

Μηχανές εναλλασσομένου ρεύματος

1 Εισαγωγή

Οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος (Ε.Ρ.) αποτελούν τη συντριπτική πλειονότητα των ηλεκτρικών μηχανών που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία, κυρίως λόγω της επικράτησης του εναλλασσόμενου ρεύματος στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, οι μηχανές Ε.Ρ. σε σχέση με τις μηχανές Σ.Ρ. παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς το κόστος, τον όγκο και το βάρος ανά μονάδα ισχύος, τις απαιτήσεις συντήρησης και την αξιοπιστία. Από την άλλη πλευρά, οι μηχανές Σ.Ρ. ως κινητήρες παρουσιάζουν σημαντική απλότητα ως προς τον έλεγχο των στροφών, λόγω της ανεξαρτησίας του ρεύματος διέγερσης από το ρεύμα τροφοδοσίας (τυμπάνου).

Οι μηχανές Ε.Ρ. ως κινητήρες, απορροφούν ηλεκτρική ισχύ από μία εναλλασσόμενη πηγή τάσης (μονοφασική ή τριφασική) και τη μετατρέπουν σε μηχανική ισχύ στο δρομέα. Ως γεννήτριες δε, καταναλώνουν μηχανική ισχύ από έναν κινητήριο μηχανισμό και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρική ισχύ στα τυλίγματα του στάτη.

Εάν ο στάτης έχει τριφασικό τύλιγμα, τότε η μηχανή είναι τριφασική, ενώ εάν ο στάτης έχει ένα μόνο τύλιγμα η μηχανή είναι μονοφασική. Συνήθως στη βιομηχανία χρησιμοποιούνται οι τριφασικές μηχανές, λόγω του υψηλότερου βαθμού απόδοσης, του χαμηλότερου θορύβου, της υψηλότερης ισχύος ανά μονάδα όγκου κλπ. Για το λόγο αυτό, η παρούσα μελέτη θα επικεντρωθεί στις τριφασικές μηχανές Ε.Ρ.

Όμοια με τις μηχανές Σ.Ρ., τα βασικά μεγέθη των τριφασικών μηχανών Ε.Ρ. είναι τα εξής:

1. Η ονομαστική ισχύς (P_N), η οποία είναι η μηχανική ισχύς στον περιστρεφόμενο άξονα της μηχανής και ισούται με το γινόμενο της ονομαστικής ροπής (M_N) και της ονομαστικής ταχύτητας (Ω_N):

$$P_N = M_N \Omega_N, \quad \Omega_N = 2\pi n_N \quad (1)$$

n_N , ο ονομαστικός αριθμός στροφών

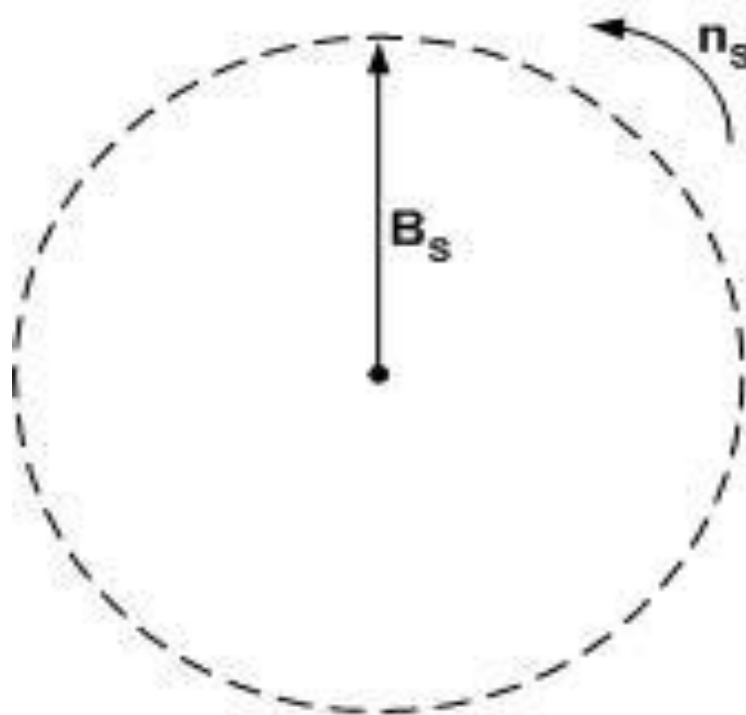
2. Η ονομαστική τάση των τυλιγμάτων του στάτη (V_N), η οποία – όπως και στους τριφασικούς μετασχηματιστές – είναι η πολική τάση. Για το λόγο αυτό στα τεχνικά φυλλάδια καθορίζεται η τιμή της πολικής τάσης τόσο για τη συνδεσμολογία αστέρα, όσο και για τη συνδεσμολογία τριγώνου.
3. Το ονομαστικό ρεύμα του στάτη (I_N), το οποίο είναι επίσης πολική τιμή και άρα ισχύει ό,τι ειπώθηκε για την ονομαστική τάση.

Η ηλεκτρική ισχύς που καταναλώνεται (κινητήρας) ή που παράγεται (γεννήτρια) δίνεται από τη σχέση:

$$P_{\eta\lambda} = \sqrt{3} \cdot V_{\Pi} I_{\Pi} \cos \phi \quad (2),$$

όπου V_{Π} , I_{Π} , οι πολικές τιμές τάσης και ρεύματος, ενώ $\cos \phi$ είναι ο συντελεστής ισχύος. Άρα, για το βαθμό απόδοσης ισχύουν όσα έχουν ειπωθεί για τις μηχανές Σ.Ρ.

2 Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο – Σύγχρονες και ασύγχρονες μηχανές Ε.Ρ.



Σχήμα 1. Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο

Το κοινό χαρακτηριστικό όλων των κατηγοριών μηχανών Ε.Ρ., είναι ότι στο διάκενο ανάμεσα στο στάτη και στο δρομέα δημιουργείται μία ιδιαίτερη μορφή μαγνητικού πεδίου το οποίο ονομάζεται στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Το πεδίο αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα 1, όπου γίνεται φανερό πώς πρόκειται για ένα μαγνητικό πεδίο με μέτρο B_s , το οποίο περιστρέφεται στο χώρο του διακένου με αριθμό στροφών n_s στη μονάδα του χρόνου. Ο αριθμός στροφών του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου στη μονάδα του χρόνου, ονομάζεται σύγχρονος αριθμός στροφών και είναι χαρακτηριστικός στις μηχανές Ε.Ρ.

Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά της ισχύος από το στάτη στο δρομέα (κινητήρας) ή από το δρομέα στο στάτη (γεννήτρια). Ο σύγχρονος αριθμός

στροφών (n_s) συνδέεται συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης στο στάτη της μηχανής (f_s) με τη σχέση:

$$n_s = \frac{f_s}{p} \quad (3),$$

όπου p ο αριθμός ζευγών πόλων της μηχανής. Παρατηρούμε λοιπόν, πως ο σύγχρονος αριθμός στροφών μπορεί να πάρει μόνο συγκεκριμένες τιμές, οι οποίες καθορίζονται από τη συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου. Για το ελληνικό δίκτυο, όπου η συχνότητα είναι 50Hz ή 3000min^{-1} , οι δυνατές τιμές που μπορεί να λάβει ο σύγχρονος αριθμός στροφών είναι οι εξής:

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

Αριθμός ζευγών πόλων (p)	n_s ($f_s = 50\text{Hz} = 3000\text{min}^{-1}$)
1	3000min^{-1}
2	1500min^{-1}
3	1000min^{-1}
4	750min^{-1}
5	600min^{-1}
....
50	60min^{-1}
....

Οι μηχανές Ε.Ρ. στις οποίες ο δρομέας περιστρέφεται με αριθμό στροφών ίσο με το σύγχρονο, ονομάζονται σύγχρονες μηχανές (Σ.Μ.). Οι μηχανές Ε.Ρ. στις οποίες ο δρομέας περιστρέφεται με αριθμό στροφών κοντά στο σύγχρονο αλλά ποτέ στην τιμή αυτή, ονομάζονται ασύγχρονες μηχανές (Α.Μ.). Οι σύγχρονες και οι ασύγχρονες μηχανές γενικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο ως κινητήρες όσο και ως γεννήτριες. Από την αρχή λειτουργίας όμως που διέπει την κάθε κατηγορία, γίνεται εμφανές πως οι ασύγχρονες μηχανές χρησιμοποιούνται συνήθως ως κινητήρες (κινητήρες Ε.Ρ. ή επαγωγικοί κινητήρες) και οι σύγχρονες μηχανές χρησιμοποιούνται συνήθως ως γεννήτριες (γεννήτριες Ε.Ρ. ή εναλλάκτες).

Όπως έχει ήδη ειπωθεί, θα ασχοληθούμε με τις τριφασικές μόνο περιπτώσεις των δύο αυτών κατηγοριών μηχανών Ε.Ρ., λόγω της σπουδαιότητάς τους σε βιομηχανικό επίπεδο.

3 Ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας

Ο τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας παράγει το στρεφόμενο πεδίο του διακένου από τη διανυσματική σύνθεση των τριών μαγνητικών πεδίων που παράγουν τα τρία αντίστοιχα τυλίγματα του στάτη. Το στρεφόμενο πεδίο δημιουργεί ρεύματα εξ επαγωγής στο δρομέα και επομένως ηλεκτρομαγνητική ροπή, η οποία και περιστρέφει το δρομέα. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι δρομέων στις Α.Μ.:

- Δακτυλιοφόρος δρομέας, όπου ο δρομέας διαθέτει ένα τριφασικό τυλίγμα όπως αυτό του στάτη. Το τυλίγμα αυτό καταλήγει στο ακροκιβώτιο συνδέσεων της μηχανής, μέσω συμπαγών δακτυλίων (ένας δακτύλιος για κάθε ακροδέκτη του τριφασικού τυλίγματος).
- Βραχυκυκλωμένου κλωβού, ο οποίος αποτελεί το συνηθέστερο τύπο στους επαγωγικούς κινητήρες. Σε αυτή την περίπτωση, ο δρομέας διαθέτει αυλάκια στα οποία εγχύεται αλουμίνιο, δημιουργώντας έτσι ένα σύνολο βραχυκυκλωμένων σπειρών. Οι σπείρες αυτές διαρρέονται από το ρεύμα εξ επαγωγής και επομένως σε αυτές οφείλεται η ανάπτυξη της ηλεκτρομαγνητικής ροπής περιστροφής του δρομέα. Σε σχέση με το δακτυλιοφόρο δρομέα, ο βραχυκυκλωμένος κλωβός αποτελεί πιο χαμηλού κόστους λύση. Παράλληλα, η εξαιρετικά συμπαγής μορφή του επιτρέπει την ανάπτυξη υψηλού αριθμού στροφών, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος καταστροφής τυλίγματος από υψηλές φυγοκεντρικές δυνάμεις.

Στη λειτουργία ως κινητήρας, ο αριθμός στροφών της Α.Μ. είναι λίγο μικρότερος από το σύγχρονο αριθμό στροφών. Ονομάζουμε ολίσθηση (s) στις Α.Μ. το μέγεθος που ορίζεται από τη σχέση:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (4),$$

όπου n , ο αριθμός στροφών του δρομέα. Η σχέση δε που συνδέει την ηλεκτρομαγνητική ροπή (M_e) με την ολίσθηση του κινητήρα (αμελώντας την ωμική αντίσταση του στάτη) είναι η εξής:

$$M_e = \frac{3}{\Omega_s} \frac{V_{s\phi}^2}{X_s^2} \frac{r_R s(1-s)}{(\sigma s)^2 + r_R^2},$$
$$\Omega_s = 2\pi n_s = 2\pi \frac{f_s}{p} \quad (5)$$

$V_{s\phi}$, η φασική τάση του στάτη

X_s , ο ολικός συντελεστής αυτεπαγωγής του στάτη

$r_R = \frac{R_R}{X_R}$, η σταθερά του τυλίγματος του δρομέα

R_R , η ωμική αντίσταση του δρομέα

X_R , ο συντελεστής αυτεπαγωγής του δρομέα

$$\sigma = 1 - \frac{1}{(1 + \sigma_s)(1 + \sigma_R)} \quad (.6),$$

$\sigma_s = \frac{L_{S\sigma}}{L_m}$, $\sigma_R = \frac{L_{R\sigma}}{L_m}$, οι συντελεστές μερικής σκέδασης

$L_{S\sigma}$, $L_{R\sigma}$, οι συντελεστές σκέδασης στάτη και δρομέα

L_m , ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής στάτη και δρομέα

Ορίζεται ως ροπή ανατροπής M_κ , η μέγιστη ηλεκτρομαγνητική ροπή που μπορεί να αναπτύξει μία Α.Μ. Η ροπή αυτή αντιστοιχεί σε μία τιμή της ολίσθησης η οποία ονομάζεται ολίσθηση ανατροπής s_κ . Οι τιμές των δύο αυτών χαρακτηριστικών μεγεθών στην τριφασική Α.Μ. (κατά τη λειτουργία ως κινητήρας και αμελώντας την αντίσταση του στάτη) υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{cases} M_\kappa = \frac{3}{\Omega_s} \frac{V_{s\phi}^2}{2X_s} \frac{1-\sigma}{\sigma} \\ s_\kappa = \frac{r_R}{\sigma} \end{cases} \quad (7)$$

