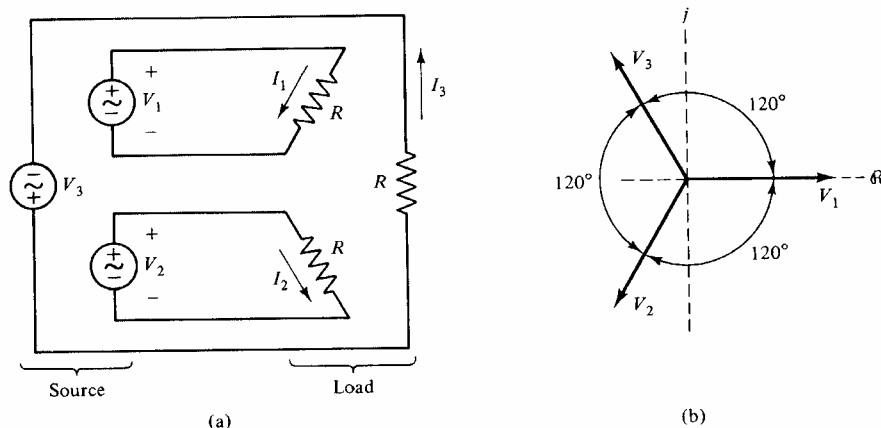


6 ΤΡΙΦΑΣΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Η ηλεκτρική ισχύς παράγεται, μεταφέρεται και διανέμεται σχεδόν αποκλειστικά με τριφασικά συστήματα ρευμάτων και τάσεων. Μόνον οικιακοί και άλλοι μικρής ισχύος καταναλωτές είναι μονοφασικοί. Ο κινητήρας εσωτερικής καύσης των αυτοκινήτων προσφέρει ένα καλό μηχανικό ανάλογο για την κατανόηση της λειτουργίας ενός πολυφασικού ηλεκτρικού συστήματος. Σε ένα μονοκύλινδρο κινητήρα, ένα πιστόνι μεταφέρει την κινητήρια ροπή σε έναν στροφαλοφόρο άξονα και στη συνέχεια στον κινητήριο άξονα. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και στο μονοφασικό ηλεκτρικό σύστημα. Οι πιο συνηθισμένοι τετρακύλινδροι κινητήρες διαθέτουν 4 τέτοια ίδια πιστόνια που μεταφέρουν ροπή στον ίδιο στροφαλοφόρο άξονα, όχι όμως ταυτόχρονα, αλλά σε διαδοχικούς χρόνους και με κατάλληλη σειρά ώστε να πετυχαίνεται κατά το δυνατόν ομαλή μετάδοση της ροπής. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και στα πολυφασικά ηλεκτρικά συστήματα. Ένα τριφασικό ηλεκτρικό σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από 3 ανεξάρτητα, όμοια μονοφασικά συστήματα εναλλασσομένου ρεύματος 2 αγωγών, όπως φαίνεται στο Σχ.6.1α. Στα 3 αυτά συστήματα οι τάσεις των πηγών σαν φασικά διανύσματα έχουν ίσα μέτρα. Τα φασικά διανύσματα των τάσεων των 3 φάσεων, είναι όμως μετατοπισμένα στο χώρο κατά 120° , όπως φαίνεται στο διανυσματικό διάγραμμα του Σχ.6.1b.



Σχήμα 6.1: Τρία μονοφασικά συστήματα συνδυάζονται κατάλληλα σε ένα τριφασικό.

