



ΕΜΠ

Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ)

Κεφάλαιο 4: Μετασχηματιστές (Μ/Σ)

Μάθημα στις 23/10/2024

Πάυλος Σ. Γεωργιλάκης

Καθ. ΕΜΠ



Παράδοση Ασκήσεων

- Σύμφωνα με ανακοίνωση στην ιστοσελίδα του μαθήματος στο <https://helios.ntua.gr/>
- Οι ασκήσεις παραδίδονται στο κουτί έξω από το γραφείο 2.2.34 (του κ. Κιμουλάκη) που βρίσκεται στον δεύτερο όροφο του παλαιού κτιρίου Ηλεκτρολόγων.
- Η **A Ομάδα Ασκήσεων** (σελίδα 25 επισυναπτόμενου αρχείου), θα παραδοθεί **έως τις 10 Νοεμβρίου 2023**, δηλαδή μετά την ολοκλήρωση της διδασκαλίας του Κεφαλαίου 5 του μαθήματος.
- Η B Ομάδα Ασκήσεων (σελίδα 25 επισυναπτόμενου αρχείου), θα παραδοθεί μετά την ολοκλήρωση της διδασκαλίας του Κεφαλαίου 10 του μαθήματος.
- Για απορίες επί των ασκήσεων: Δρ. Νικόλαος Κιμουλάκης, Μέλος ΕΔΙΠ, e-mail: kimnikos@central.ntua.gr, Τηλέφωνο 210 772 3562, Γραφείο 2.2.34 στο Παλαιό Κτίριο Ηλεκτρολόγων.



Εκατοστιαία Πτώση Τάσης

$$r = \left(\frac{V_1 / \alpha - V_2}{V_1 / \alpha} \right) \cdot 100 \%$$

- V_2 : τάση δευτερεύοντος όταν ο Μ/Σ είναι υπό φορτίο
- V_1/α : τάση δευτερεύοντος όταν ο Μ/Σ είναι υπό κενό φορτίο



Βαθμός Απόδοσης

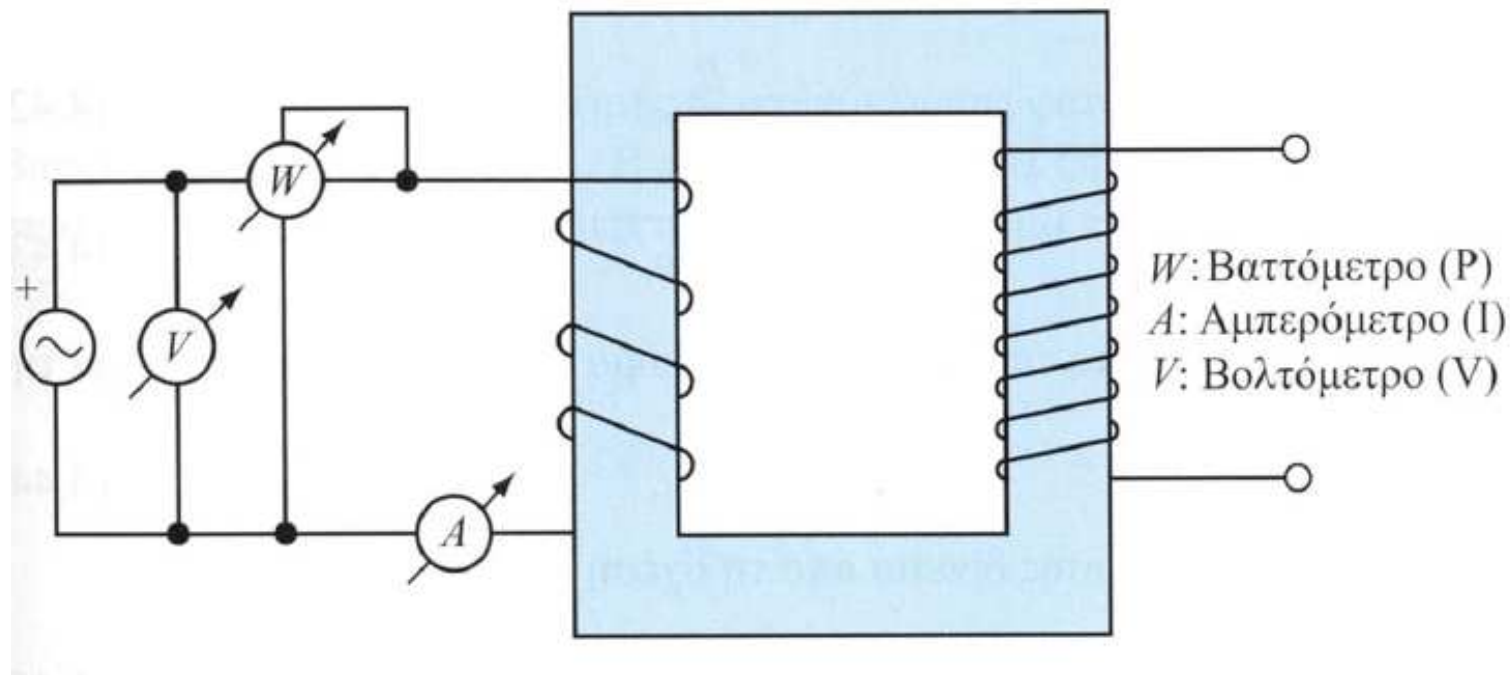
$$n = \frac{P_2}{P_1} = \frac{V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \theta_2}{V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \theta_1} = \frac{P_2}{P_2 + \text{losses}} \Rightarrow$$