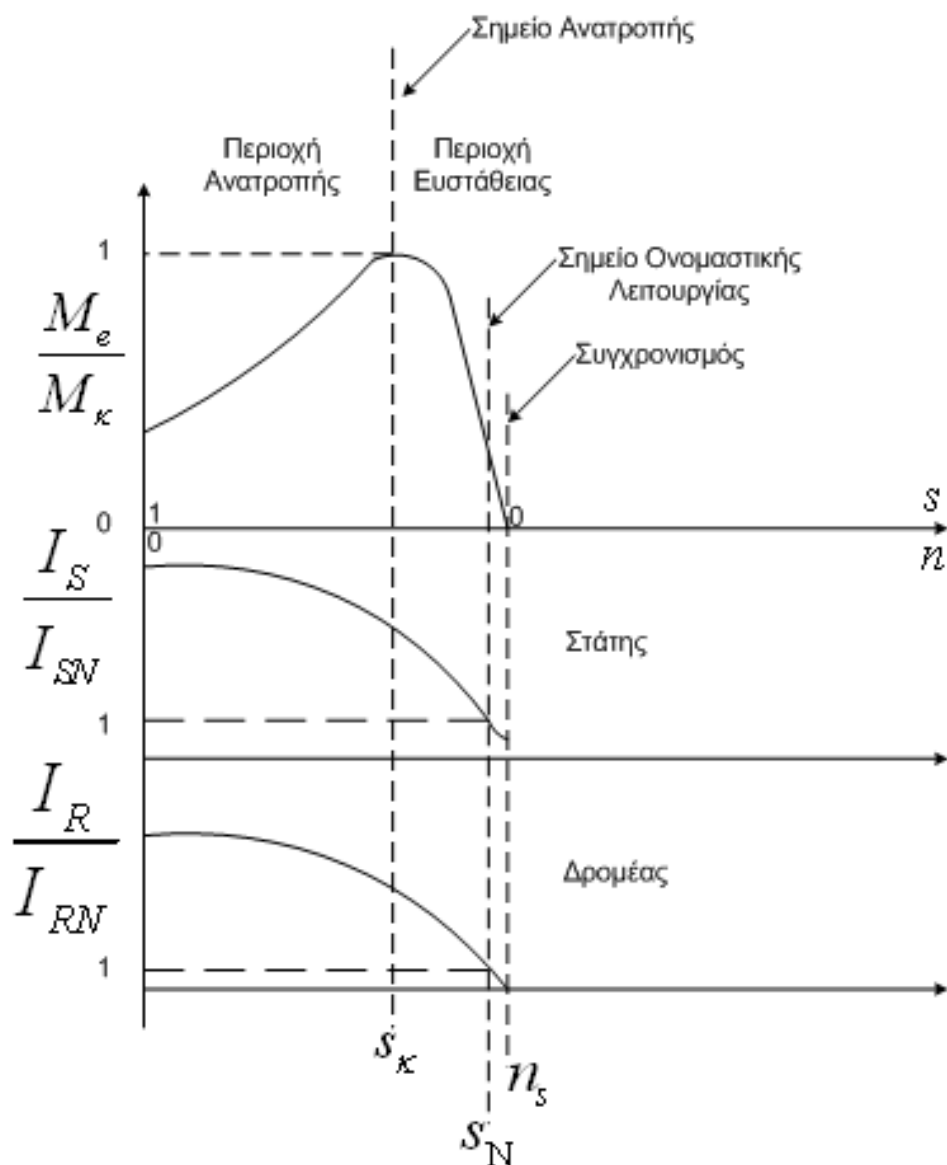
Έτσι, μπορούμε να περιγράψουμε την ηλεκτρομαγνητική ροπή του ασύγχρονου κινητήρα με αναφορά τη ροπή ανατροπής σύμφωνα με τον τύπο του KLOSS:

$$\frac{M_e}{M_\kappa} = \frac{2}{\frac{s_\kappa}{s} + \frac{s}{s_\kappa}} \quad (8)$$

Ο τύπος του KLOSS αναπαρίσταται στο σχήμα 2, μαζί με το ρεύματα του στάτη και του δρομέα (ενεργές τιμές) ως κλάσματα των αντίστοιχων ενεργών τιμών τους. Παρατηρούμε πως το σημείο ανατροπής είναι το όριο ανάμεσα σε δύο περιοχές λειτουργίας του κινητήρα: την περιοχή ευστάθειας και την περιοχή ανατροπής. Όσο το φορτίο του κινητήρα είναι μικρότερο από τη ροπή ανατροπής, τότε αυτός βρίσκεται στην περιοχή ευστάθειας. Το σημείο λειτουργίας περιγράφεται από τη σχέση (8). Εάν όμως το φορτίο ζητήσει ροπή μεγαλύτερη της ροπής ανατροπής, τότε ο κινητήρας οδηγείται στην περιοχή αστάθειας. Σε αυτή την

περίπτωση, ο κινητήρας επιβραδύνεται συνεχώς μέχρι να ακινητοποιηθεί, κατάσταση που συνοδεύεται από υπέρρευμα στο στάτη και στο δρομέα (περίπου τετραπλάσιο από την αντίστοιχη ονομαστική τιμή). Δηλαδή, ο κινητήρας βραχυκυκλώνεται. Επομένως, η περιοχή λειτουργίας στην οποία πρέπει να βρίσκεται πάντα ο κινητήρας είναι η ευσταθής περιοχή, όπου $0 \leq s \leq s_k$. Για $s = 0$, βρισκόμαστε στο σημείο συγχρονισμού όπου $n = n_s$ και επομένως ο ασύγχρονος κινητήρας δεν αναπτύσσει ηλεκτρομαγνητική ροπή (λειτουργία εν κενώ).

Από το ίδιο σχήμα, παρατηρούμε επίσης ότι το ονομαστικό σημείο λειτουργίας βρίσκεται κοντά στο σημείο συγχρονισμού. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι μεγάλες μεταβολές της ροπής του φορτίου δεν επηρεάζουν σημαντικά τον αριθμό στροφών της μηχανής στην περιοχή ευσταθούς λειτουργίας. Επιπλέον, η μέγιστη ροπή της μηχανής (ροπή ανατροπής) είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή (συνήθως 2 – 3 φορές μεγαλύτερη). Όμως η μηχανή δεν πρέπει να λειτουργεί συνεχώς σε ροπή υψηλότερη από την ονομαστική, διότι το ρεύμα τόσο στο στάτη όσο και στο δρομέα ξεπερνούν την ονομαστική τους τιμή.