Αν οι τρεις παραπάνω τάσεις μεταβάλλονται ημιτονοειδώς τότε η μαθηματική τους έκφραση θα έχει τη μορφή:

$$\begin{aligned} v_1(t) &= \sqrt{2}V \sin \omega t \\ v_2(t) &= \sqrt{2}V \sin(\omega t - 120) \\ v_3(t) &= \sqrt{2}V \sin(\omega t - 240) \end{aligned} \quad (6.1)$$

ή σε πολική μορφή

$$\begin{aligned}V_1 &= V \angle 0^\circ \\V_2 &= V \angle -120^\circ \\V_3 &= V \angle -240^\circ\end{aligned}$$

Στο Σχ. 6.1 το φορτίο σε κάθε φάση είναι καθαρά ωμικό. Στη γενική περίπτωση που το τριφασικό σύστημα τροφοδοτεί ένα τριφασικό, ισοζυγισμένο και συμμετρικό φορτίο (και τα τρία φορτία έχουν τον ίδιο συντελεστή ισχύος $\cos\phi$), τότε οι αντίστοιχες εκφράσεις για τα ρεύματα θα είναι:

$$\begin{aligned}i_1(t) &= \sqrt{2}I \sin(\omega t - \phi) \\i_2(t) &= \sqrt{2}I \sin(\omega t - 120 - \phi) \\i_3(t) &= \sqrt{2}I \sin(\omega t - 240 - \phi)\end{aligned}\tag{6.2}$$

ή σε πολική μορφή

$$\begin{aligned}I_1 &= I \angle -\phi \\I_2 &= I \angle -\phi - 120^\circ \\I_3 &= I \angle -\phi - 240^\circ\end{aligned}$$

Για την περίπτωση του σχήματος 6.1, η γωνία ϕ είναι μηδέν.

Η πρώτη απλοποίηση στα 3 μονοφασικά κυκλώματα του σχήματος 6.1, αφορά στον αγωγό επιστροφής των ρευμάτων. Αντί των 3 αγωγών επιστροφής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνον ένας. Ο κοινός αυτός αγωγός επιστροφής χαρακτηρίζεται και σαν **ουδέτερος**. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα σημαντική εξοικονόμηση υλικού και συνεπώς χαμηλότερο κόστος. Το τριφασικό σύστημα που προκύπτει είναι γνωστό σαν **τριφασικό σύστημα 4 αγωγών**.

Καθώς το κάθε φορτίο διαρρέεται από το αντίστοιχο ρεύμα, προκύπτει ότι στον ουδέτερο θα ρέει το διανυσματικό άθροισμα των τριών ρευμάτων δηλαδή:

$$i_n(t) = i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) = 0\tag{6.3}$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι, αν το σύστημα είναι απόλυτα συμμετρικό (δηλαδή τόσο το φορτίο όσο και η πηγή), σε κάθε χρονική στιγμή το ρεύμα του ουδετέρου ισούται με το μηδέν. Συνεπώς θα μπορούσε να αφαιρεθεί και ο αγωγός του ουδετέρου, καταλήγοντας έτσι σε ένα τριφασικό σύστημα 3 αγωγών. Στην περίπτωση αυτή όμως, αν τα φορτία δεν είναι απολύτως συμμετρικά, αναπτύσσονται διαφορετικές τάσεις πάνω σε αυτά.

Εξετάζεται στη συνέχεια η μορφή της ισχύος στο παραπάνω τριφασικό σύστημα. Η συνολική στιγμιαία ισχύς που καταναλώνεται από το παραπάνω τριφασικό φορτίο αποτελείται από το άθροισμα της ισχύος του κάθε φορτίου δηλαδή.

$$p_{3\phi}(t) = v_1(t)i_1(t) + v_2(t)i_2(t) + v_3(t)i_3(t)\tag{6.4}$$

Χρησιμοποιώντας τις (6.1) και (6.2) από την (6.4) προκύπτει ότι για την περίπτωση συμμετρικού φορτίου

$$p_{3\phi} = 3VI \cos \varphi \quad (6.5)$$

Η συνολική τριφασική ισχύς του συστήματος προκύπτει συνεπώς χρονικά σταθερή και ίση με το τριπλάσιο της ενεργού ισχύος που καταναλώνει κάθε φορτίο. Η στιγμιαία ισχύς κάθε ενός φορτίου είναι χρονικά μεταβαλλόμενη, όπως είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Οι τρεις ταλαντούμενες ισχείς εμφανίζουν τα μέγιστα τους μετατοπισμένα κατά 120 deg, λόγω της φασικής απόκλισης ανάμεσα στις τάσεις και τα ρεύματα της κάθε φάσης. Κάθε χρονική στιγμή όμως, το άθροισμα των 3 χρονικά μεταβαλλόμενων ισχύων παραμένει σταθερό και ίσο με $p_{3\phi}$.