$$n = \frac{P_2}{P_2 + I_2^2 \cdot R''_{l\sigma} + P_\pi}$$



Δοκιμή Ανοικτού Κυκλώματος

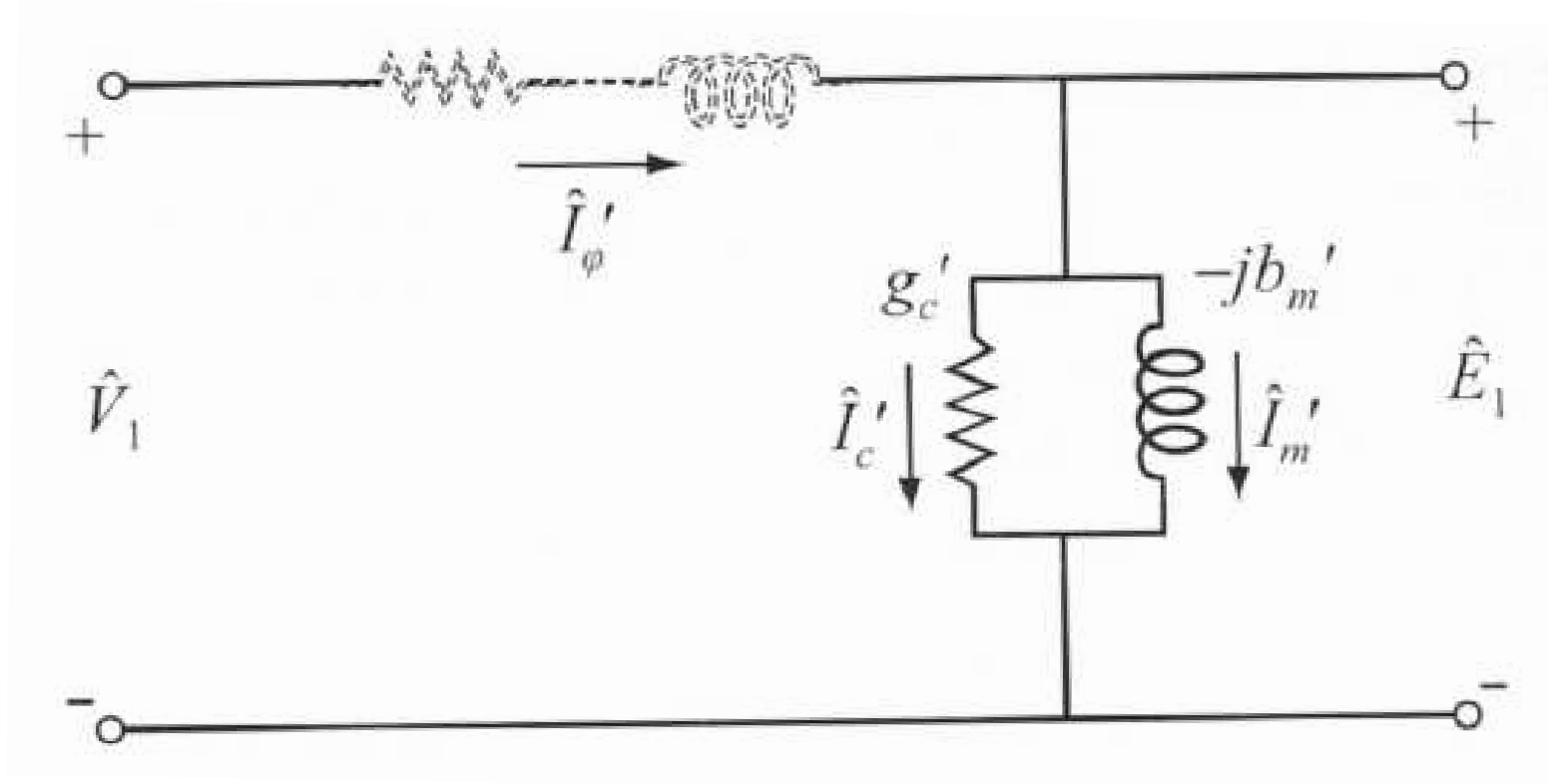
- Μετρώνται οι απώλειες πυρήνα ή απώλειες σιδήρου
- Μετρώνται τα μεγέθη: V_1 , I'_ϕ , P .