Σχήμα 2. Οι καμπύλες ηλεκτρομαγνητικής ροπής, ρεύματος στάτη και ρεύματος δρομέα στον ασύγχρονο τριφασικό κινητήρα

4 Εκκίνηση τριφασικών Α.Μ. και ρύθμιση στροφών

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2, η εκκίνηση των τριφασικών ασύγχρονων κινητήρων παρουσιάζει ιδιαιτερότητες, καθώς η μηχανή στην ηρεμία ($s = 1$) συμπεριφέρεται ως βραχυκύκλωμα (υψηλό ρεύμα εκκίνησης και χαμηλή ροπή εκκίνησης). Για το λόγο αυτό, διάφορες μέθοδοι εκκίνησης χρησιμοποιούνται για αυτή την κατηγορία μηχανών. Από αυτές, οι σπουδαιότερες είναι οι εξής:

- i. **Απ' ευθείας εκκίνηση**, η οποία χρησιμοποιείται σε μηχανές μικρής ισχύος (μικρότερες συνήθως από 3.0kW). Σε αυτή την περίπτωση, η μηχανή συνδέεται απευθείας με την τριφασική τάση κατά την εκκίνηση. Το ρεύμα εκκίνησης δεν είναι ιδιαίτερα υψηλό, διότι

στις χαμηλής ισχύος μηχανές συνήθως η αντίσταση και η σκέδαση του στάτη και του δρομέα παρουσιάζουν υψηλές τιμές.

ii. Εκκίνηση Υ/Δ, η οποία χρησιμοποιείται σε μηχανές μεσαίας και υψηλής ισχύος. Σε αυτή την περίπτωση, η μηχανή κατά την εκκίνηση χρησιμοποιεί συνδεσμολογία αστέρα στο τριφασικό τύλιγμα του στάτη. Έτσι, το ρεύμα εκκίνησης περιορίζεται στο 1/3 του ρεύματος που θα εμφανιζόταν εάν χρησιμοποιούνταν η συνδεσμολογία τριγώνου. Στη συνέχεια, όταν η μηχανή πλησιάζει τον ονομαστικό αριθμό στροφών, η συνδεσμολογία τριγώνου στο στάτη αποκαθίσταται αυτόματα μέσω φυγοκεντρικού διακόπτη. Έτσι, η μηχανή στην κανονική λειτουργία μπορεί να αποδώσει την ονομαστική της ροπή. Η μέθοδος αυτή έχει δύο μειονεκτήματα: α) εφαρμόζεται μόνο σε μηχανές που εργάζονται σε κανονική λειτουργία με συνδεσμολογία τριγώνου στο στάτη, β) η ροπή εκκίνησης (όπως και το ρεύμα) είναι περιορισμένη στο 1/3 της αντίστοιχης ροπής με συνδεσμολογία τριγώνου. Άρα, στην εκκίνηση Υ/Δ πρέπει είτε η ροπή του φορτίου να είναι μειωμένη, είτε το φορτίο να μη συνδέεται μηχανικά με το δρομέα κατά την εκκίνηση.

iii. Εκκίνηση μέσω ηλεκτρονικού αντιστροφέα (INVERTER), η οποία αποτελεί και τη βέλτιστη μέθοδο εκκίνησης. Σε αυτή την περίπτωση, χρησιμοποιείται ένας ηλεκτρονικός τριφασικός αντιστροφέας, προκειμένου να τροφοδοτεί τη μηχανή με μεταβαλλόμενη τριφασική εναλλασσόμενη τάση τόσο σε ενεργό τιμή, όσο και σε συχνότητα. Η στρατηγική ρύθμισης της τάσης προσαρμόζεται κατάλληλα, ώστε σε κάθε περίπτωση ο λόγος της τάσης και της συχνότητας στο στάτη να είναι σταθερός, $\frac{V_{s\phi}}{f_s} = \text{σταθερός}$.

Τότε, σύμφωνα με τη σχέση (7), προκύπτει ότι η ροπή ανατροπής του κινητήρα διατηρείται σταθερή, ενώ το ρεύμα εκκίνησης περιορίζεται περίπου στην ονομαστική του τιμή. Άρα, η χρήση του INVERTER επιτρέπει την εκκίνηση της μηχανής ακόμα και υπό πλήρες φορτίο, καθώς η ροπή ανατροπής και άρα και η ροπή εκκίνησης δεν επηρεάζονται. Βέβαια, εάν η ροπή του φορτίου στην εκκίνηση είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη του κινητήρα, τότε η εκκίνηση πρέπει να γίνεται είτε με μειωμένο φορτίο, είτε χωρίς την παρουσία του φορτίου. Η μέθοδος του ηλεκτρονικού αντιστροφέα είναι ιδιαίτερα οικονομική και αποδοτική (περιορισμός των απωλειών και του χρόνου εκκίνησης) και γι' αυτό χρησιμοποιείται σήμερα ευρύτατα στη βιομηχανία.

Πέραν αυτού, ο ηλεκτρονικός αντιστροφέας χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά σήμερα στις προηγμένες βιομηχανίες και στις συσκευές μαζικής παραγωγής, για τη ρύθμιση των στροφών σε ασύγχρονους τριφασικούς κινητήρες. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται

λειτουργική συμπεριφορά όμοια με αυτή του κινητήρα Σ.Ρ. – Ξ.Δ., η οποία είναι γραμμική (γραμμική σχέση ανάμεσα στην τάση και στις στροφές του κινητήρα). Έτσι, ο τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας μπορεί να λειτουργήσει σε μεγάλο εύρος στροφών, από μηδέν έως το σύγχρονο αριθμό στροφών.

Εάν αντίθετα προσπαθήσουμε να ρυθμίσουμε τις στροφές με μεταβολή (μείωση) μόνο της ενεργού τιμής της τάσης του στάτη (π.χ. μέσω τριφασικού Μ/Τ μεταβλητής λήψης), τότε από τη σχέση (7) προκύπτει ότι η ροπή ανατροπής μειώνεται σημαντικά (αφού είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης του στάτη). Επομένως, η ταχύτητα της μηχανής δεν είναι δυνατό να ρυθμιστεί σε μεγάλο εύρος στροφών, διότι η μηχανή θα οδηγηθεί στην περιοχή ανατροπής.

5 Η σύγχρονη τριφασική γεννήτρια

Η σύγχρονη τριφασική μηχανή διαθέτει στο δρομέα ένα τύλιγμα συνεχούς ρεύματος. Έτσι, ο ακίνητος δρομέας δημιουργεί ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο. Όταν ο δρομέας περιστρέφεται από τον κινητήριο μηχανισμό, τότε το μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται με ταχύτητα ίση με αυτή του δρομέα. Για το λόγο αυτό η μηχανή ονομάζεται σύγχρονη. Το στρεφόμενο πεδίο δημιουργεί εναλλασσόμενη τριφασική τάση εξ επαγωγής στο τριφασικό τύλιγμα του στάτη, η οποία και τροφοδοτεί το εκάστοτε ηλεκτρικό φορτίο της γεννήτριας.