Σε ένα τριφασικό σύστημα διακρίνονται 3 αγωγοί φάσεων ενώ ενδέχεται να υπάρχει ουδέτερος αγωγός. Οι τρεις αγωγοί φάσεων χαρακτηρίζονται κατάλληλα με τα γράμματα R, S, T ή a, b, c ενώ ο ουδέτερος αγωγός με το γράμμα N .

Αν το τριφασικό σύστημα χρησιμοποιείται για τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας και στη χαμηλή τάση θα ηλεκτροδοτηθούν μονοφασικοί, οικιακοί κατά κανόνα, καταναλωτές, τότε είναι υποχρεωτική η ύπαρξη ουδέτερου. Ένας τριφασικός καταναλωτής (πχ. ένας κινητήρας) τροφοδοτείται με τις 3 φάσεις και ίσως και τον ουδέτερο, ενώ ένας μονοφασικός με έναν αγωγό φάσης και τον ουδέτερο.

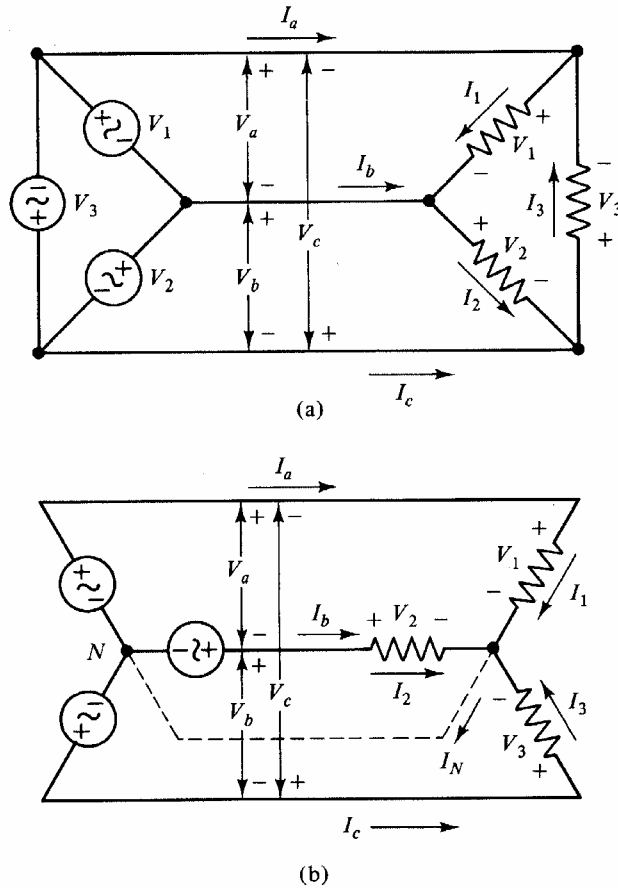
Στο τριφασικό σύστημα ορίζονται κάποια νέα μεγέθη. Έτσι σε ένα πλήρως συμμετρικό τριφασικό σύστημα οι τάσεις ανάμεσα στους αγωγούς των φάσεων και τον ουδέτερο, λέγονται **φασικές τάσεις**, είναι ίσες κατά μέτρο και είναι μετατοπισμένες κατά 120 deg, όπως στο Σχ.6.1b.