Δοκιμή Ανοικτού Κυκλώματος

- Μετρώνται τα μεγέθη: V_1 , I'_ϕ , P .





Δοκιμή Ανοικτού Κυκλώματος

- Μετρώνται (είναι γνωστά) τα μεγέθη: V_1 , I'_ϕ , P .

$$Y'_\phi = \frac{I'_\phi}{V_1} \quad (4.44)$$

$$g'_c = \frac{P}{V_1^2} = \frac{P_\pi}{V_1^2} \quad (4.45)$$

$$b'_m = \sqrt{(Y'_\phi)^2 - (g'_c)^2} \quad (4.46)$$

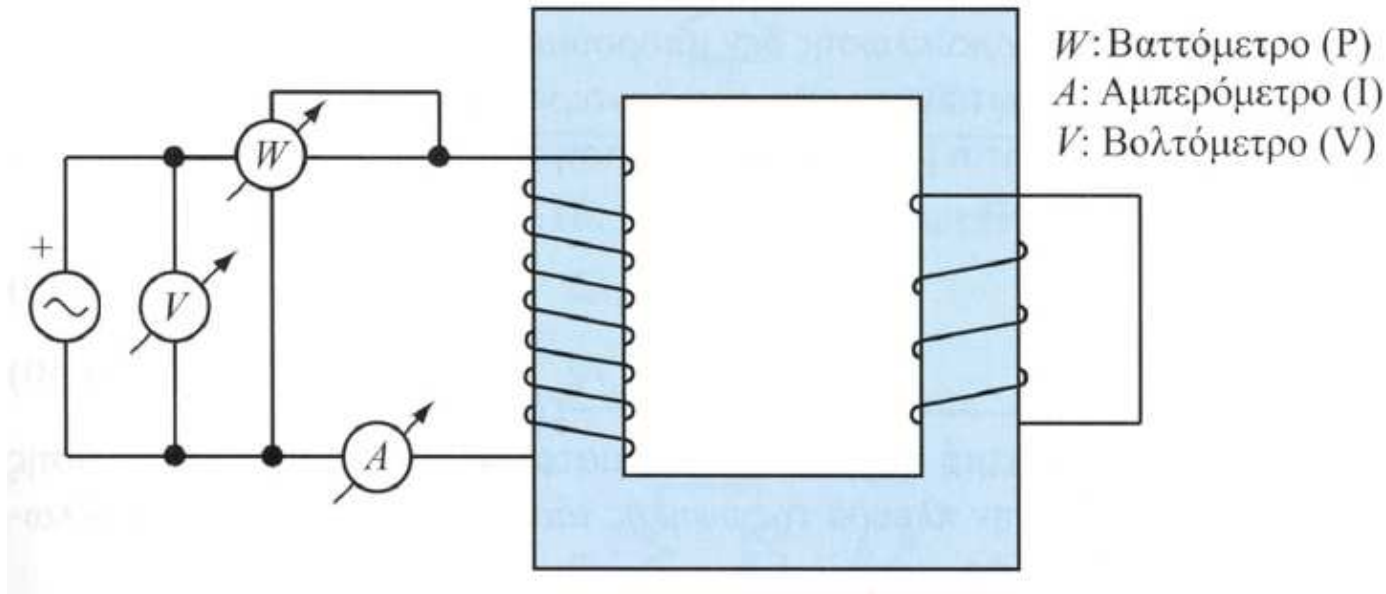
$$I'_c = \frac{P_\pi}{V_1} \quad (4.47)$$