Οι βασικές κατηγορίες Σ.Μ. είναι οι εξής:

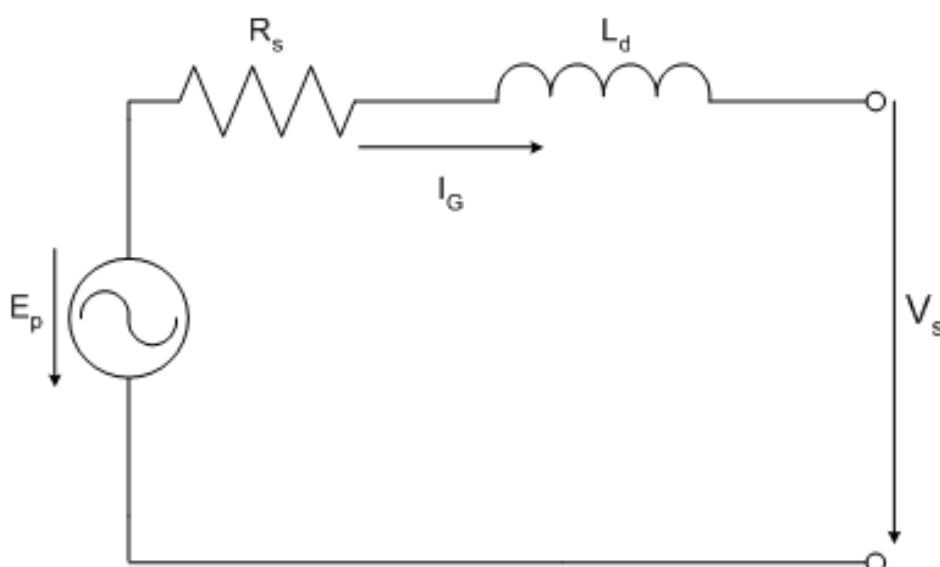
α) Μηχανή με έκτυπους πόλους, οι πόλοι της οποίας είναι όμοιοι με αυτοί των μηχανών Σ.Ρ. Οι μηχανές αυτές χρησιμοποιούνται με μεγάλο αριθμό ζευγών πόλων (p), προκειμένου να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές χαμηλού αριθμού στροφών. Χαρακτηριστική εφαρμογή τους είναι οι γεννήτριες των υδροηλεκτρικών εργοστασίων. Λόγω του χαμηλού αριθμού στροφών, κατασκευάζονται με μεγάλη διάμετρο και μικρό μήκος, καθώς οι φυγοκεντρικές δυνάμεις δεν είναι υψηλές.

β) Μηχανή με κατανεμημένους πόλους, στην οποία το τύλιγμα διέγερσης (του δρομέα) τοποθετείται σε αυλάκια τα οποία διαμορφώνονται στην επιφάνεια του δρομέα. . Οι μηχανές αυτές χρησιμοποιούνται με μικρό αριθμό ζευγών πόλων (p), προκειμένου να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές υψηλού αριθμού στροφών. Χαρακτηριστική εφαρμογή τους είναι οι γεννήτριες των θερμοηλεκτρικών εργοστασίων. Λόγω του υψηλού αριθμού στροφών, κατασκευάζονται με μικρή διάμετρο και μεγάλο μήκος, καθώς οι φυγοκεντρικές δυνάμεις είναι υψηλές.

Οι Σ.Μ. συνήθως χρησιμοποιούνται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας ως γεννήτριες υψηλής ισχύος. Σε αυτή την περίπτωση και υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας, το ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα των τριφασικών σύγχρονων γεννητριών είναι αυτό του σχήματος 3, όπου V_s είναι η τάση του δικτύου. Επομένως, η τάση εξ επαγωγής (E_p) μπορεί να υπολογισθεί από το κύκλωμα αυτό ως:

$$\vec{E}_p = \vec{V}_s + \vec{R}_s \vec{I}_G + \vec{\omega L}_d \vec{I}_G \quad (9), \quad \omega = 2\pi f_s.$$

Φυσικά, η σχέση αυτή είναι διανυσματική και άρα πρέπει να αντιμετωπισθεί όπως και στην περίπτωση των μετασχηματιστών.



Σχήμα 3. Το ισοδύναμο κύκλωμα της τριφασικής σύγχρονης γεννήτριας συνδεδεμένης στο δίκτυο, υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας.

Η γωνία ανάμεσα στην τάση εξ επαγωγής και στην τερματική τάση του δικτύου ονομάζεται πολική γωνία θ και είναι χαρακτηριστική στις Σ.Μ.: $\theta = \angle \vec{E}_p, \vec{V}_s$. Η πολική γωνία

μπορεί να λάβει τιμές στο πεδίο τιμών: $-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$. Εάν η πολική γωνία ξεπεράσει τις

οριακές τιμές $\pm \frac{\pi}{2}$, τότε η Σ.Μ. αποσυγχρονίζεται (η ταχύτητα του δρομέα δε συμπίπτει

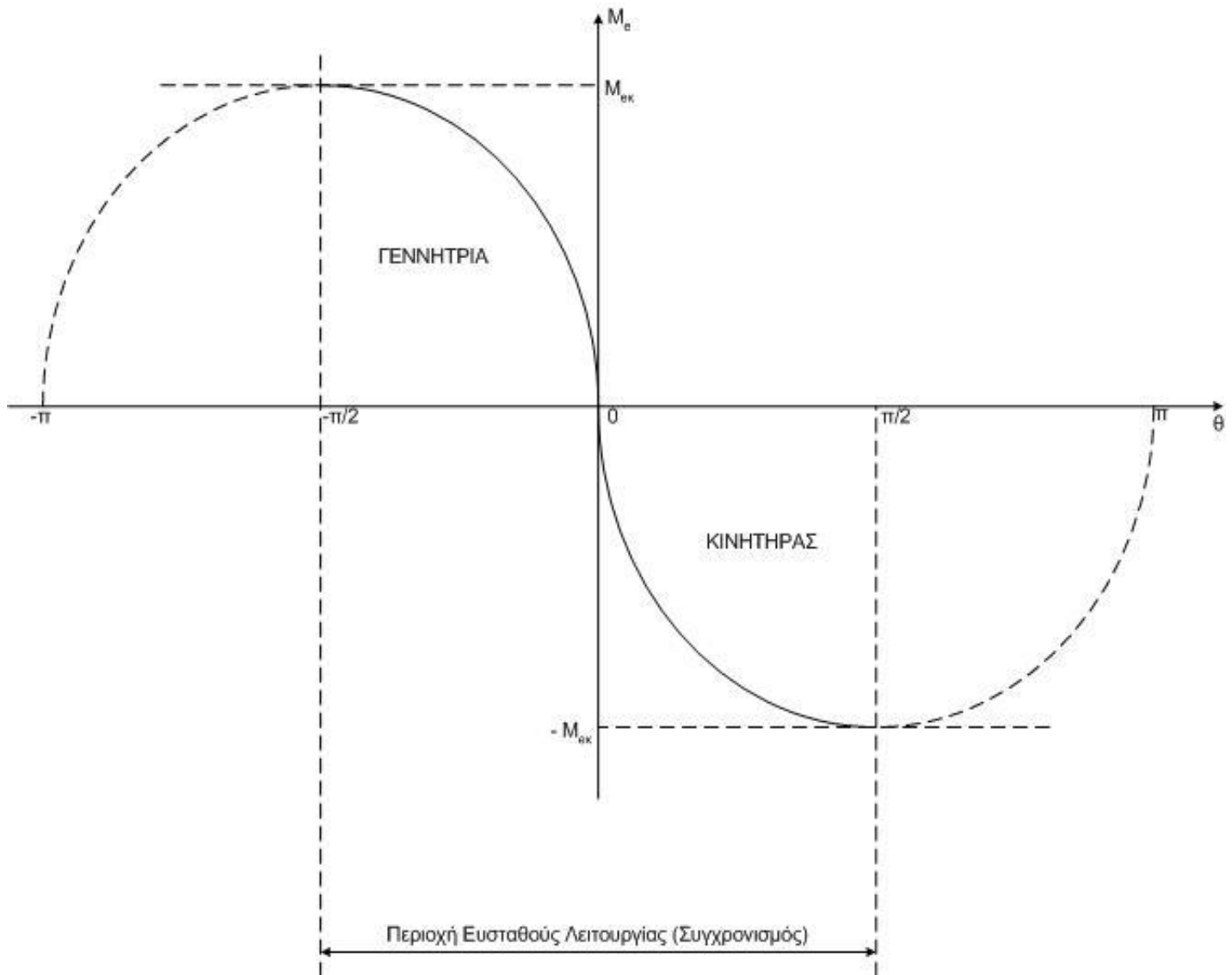
πλέον με το σύγχρονο αριθμό στροφών) και συμπεριφέρεται ως βραχυκύκλωμα. Συνήθως, για λόγους ασφάλειας, η πολική γωνία των γεννητριών του δικτύου δεν ξεπερνά την τιμή των 45° ($\pi/4$). Η ηλεκτρομαγνητική ροπή της τριφασικής Σ.Μ. δίνεται από τη σχέση:

$$M_e = -3 \frac{p}{\omega} \frac{E_p \cdot V_s}{\omega L_d} \sin \theta, \quad \omega = 2\pi f_s \quad (10).$$

Προφανώς, όταν η Σ.Μ. λειτουργεί ως γεννήτρια η πολική γωνία κυμαίνεται μεταξύ:

$$-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq 0,$$

ενώ κατά τη λειτουργία ως κινητήρας η πολική γωνία κυμαίνεται μεταξύ: $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$.



Σχήμα 4. Η ηλεκτρομαγνητική ροπή συναρτήσει της πολικής γωνίας στην τριφασική Σ.Μ.

Τέλος, για την περίπτωση των σύγχρονων τριφασικών γεννητριών, αξίζει να σημειωθεί ότι συνήθως στα δεδομένα συμπεριλαμβάνεται και η ονομαστική φαινόμενη ισχύς της γεννήτριας

που μπορεί να προσφέρει στο φορτίο. Επιπλέον, η χαρακτηριστική εμπέδηση: $X_d = \omega L_d$, του ισοδυνάμου κυκλώματος συνήθως δίνεται ως καθαρός αριθμός, από τη σχέση:

$$x_d = X_d \frac{I_N}{V_N} \quad (11),$$

όπου I_N και V_N είναι αντίστοιχα οι ονομαστικές τιμές του ρεύματος και της τάσης του στάτη.

6 Εφαρμογές Μηχανών Ε.Ρ.

α) Μελέτη λειτουργίας τριφασικής Α.Μ.

Μία ηλεκτρική μηχανή έχει τα παρακάτω ονομαστικά χαρακτηριστικά: $P_N = 100\text{kW}$, $V_N = 0\text{kV/Y}$, $\cos\varphi_N = 0,86$, $\eta_N = 0,85$, $n_N = 980\text{min}^{-1}$, $f = 50\text{Hz}$.

α1. Να βρεθεί ο τύπος της μηχανής

Αφού δίδεται ονομαστικός συντελεστής ισχύος και συνδεσμολογία αστέρα, πρόκειται για τριφασική μηχανή Ε.Ρ. Επίσης, το ότι η μηχανή είναι Ε.Ρ. γίνεται φανερό και από τη συχνότητα λειτουργίας. Αφού ο ονομαστικός αριθμός στροφών της μηχανής δε συμπίπτει με κάποιο σύγχρονο αριθμό στροφών (αναφορικά με τη συχνότητα των 50Hz), προκύπτει ότι η μηχανή είναι μία **Ασύγχρονη Τριφασική Μηχανή**. Επιπλέον, αφού δεν έχουμε δεδομένα σχετικά με το τύλιγμα του δρομέα, προκύπτει ότι η μηχανή είναι **βραχυκυκλωμένου κλωβού**.

α2. Να βρεθεί ο σύγχρονος αριθμός στροφών και ο αριθμός ζευγών πόλων της μηχανής

Ο σύγχρονος αριθμός στροφών της μηχανής (αφού πρόκειται για Α.Μ.) είναι ο πλησιέστερος μεγαλύτερος σύγχρονος αριθμός στροφών ως προς τον ονομαστικό αριθμό στροφών. Αφού $n_N = 980\text{min}^{-1}$, προκύπτει από τον πίνακα 4-1 ότι:

$$n_s = 1000\text{min}^{-1}$$

Επομένως, από τη σχέση (3) προκύπτει ότι:

$$n_s = \frac{f}{p} \Rightarrow p = \frac{f}{n_s} = \frac{50\text{Hz}}{1000\text{min}^{-1}} = \frac{3000\text{min}^{-1}}{1000\text{min}^{-1}} \Rightarrow p = 3$$

α3. Στην ονομαστική κατάσταση λειτουργίας ως κινητήρας, να υπολογισθεί η ενεργός τιμή του ρεύματος στο στάτη (I_N) και η ονομαστική ενεργός, άεργος και φαινόμενη ισχύς

Αφού γνωρίζουμε τον ονομαστικό βαθμό απόδοσης εργαζόμαστε ως εξής:

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_{\eta\lambda,N}} = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot V_N \cdot I_N \cdot \cos \phi_N} \Rightarrow I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot \eta_N \cdot V_N \cdot \cos \phi_N} \Rightarrow \boxed{I_N = 13,4A}$$

Άρα, οι τρεις ζητούμενες ισχύεις είναι:

$$P_{\eta\lambda,N} = \sqrt{3} \cdot V_N \cdot I_N \cdot \cos \phi_N \Rightarrow \boxed{P_{\eta\lambda,N} = 117,5kW}$$