Οι τάσεις ανάμεσα σε 2 φάσεις λέγονται **πολικές τάσεις** και είναι και αυτές ίσες κατά μέτρο και μετατοπισμένες επίσης κατά 120 deg. Οι πολικές συνδέονται με τις φασικές με τη σχέση

$$V_{\text{πολ}} = \sqrt{3} V_{\text{φασ}} \quad (6.6)$$

Τα ρεύματα των φάσεων, ονομαζόμενα και **ρεύματα γραμμών**, είναι και αυτά ίσα κατά μέτρο και μετατοπισμένα στο χώρο κατά 120 deg. Επιπλέον σε κάθε συμμετρικό 3φασικό σύστημα, το διανυσματικό άθροισμα των ρευμάτων ή των φασικών ή πολικών τάσεων είναι μηδέν.

Κατασκευαστικές ατέλειες των 3φασικών συσκευών, αλλά κυρίως η παρουσία αυτόνομων μονοφασικών καταναλωτών προκαλούν σημαντικές αποκλίσεις από τη συμμετρική λειτουργία. Στην περίπτωση αυτή, εάν υπάρχει ουδέτερος αγωγός, ρέει σε αυτόν ένα ρεύμα που είναι ίσο με το διανυσματικό άθροισμα των ασύμμετρων ρευμάτων, το οποίο δεν είναι πλέον μηδέν.



Σχήμα 6.2. Συνδεσμολογίες τριγώνου και αστέρα τριφασικών καταναλωτών.

Ένας τριφασικός καταναλωτής μπορεί να είναι συνδεδεμένος σε ένα 3φασικό δίκτυο με 2 τρόπους, με **συνδεσμολογία τριγώνου (delta connection)** ή με **συνδεσμολογία αστέρα (wye connection)** (Σχ. 6.2a, b). Στη συνδεσμολογία τριγώνου, οι αντιστάσεις του καταναλωτή στις 3 φάσεις λειτουργούν με την πολική τάση και το ρεύμα που απορροφούν είναι το $1/\sqrt{3}$ του ρεύματος των γραμμών. Δηλαδή

$$V_{\Delta} = V_{\text{πολ}} = \sqrt{3}V_{\phi\alpha\sigma} \quad (6.7\alpha)$$

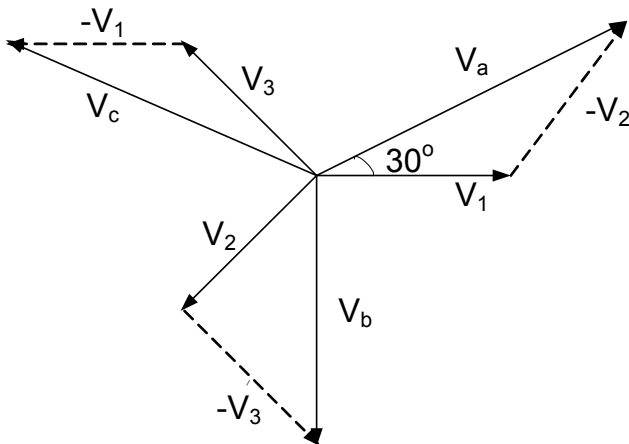
$$I_{\Delta} = \frac{1}{\sqrt{3}}I_{\text{γρ}} \quad (6.7\beta)$$

Αντίθετα στη συνδεσμολογία αστέρα, οι αντιστάσεις στις τρεις φάσεις του καταναλωτή λειτουργούν με τη φασική τάση και απορροφούν το ρεύμα γραμμής δηλαδή:

$$V_Y = V_{\phi\alpha\sigma} = \frac{1}{\sqrt{3}}V_{\text{πολ}} \quad (6.8\alpha)$$

$$I_Y = I_{\text{γρ}} \quad (6.8\beta)$$

Στη συνδεσμολογία αστέρα, ισχύει: $V_a = V_1 - V_2$, $V_b = V_2 - V_3$, $V_c = V_3 - V_1$. Κατά συνέπεια, στη συνδεσμολογία αστέρα, το διανυσματικό διάγραμμα όλων των τάσεων είναι