$$I'_m = \sqrt{(I'_\phi)^2 - (I'_c)^2} \quad (4.48)$$



Δοκιμή Βραχυκύκλωσης

- Μετρώνται οι απώλειες χαλκού ή απώλειες τυλιγμάτων
- Μετρώνται τα μεγέθη: V_1 , I_1 , P .





Δοκιμή Βραχυκύκλωσης

- Μετρώνται τα μεγέθη: V_1, I_1, P .

$$Z'_{1\sigma} = \frac{V_1}{I_1} \quad (4.49)$$

$$R'_{1\sigma} = \frac{P}{I_1^2} \quad (4.50)$$

$$X'_{1\sigma} = \sqrt{(Z'_{1\sigma})^2 - (R'_{1\sigma})^2} \quad (4.51)$$

$$R_1 \approx R_2 \approx \frac{R'_{1\sigma}}{2} \quad (4.52)$$

$$X_1 \approx X_2 \approx \frac{X'_{1\sigma}}{2} \quad (4.53)$$



Τριφασικοί Μ/Σ

$$a = \frac{V'_N}{V''_N} \quad (4.54)$$

$$I'_N = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot V'_N} \quad (4.55)$$

- V'_N : ονομαστική πολική τάση πρωτεύοντος
- V''_N : ονομαστική πολική τάση δευτερεύοντος
- S_N : ονομαστική τριφασική φαινόμενη ισχύς



Υπολογισμοί Τριφασικών Μ/Σ

- Οι υπολογισμοί σε τριφασικούς Μ/Σ με συμμετρικό φορτίο και διέγερση γίνονται **ανά φάση**, επιλύοντας το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα
- Οι συνθήκες είναι όμοιες στις τρεις φάσεις και έχουν τη διαφορά φάσης (γωνία) των συμμετρικών τριφασικών συστημάτων



Συνδεσμολογίες Τριφασικών Μ/Σ

Πρωτεύον	Δευτερεύον	Συμβολισμός
Υ	Υ	Υ-Υ
Υ	Δ	Υ-Δ
Δ	Υ	Δ-Υ
Δ	Δ	Δ-Δ



Εφαρμογές Συνδεσμολογιών Τριφασικών Μ/Σ

- Συνδεσμολογία **Y–Y**: χρησιμοποιείται σπάνια, γιατί στη συνδεσμολογία αυτή για να περάσει η τρίτη αρμονική του ρεύματος διέγερσης πρέπει να είναι γειωμένοι και οι δύο αστέρες, οπότε η τρίτη αρμονική εμφανίζεται αναγκαστικά στο ρεύμα γραμμής. Ωστόσο η συνδεσμολογία αυτή χρησιμοποιείται όταν υπάρχει στο δίκτυο γειωμένος ουδέτερος



Εφαρμογές Συνδεσμολογιών Τριφασικών Μ/Σ

- Συνδεσμολογίες $Y-\Delta$ και $\Delta-Y$: χρησιμοποιούνται συχνά για τον υποβιβασμό ή την ανύψωση της τάσης από υψηλή σε μέση και αντιστρόφως στους υποσταθμούς όπου συνδέονται γραμμές μεταφοράς. Στις περιπτώσεις αυτές το τρίγωνο συνδέεται από την πλευρά των γραμμών Υψηλής Τάσης
- Συνδεσμολογία $\Delta-\Delta$: έχει το πλεονέκτημα ότι ένας μονοφασικός Μ/Σ μπορεί να απομακρυνθεί για επιδιόρθωση ή συντήρηση, ενώ οι απομένουσες δύο φάσεις συνεχίζουν να λειτουργούν ως τριφασικός Μ/Σ με ικανότητα μεταφοράς ισχύος ίση με το 58% του αρχικού Μ/Σ.