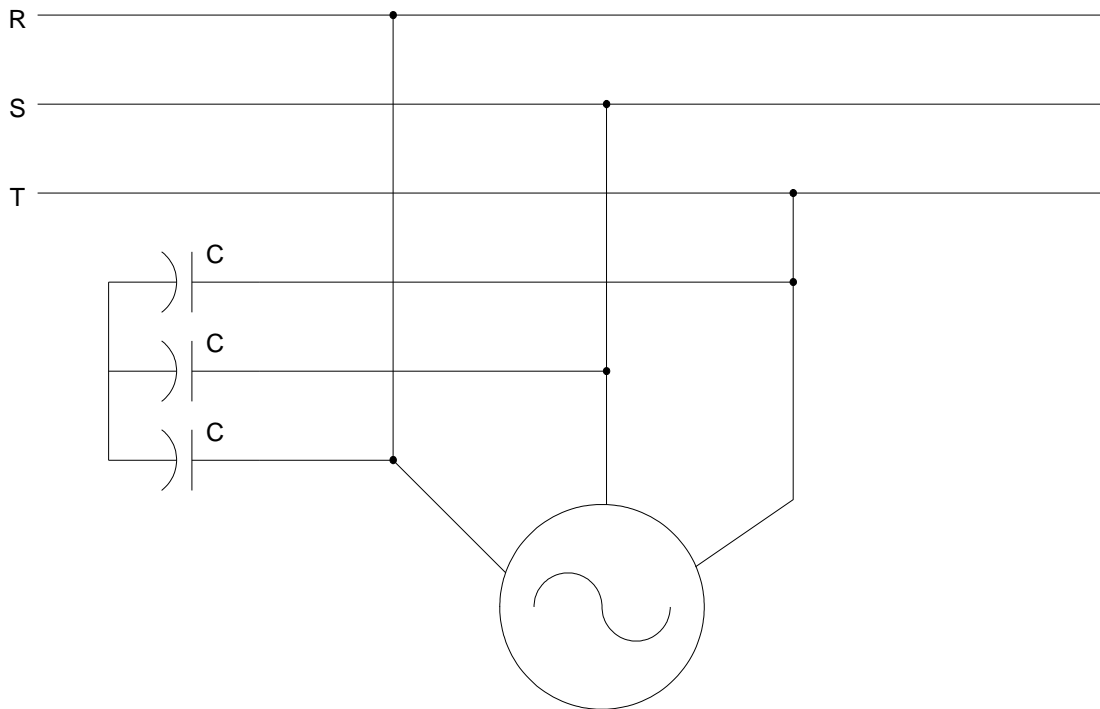
$$S_N = \sqrt{3} \cdot V_N \cdot I_N \Rightarrow \boxed{S_N = 136,6kVA}$$

$$Q_N = \sqrt{3} \cdot V_N \cdot I_N \cdot \sin \phi_N \Rightarrow \boxed{Q_N = 69,7kVAR \text{ επαγ.}}$$

Σημειώνεται ότι στις Α.Μ. ο συντελεστής ισχύος είναι πάντα επαγωγικός (επαγωγικοί κινητήρες), κάτι που δεν ισχύει στις Σ.Μ. όπου εκεί ο συντελεστής ισχύος μπορεί να είναι και χωρητικός.

α Να σχεδιασθεί και να υπολογισθεί διάταξη διόρθωσης του συντελεστή ισχύος

Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιήσουμε ένα συνδυασμό τριών όμοιων πυκνωτών σε συνδεσμολογία αστέρα:



Προκειμένου να επιτευχθεί μοναδιαίος συντελεστής ισχύος ($\cos \phi = 1$), πρέπει να ισχύει:

$$3\omega CV_\phi^2 = Q_N \Rightarrow 3 \cdot 2\pi fC \frac{V_N^2}{3} = 2\pi fCV_N^2 = Q_N \Rightarrow C = \frac{Q_N}{2\pi fV_N^2} \Rightarrow \boxed{C = 6,16\mu F}$$

Προφανώς, στην παραπάνω σχέση V_φ είναι η φασική τάση του συστήματος, η οποία συμπίπτει τόσο με τη φασική τάση των πυκνωτών όσο και με τη φασική τάση του στάτη της Α.Μ., λόγω της συνδεσμολογίας αστέρα των δύο αυτών κυκλωμάτων.

α5. Εάν $s_x = 10\%$ να υπολογισθεί η ροπή ανατροπής

Εφαρμόζουμε το γενικό τύπο του KLOSS για την ονομαστική ροπή:

$$\frac{M_N}{M_K} = \frac{2}{\frac{s_K}{s_N} + \frac{s_N}{s_K}} \quad (A-1)$$

Από τα δεδομένα γνωρίζουμε ότι $s_x = 0,1$. Επιπλέον, από τη σχέση (4) προκύπτει:

$$s_N = \frac{n_s - n_N}{n_s} = \frac{1000 \text{ min}^{-1} - 980 \text{ min}^{-1}}{1000 \text{ min}^{-1}} = \frac{20}{1000} = 2\% \Rightarrow s_N = 0,02$$

Άρα:

$$\frac{s_K}{s_N} = \frac{0,1}{0,02} = 5, \quad \frac{s_N}{s_K} = \frac{1}{5} = 0,2$$

Επιπλέον, αμελώντας τις τριβές, μπορούμε να υπολογίσουμε την ονομαστική ηλεκτρομαγνητική ροπή από τη σχέση:

$$P_N = M_N \Omega_N = M_N 2\pi n_N \Rightarrow M_N = \frac{P_N}{2\pi n_N} = \frac{100 \text{ kW}}{2 \cdot 3,14 \cdot 980 \cdot \frac{1}{60 \text{ sec}}} \Rightarrow M_N = 0,975 \text{ kW sec}$$

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω μεγέθη στη σχέση (A-1) καταλήγουμε ότι:

$$\frac{0,975 \text{ kW sec}}{M_K} = \frac{2}{5 + 0,2} \Rightarrow \boxed{M_K = 2,535 \text{ kW sec}}$$

Παρατηρούμε ότι η ροπή ανατροπής είναι 2,6 φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή.

β) Μελέτη τριφασικής Σ.Μ. στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας

Ονομαστικά μεγέθη: $S_N = 325 \text{ MVA}$, $V_N = 25 \text{ kV}$, $p = 6$, $x_d = 0,97$, $f = 50 \text{ Hz}$,

$\cos\varphi_N = 0,82$, $R_s \cong 0$.

β1. Υπό ονομαστικό φορτίο $\cos\varphi_N = 0,82$ επαγ. να υπολογισθεί η ονομαστική πολική γωνία της γεννήτριας (η μηχανή είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο) και η τάση εξ επαγωγής

Θα χρησιμοποιήσουμε το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 3, όπου $V_s = V_N$ και $R_s = 0$.

Επομένως, από αυτό το ισοδύναμο κύκλωμα προκύπτει η διανυσματική σχέση:

$\vec{E}_p = \vec{V}_N + \vec{X}_d \vec{I}_N$, όπου το διάνυσμα \vec{V}_N αποτελεί την αναφορά. Το ονομαστικό ρεύμα είναι:

$$S_N = \sqrt{3} \cdot V_N \cdot I_N \Rightarrow I_N = 7,65kA$$

Άρα, η εμπέδηση X_d είναι:

$$x_d = X_d \frac{I_N}{V_N} = X_d \frac{7,65kA}{25kV} \Rightarrow 0,97 = X_d \frac{1}{3,27\Omega} \Rightarrow X_d = 3,17\Omega$$

και επομένως: $X_d I_N = 3,17\Omega \cdot 7,65kA = 24,25kV$

Φυσικά, ο υπολογισμός του γινομένου $X_d I_N$ μπορεί να γίνει απλούστερα από τη σχέση (11):

$$x_d = X_d \frac{I_N}{V_N} \Rightarrow X_d I_N = x_d V_N$$

Στο παρακάτω διανυσματικό διάγραμμα, παρατηρούμε ότι ως διαφορά φάσης ανάμεσα στο ρεύμα και την τάση των ακροδεκτών της γεννήτριας (πλευρά του δικτύου) χρησιμοποιείται η παραπληρωματική της γωνίας ϕ_N ($180^\circ - \phi_N$). Με αυτό τον τρόπο, η ενεργός ισχύς της μηχανής στους ακροδέκτες της παρουσιάζεται αρνητική, γεγονός που δηλώνει ότι η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια. Στην περίπτωση της λειτουργίας ως κινητήρας, πρέπει να χρησιμοποιείται ως διαφορά φάσης η ϕ_N .