Γίνεται λοιπόν φανερό ότι η ανάλυση ενός συμμετρικού Υ-Υ τριφασικού συστήματος μπορεί να αναχθεί στην ανάλυση ενός από τα τρία μονοφασικά κυκλώματα που το αποτελούν. Το ισοδύναμο μονοφασικό του Σχ. 6.2β, για παράδειγμα αποτελείται από την πηγή τάσης της μίας φάσης, το φορτίο της μίας φάσης, τον ουδέτερο και τη φάση όπου ρέει ρεύμα I_1 .

Γενικά, το είδος της συνδεσμολογίας που θα επιλεγεί, επιβάλλεται από κατασκευαστικούς και λειτουργικούς λόγους. Γενικά όμως, στη συνδεσμολογία τριγώνου σε κάθε φάση υπάρχουν μικρότερα ρεύματα και υψηλότερες τάσεις ενώ στη συνδεσμολογία αστέρα συμβαίνει το αντίστροφο.

6.1 Η ηλεκτρική ισχύς σε τριφασικά συστήματα

Εάν υποθεθεί ότι ένας συμμετρικός τριφασικός καταναλωτής που αποτελείται από ίσες ωμικές αντιστάσεις R συνδέεται σε αστέρα, σύμφωνα με το Σχ.6.2β, τότε η συνολική ισχύς που θα καταναλώνει θα είναι η τριπλάσια της ισχύος που καταναλώνει κάθε αντίσταση. Εφόσον η τάση σε κάθε αντίσταση είναι $V_{\phi\alpha\sigma}$ και το ρεύμα $I_{\gamma\rho}$, η συνολική ισχύς θα είναι

$$P_{3\phi} = 3V_{\phi\alpha\sigma}I_{\gamma\rho} = \sqrt{3}V_{\pi\omicron\lambda}I_{\gamma\rho} \quad (6.9)$$

Αντίστοιχα για την περίπτωση της συνδεσμολογίας σε τρίγωνο, οι αντιστάσεις θα λειτουργούν υπό τάση $V_{\pi\omicron\lambda}$ και ρεύμα I_{Δ} άρα η συνολική ισχύς θα είναι:

$$P'_{3\phi} = 3V_{\pi\omicron\lambda}I_{\Delta} = 3V_{\pi\omicron\lambda} \frac{I_{\gamma\rho}}{\sqrt{3}} = \sqrt{3}V_{\pi\omicron\lambda}I_{\gamma\rho} = P_{3\phi} \quad (6.10)$$

Άρα η συνολική ισχύς ενός οποιουδήποτε τριφασικού καταναλωτή θα δίνεται, γενικά, από τη σχέση,

$$P = 3V_{\phi\alpha\sigma} I_{\gamma\rho} \cos \varphi = \sqrt{3} V_{\pi\sigma\lambda} I_{\gamma\rho} \cos \varphi \quad (6.11)$$

ανεξάρτητα από τη συνδεσμολογία του. Η παραπάνω σχέση ισχύος εφαρμόζεται σε κάθε συμμετρικό τριφασικό σύστημα και $\cos \varphi$ είναι ο αντίστοιχος συντελεστής ισχύος κάθε φάσης. Αντίστοιχα, η συνολική 3φασική άεργη ισχύς θα δίνεται από τη σχέση:

$$Q = 3V_{\phi\alpha\sigma} I_{\gamma\rho} \sin \varphi = \sqrt{3} V_{\pi\sigma\lambda} I_{\gamma\rho} \sin \varphi \quad (6.12)$$

Σημειώνεται τέλος ότι στην περίπτωση τριφασικών συστημάτων, οι όροι τάση, ρεύμα και ισχύς, υποδηλώνουν πάντοτε πολική τάση, ρεύμα γραμμής και συνολική τριφασική ισχύ, εκτός εάν διευκρινίζεται διαφορετικά.