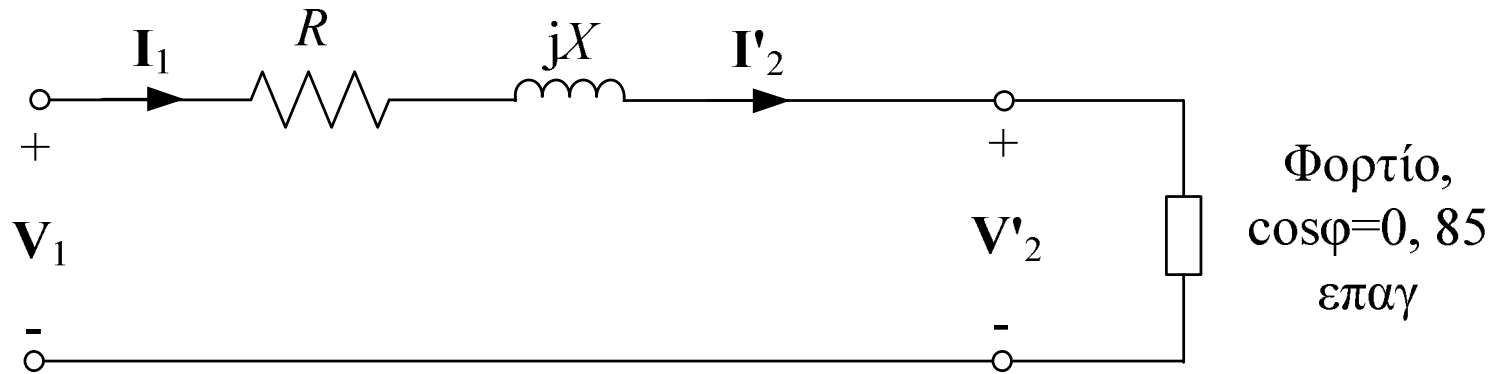
Παράδειγμα 4.1: Εκφώνηση

Ένας μονοφασικός Μ/Σ 150 kVA, 2400/240 V έχει τις ακόλουθες παραμέτρους ανηγμένες στο πρωτεύον: $R=0,5 \Omega$ και $X=1,5\Omega$. Ο εγκάρσιος κλάδος μαγνήτισης αγνοείται. Σε πλήρες φορτίο, ο Μ/Σ αποδίδει την ονομαστική του ισχύ (kVA) σε συντελεστή ισχύος 0,85 επαγωγικό και τάση δευτερεύοντος 240 V. Να υπολογιστούν:

1. Η ρύθμιση τάσης (εκατοστιαία πτώση τάσης).
2. Ο βαθμός απόδοσης υποθέτοντας απώλειες πυρήνα 600 W.



Παράδειγμα 4.1: Λύση Ερωτήματος 1



Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα Μ/Σ ανηγμένο στο πρωτεύον

$$a = \frac{2400}{240} = 10$$

$$V_2 = 240 \angle 0^\circ V$$

$$V'_2 = a \cdot V_2 \Rightarrow V'_2 = 2400 \angle 0^\circ V$$



Παράδειγμα 4.1: Λύση Ερωτήματος 1

$$\mathbf{I}_2 = \frac{150\,000 \text{ VA}}{240 \text{ V}} \angle -\cos^{-1}(0,85) \Rightarrow \mathbf{I}_2 = 625 \angle -31,8^\circ \text{ A}$$