Επίσης, χρησιμοποιώντας $2,0kV/cm$, το διάνυσμα \vec{V}_N έχει μήκος:

$$25kV \frac{1}{2kV/cm} = 12,5cm$$

και το διάνυσμα $\vec{X}_d I_N$ έχει μήκος: $24,25kV \frac{1}{2kV/cm} = 12,125cm \cong 12,1cm$

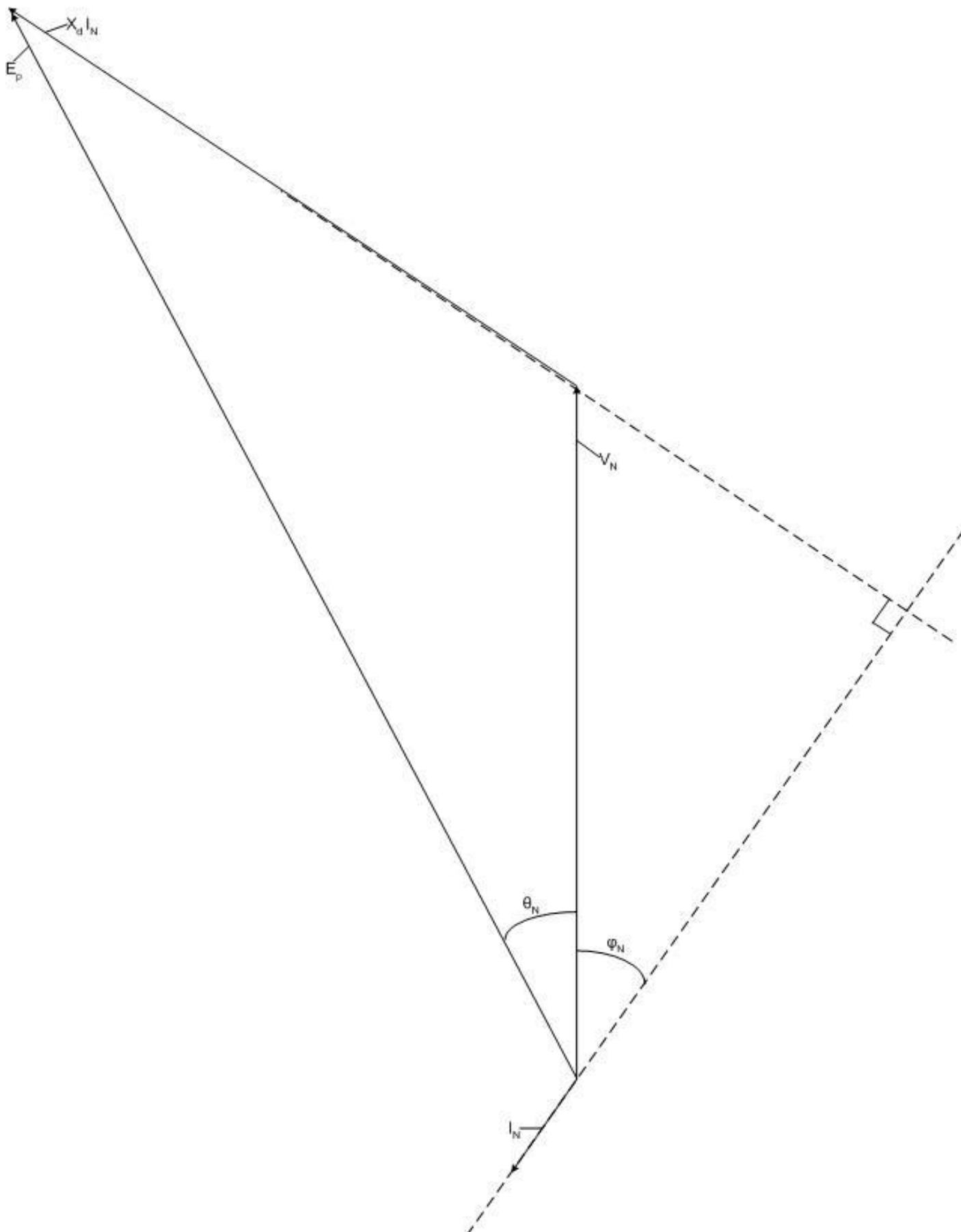
Για το ρεύμα \vec{I}_N δε χρειάζεται κάποια συγκεκριμένη αναπαράσταση, αφού δεν εισέρχεται σε υπολογισμούς. Έτσι, χρησιμοποιούμε για την αναπαράστασή του αυθαίρετα μήκος $2cm$. Φυσικά, οποιοδήποτε μήκος και να χρησιμοποιηθεί είναι αποδεκτό. Η γωνία ανάμεσα στην τάση και το ρεύμα των ακροδεκτών είναι:

$$\cos \phi_N = 0,82 \Rightarrow \phi_N = 35^\circ \Rightarrow 180^\circ - \phi_N = 180^\circ - 35^\circ = 145^\circ$$

Από το διανυσματικό διάγραμμα προκύπτει τελικά ότι:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_N \cong -27^\circ \\ E_p \rightarrow 21,6cm \Rightarrow E_p = 21,6cm \frac{2kV}{cm} \Rightarrow E_p \cong 43,2kV \end{array} \right.$$

Το αρνητικό πρόσημο της πολικής γωνίας δηλώνει (σύμφωνα και με τη θεωρία) ότι στη γεννήτρια η τάση των ακροδεκτών υπολείπεται της τάσης εξ επαγωγής.



α2. Να υπολογισθεί η μέγιστη και η ονομαστική ηλεκτρομαγνητική ροπή

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή δίνεται από τη σχέση (10):

$$M_e = -3 \frac{p}{\omega} \frac{E_p \cdot V_s}{\omega L_d} \sin \theta = -3 \frac{p}{\omega} \frac{E_p \cdot V_s}{X_d} \sin \theta$$

$$p = 6$$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi 50\text{Hz} = 314 \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$$

$$E_p = 43,2\text{kV}$$

$$V_s = V_N = 25\text{kV}$$

$$X_d = 3,17\Omega$$

Με αντικατάσταση προκύπτει ότι:

$$M_e = -19,53 \sin \theta \quad [\text{MWsec}]$$

Άρα, η μέγιστη και η ονομαστική τιμή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής αντίστοιχα είναι:

$$\begin{cases} M_{eK} = M_e \Big|_{\theta = -\frac{\pi}{2}} \Rightarrow M_{eK} = 19,53 \text{MW sec} \\ M_{eN} = M_e \Big|_{\theta = \theta_N} \Rightarrow M_{eN} = -19,53 \cdot \sin(-27^\circ) \text{MW sec} \Rightarrow M_{eN} = 8,87 \text{MW sec} \end{cases}$$