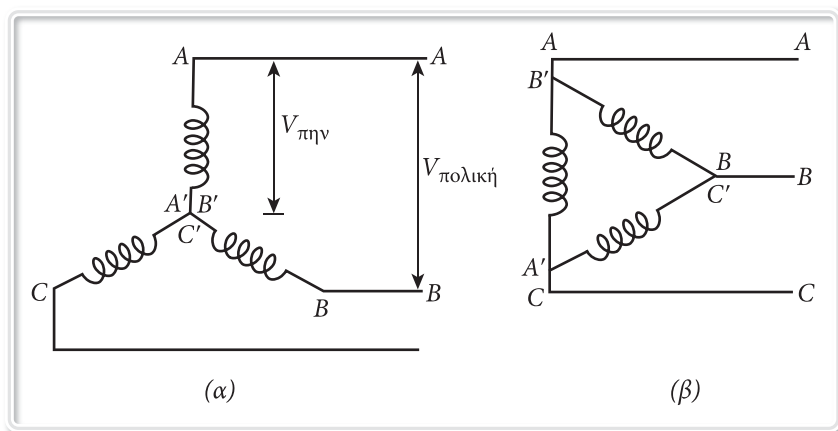
Στη γεννήτρια του Σχ. 4.4α, η τάση στο πηνίο A φθάνει πρώτη στη μέγιστη τιμή της, ακολουθεί η B και μετά η C για ακολουθία φάσεων ABC. Η διαδοχή αυτή των μεγίστων φαίνεται από το διάγραμμα των παραστατικών μιγάδων αν τους περιστρέψουμε με φορά αντίθετη εκείνης των δεικτών του ρολογιού και παίρνουμε την προβολή τους στον πραγματικό άξονα, οπότε είναι A-B-C-A-B-C ..., καθώς επίσης και από τις κυματομορφές των τάσεων, Σχ. 4.4γ, όπου τα μέγιστα ακολουθούν την ίδια σειρά. Περιστροφή του δρομέα σε αντίθετη κατεύθυνση έχει σαν αποτέλεσμα ακολουθία φάσεων CBA, Σχ. 4.5.



Σχήμα 4.4 Τριφασικό σύστημα.



Σχήμα 4.5 Αρνητική ακολουθία CBA.



Σχήμα 4.6 Συνδεσμολογία τυλιγμάτων εναλλακτήρα.

Αν συνδέσουμε τους ακροδέκτες  $A'$ ,  $B'$  και  $C'$  των πηνίων όπως στο Σχ. 4.6α, θα έχουμε ένα εναλλακτήρα (alternator) συνδεδεμένο σε αστέρα, ενώ αν συνδέσουμε τους ακροδέκτες A και  $B'$ , B και  $C'$ , C και  $A'$  όπως στο Σχ. 4.6β θα έχουμε ένα εναλλακτήρα συνδεδεμένο σε τρίγωνο (ο όρος εναλλακτήρας χρησιμοποιείται για να δηλώσει μία ηλεκτρομηχανική μηχανή που μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική εναλλασσόμενου ρεύματος). Όταν η μιγαδική αντίσταση των τυλιγμάτων του εναλλακτήρα είναι μικρή, μπορεί να παραληφθεί οπότε έχουμε την ιδανική πηγή τάσεων του Σχ. 4.6 (δηλαδή η εσωτερική τάση του εναλλακτήρα είναι ίση με την τερματική τάση). Διαφορετικά η μιγαδική αντίσταση πρέπει να συνδεθεί εν σειρά με κάθε ημιτονοειδή πηγή τάσης του Σχ. 4.6 και η εσωτερική τάση του εναλλακτήρα διαφέρει από την τερματική του.

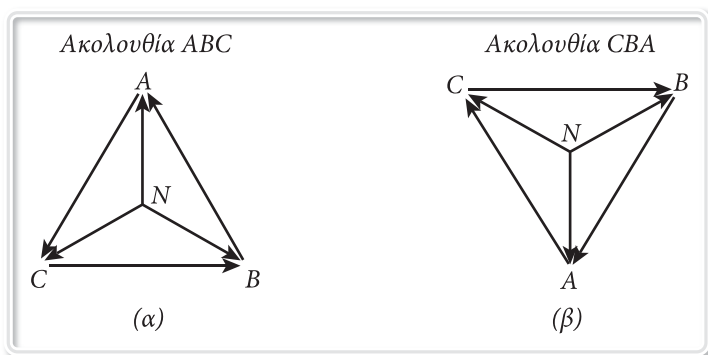
Στη σύνδεση σε αστέρα τα ρεύματα των πηνίων (φασικά ρεύματα του εναλλακτήρα) είναι ίσα με τα ρεύματα των γραμμών (ρεύματα των φάσεων) και η τάση

μεταξύ των γραμμών (πολική τάση) ισούται με  $\sqrt{3}$  φορές την τάση στα πηνία (φασική τάση του εναλλακτήρα). Στη σύνδεση σε τρίγωνο οι τάσεις μεταξύ γραμμών (πολική τάση) ισούται με τις τάσεις των πηνίων (φασικές τάσεις του εναλλακτήρα), ενώ τα ρεύματα των πηνίων (φασικά ρεύματα του εναλλακτήρα) ισούνται με  $1/\sqrt{3}$  φορές τα ρεύματα των γραμμών (ρεύματα των φάσεων).