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}'_2 = \frac{\mathbf{I}_2}{a} \Rightarrow \mathbf{I}_1 = 62,5 \angle -31,8^\circ \text{ A}$$

$$\mathbf{V}_1 = (R + jX) \cdot \mathbf{I}_1 + \mathbf{V}'_2 \Rightarrow \mathbf{V}_1 = (0,5 + j1,5) \cdot [62,5 \angle -31,8^\circ] + 2400 \Rightarrow \mathbf{V}_1 = 2476,8 \angle 1,5^\circ \text{ V}$$

$$r = \left(\frac{V_1 / \alpha - V_2}{V_1 / \alpha} \right) \cdot 100 \% \Rightarrow r = \left(\frac{247,68 - 240}{247,68} \right) \cdot 100 \% \Rightarrow$$

$$r = 3,1 \%$$



Παράδειγμα 4.1: Λύση Ερωτήματος 2

$$n = \frac{P_2}{P_2 + I_1^2 \cdot R + P_\pi} \Rightarrow n = \frac{150\,000 \cdot 0,85}{150\,000 \cdot 0,85 + 62,5^2 \cdot 0,5 + 600} \Rightarrow n = \frac{127\,500}{130\,050} \Rightarrow$$

$$n = 0,98 \Rightarrow n = 98 \%$$



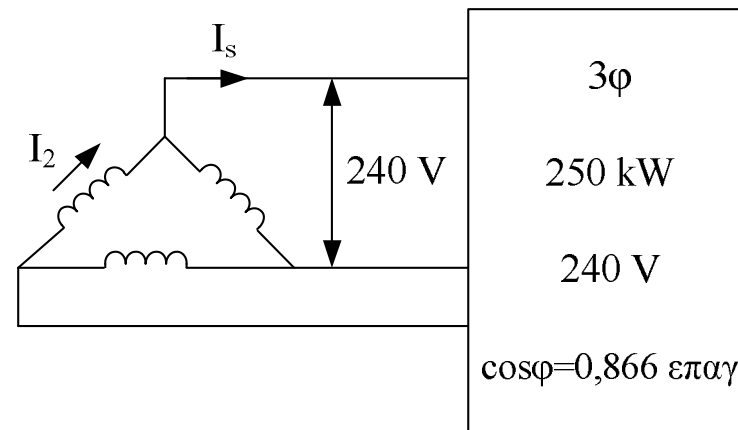
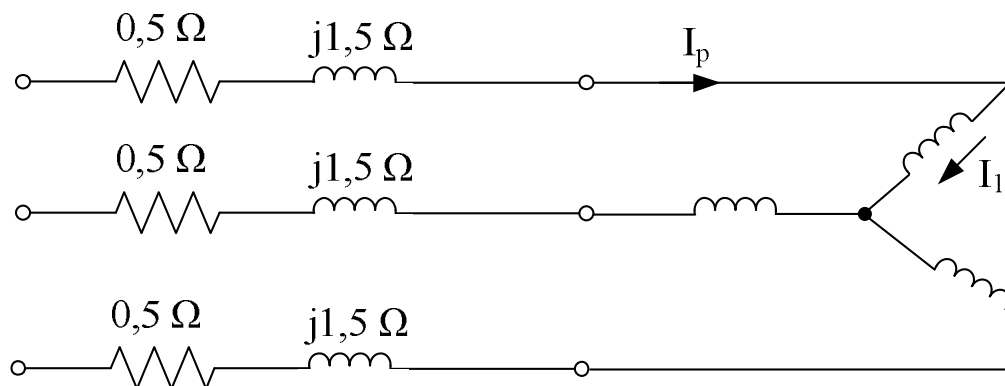
Παράδειγμα 4.2: Εκφώνηση

Τρεις μονοφασικοί Μ/Σ 100 kVA, 2400/240 V, 60 Hz, συνδέονται σε συνδεσμολογία (συστοιχία) τριφασικού Μ/Σ 4160/240 V, όπου το πρωτεύον συνδέεται σε αστέρα και το δευτερεύον σε τρίγωνο. Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση καθενός μονοφασικού Μ/Σ ανηγμένη στο δευτερεύον είναι $(0,045+j0,16)\Omega$. Η συστοιχία Μ/Σ συνδέεται σε μία τριφασική γεννήτρια μέσω τριφασικής γραμμής διανομής με σύνθετη αντίσταση ανά φάση $(0,5+j1,5)\Omega$. Ο Μ/Σ αποδίδει 250 kW σε τάση 240 V και συντελεστή ισχύος 0,866 επαγωγικό. Να υπολογιστούν:

1. Το ρεύμα στο πρωτεύον και στο δευτερεύον τύλιγμα του Μ/Σ.
2. Η τάση της γεννήτριας