Όπως και αν συνδέσουμε τα πηνία του στάτη του εναλλακτήρα οι γραμμές Α, Β και C αποτελούν την τροφοδοσία του τριφασικού συστήματος τάσεων. Το ουδέτερο σημείο N στις συνδέσεις σε αστέρα είναι ο τέταρτος αγωγός του τριφασικού συστήματος τεσσάρων αγωγών.

### 4.3.1 Παραστατικοί μιγάδες τριφασικών συστημάτων τάσεων

Η εκλογή μίας τάσης σαν αναφορά με φασική γωνία μηδέν καθορίζει τις φασικές γωνίες όλων των άλλων τάσεων του συστήματος. Εδώ εκλέγουμε σαν αναφορά την  $V_{BC}$ . Τα τρίγωνα των Σχ. 4.7α και 4.7β δείχνουν τις τάσεις για τις ακολουθίες ABC και CBA αντίστοιχα.



Σχήμα 4.7 Ακολουθίες φάσεων τριφασικού συστήματος.

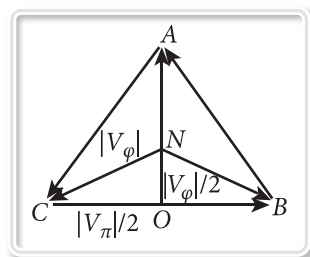
Αν  $|V_\pi|$  είναι το μέτρο της πολικής τάσης και  $|V_\phi|$  είναι το μέτρο της φασικής τάσης, από το ορθογώνιο τρίγωνο NOC του Σχ. 4.8 παίρνουμε:

$$(|V_\pi|/2)^2 + (|V_\phi|/2)^2 = |V_\phi|^2$$

$$\text{ή } |V_\pi|^2 + |V_\phi|^2 = 4|V_\phi|^2$$

και τέλος

$$|V_\pi| = \sqrt{3}|V_\phi| \quad \text{ή} \quad |V_\phi| = |V_\pi|/\sqrt{3}$$



Σχήμα 4.8

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, από το Σχ. 4.7, όλες οι τάσεις του τριφασικού συστήματος είναι:

Για ακολουθία ABC (θετική ακολουθία):

$$V_{AB} = |V_\pi| \angle 120^\circ = V_{AN} - V_{BN}$$

$$V_{BC} = |V_\pi| \angle 0^\circ = V_{BN} - V_{CN} \quad (4.2)$$

$$V_{CA} = |V_\pi| \angle 240^\circ = V_{CN} - V_{AN}$$

$$V_{AN} = \frac{|V_\pi|}{\sqrt{3}} \angle 90^\circ$$

$$V_{BN} = \frac{|V_\pi|}{\sqrt{3}} \angle (-30^\circ) \quad (4.3)$$

$$V_{CN} = \frac{|V_\pi|}{\sqrt{3}} \angle (-150^\circ)$$

Για ακολουθία CBA (αρνητική ακολουθία):

$$V_{AB} = |V_\pi| \angle 240^\circ$$

$$V_{BC} = |V_\pi| \angle 0^\circ \quad (4.4)$$

$$V_{CA} = |V_\pi| \angle 120^\circ$$

$$V_{AN} = \frac{|V_\pi|}{\sqrt{3}} \angle (-90^\circ)$$

$$V_{BN} = \frac{|V_\pi|}{\sqrt{3}} \angle 30^\circ \quad (4.5)$$

$$V_{CN} = \frac{|V_\pi|}{\sqrt{3}} \angle 150^\circ$$

Από το Σχ. 4.7 ή υπολογίζοντας τα μιγαδικά αθροίσματα προκύπτει ότι πάντοτε ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις και για τις δύο ακολουθίες:

$$V_{AB} + V_{BC} + V_{CA} = 0 \quad \text{και} \quad V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} = 0$$

**Τάση του συστήματος** ονομάζουμε την τάση μεταξύ οποιουδήποτε ζεύγους γραμμών Α-Β, Β-С ή C-A. Στο σύστημα τεσσάρων αγωγών (αλλά και σε οποιοδήποτε συμμετρικό τριφασικό σύστημα) το μέτρο της τάσης μεταξύ γραμμής (φάσης) και ουδετέρου ισούται με  $1/\sqrt{3}$  φορές την πολική τάση (τάση του συστήματος), Σχ. 4.9.