Παράδειγμα 4.2: Λύση Ερωτήματος 1



$$I_s = \frac{250\,000}{\sqrt{3} \cdot 240 \cdot 0,866} \Rightarrow I_s = 694,5 \text{ A}$$

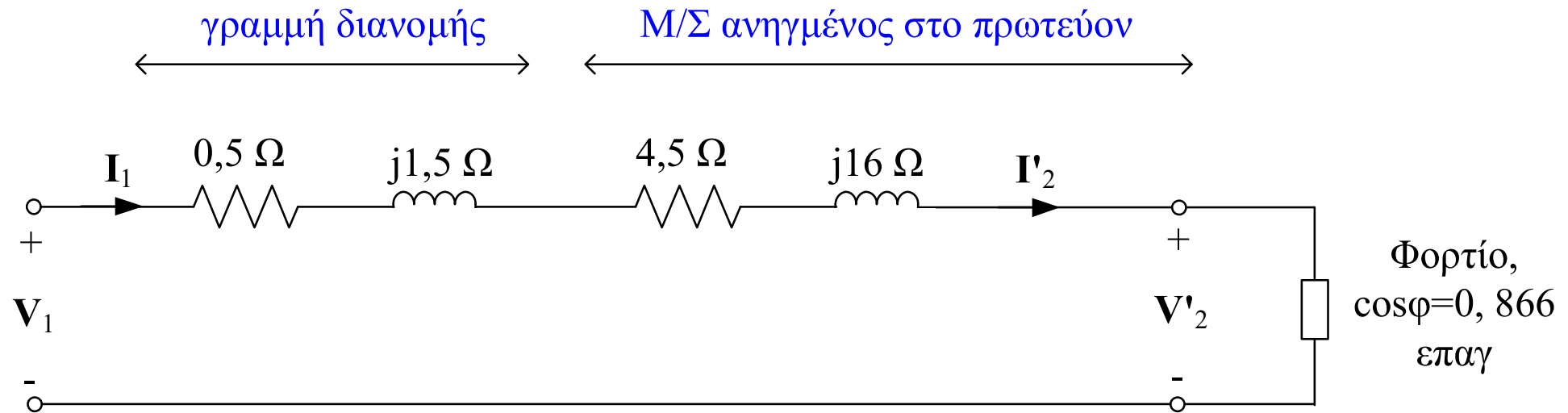
$$I_2 = \frac{I_s}{\sqrt{3}} = \frac{694,5 \text{ A}}{\sqrt{3}} \Rightarrow I_2 = 400 \text{ A}$$

$$a = \frac{2400}{240} = 10$$

$$I_p = I_1 = \frac{I_2}{a} = \frac{400}{10} \Rightarrow I_1 = 40 \text{ A}$$



Παράδειγμα 4.2: Λύση Ερωτήματος 2



$$\mathbf{Z}' = a^2 \cdot \mathbf{Z} = 10^2 \cdot (0,045 + j0,16) \Rightarrow \mathbf{Z}' = (4,5 + j16) \Omega$$

$$\mathbf{V}_2 = 240 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$\mathbf{V}'_2 = a \cdot \mathbf{V}_2 \Rightarrow \mathbf{V}'_2 = 2400 \angle 0^\circ \text{ V}$$



Παράδειγμα 4.2: Λύση Ερωτήματος 2

$$\mathbf{I}_1 = 40 \angle -\cos^{-1}(0,866) \Rightarrow \mathbf{I}_1 = 40 \angle -30^\circ \text{ A}$$

$$\mathbf{V}_1 = [(0,5 + j1,5) + (4,5 + j16)] \cdot \mathbf{I}_1 + \mathbf{V}'_2 \Rightarrow$$

$$\mathbf{V}_1 = (5 + j17,5) \cdot [40 \angle -30^\circ] + 2400 \Rightarrow \mathbf{V}_1 = 2966,7 \angle 9,8^\circ \text{ V}$$

$$V_{1\pi} = \sqrt{3} \cdot V_{1\varphi} = \sqrt{3} \cdot 2966,7 \Rightarrow \boxed{V_{1\pi} = 5138,5 \text{ V}}$$