

Λειτουργικά χαρακτηριστικά γεννητριών

- Η φασική τάση στο εσωτερικό μιας μηχανής (στα τυλίγματα του στάτη) δίνεται από τη σχέση:

$$E_A = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot N_c \cdot \Phi \cdot f$$

Πλήθος σπειρών στο τυλίγμα
Συχνότητα περιστροφής μηχανής
Μαγνητική ροή

- Οι επεμβάσεις που μπορούμε να κάνουμε είναι:
 - Στο πλήθος των σπειρών του στάτη μπορούμε να επέμβουμε μόνο κατασκευαστικά.
 - Στη συχνότητα περιστροφής μπορούμε να επέμβουμε κατά τη διάρκεια λειτουργίας. Η μεταβολή αυτής όμως θα επηρεάσει και τη συχνότητα της παραγόμενης τάσης, κάτι που δε θέλουμε σε καμία περίπτωση.
 - Η μόνη ρεαλιστική επέμβαση κατά τη διάρκεια της λειτουργίας λοιπόν είναι στη μαγνητική ροή. Αυτή σε κινονικές συνθήκες λειτουργίας είναι ανάλογη με το ρεύμα διέγερσης που δίνουμε στο δρομέα.

1

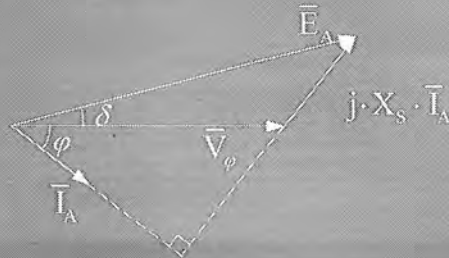
Λειτουργικά χαρακτηριστικά γεννητριών

- Η τάση E_A εμφανίζεται μόνο στο εσωτερικό της μηχανής. Στους ακροδέκτες θα πάρουμε μια μειωμένη τάση V_θ λόγω απωλειών. Συγκεκριμένα έχουμε:
 - Παραμόρφωση μαγνητικού πεδίου στο διάκενο της μηχανής, που προκαλεί επαγωγικές απώλειες και προσομοιώνεται με μια επαγωγική αντίδραση (αντίδραση σπλισμού)
 - Αντιστάσεις και αυτεπαγωγές των αγωγών του στάτη
 - Απώλειες λόγω του σχήματος των πόλων στις σύγχρονες γεννήτριες έκτυπων πόλων
- Γενικά οι ωμικές απώλειες είναι αμελητέες σε σχέση με τις αντίστοιχες επαγωγικές, οπότε μπορούμε να θεωρήσουμε με καλή ακρίβεια ότι όλες οι απώλειες του στάτη αντιστοιχούν σε μια επαγωγική αντίδραση (αντίδραση στάτη X_s)

2

Λειτουργικά χαρακτηριστικά γεννητριών

- Διανυσματικά ισχύει ότι:



- Εμείς όμως μπορούμε να γνωρίζουμε μόνο τα μεγέθη που εμφανίζονται στους ακροδέκτες της γεννήτριας, δηλαδή την τάση V_ϕ και το ρεύμα I_A .

3

Λειτουργικά χαρακτηριστικά γεννητριών

- Χρησιμοποιώντας τα μεγέθη αυτά μπορούμε να υπολογίσουμε την ισχύ εξόδου της γεννήτριας. Συγκεκριμένα θα είναι:

$$\bar{S}_{out} = 3 \cdot \bar{V}_\phi \cdot \bar{I}_A$$

- Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι η ενεργή και άεργη ισχύς της γεννήτριας θα είναι αντίστοιχα:

$$P_{out} = 3 \cdot V_\phi \cdot I_A \cdot \cos \varphi$$

$$Q_{out} = 3 \cdot V_\phi \cdot I_A \cdot \sin \varphi$$

- Επιπλέον, θεωρώντας τις ωμικές απώλειες της γεννήτριας αμελητέες, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την παρακάτω σχέση για να συνδέσουμε την ενεργή ισχύ εξόδου με τη γωνία δ (γωνία ροπής):

$$P_{out} = \frac{3 \cdot V_\phi \cdot E_A}{X_s} \sin \delta$$

4

Παραλληλισμός γεννητριών

- Στην πράξη, σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας οι γεννήτριες δε λειτουργούν μεμονωμένα, αλλά με τις εξόδους τους παραλληλισμένες. Τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν είναι τα εξής:
 - Μπορούν να τροφοδοτηθούν πολύ περισσότερα φορτία από ότι με μία γεννήτρια
 - Υπάρχει μεγαλύτερη αξιοπιστία (ακόμα και με βλάβη μιας γεννήτριας συνεχίζουμε να έχουμε τροφοδότηση των φορτίων)
 - Δυνατότητα απομάκρυνσης γεννήτριας για συντήρηση
- Είναι γενικά καλύτερο να έχουμε λίγες γεννήτριες που να λειτουργούν στα ονομαστικά τους στοιχεία, παρά πολλές που να λειτουργούν σε μικρότερες φορτίσεις, τροφοδοτώντας η κάθε μία από λίγα φορτία.

5

Παραλληλισμός γεννητριών

- Προϋποθέσεις για τον παραλληλισμό σύγχρονων γεννητριών:
 - Οι τάσεις των γεννητριών πρέπει να είναι ίσες σε μέτρο και φάση. Άρα λοιπόν πρέπει:
 - Οι ενεργές τιμές των πολικών τάσεων στα άκρα των γεννητριών να είναι ίδιες
 - Οι φάσεις να είναι ίδιες
 - Η σειρά διαδοχής των φάσεων να είναι ίδια
 - Η συχνότητα της γεννήτριας που εισάγεται στο δίκτυο (ετοιμάζεται να παραλληλιστεί) πρέπει να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτή του συστήματος. Στην περίπτωση αυτή θα υπάρχει μια αργή μεταβολή των φάσεων της γεννήτριας που εισάγεται σε σχέση με το υπόλοιπο σύστημα, οπότε μπορούμε να παρακολουθούμε και να κλείσουμε το διακόπτη της διασύνδεσης ακριβώς τη στιγμή που οι αντίστοιχες τάσεις θα βρίσκονται σε φάση.

6

Σύγχρονοι Κινητήρες

- Αρχή λειτουργίας:
 - Το μαγνητικό πεδίο του δρομέα κυνηγά συνεχώς το πεδίο του στάτη, χωρίς ποτέ να καταφέρνει να το φτάσει.
 - Όσο μεγαλύτερη η γωνία μεταξύ των δύο πεδίων, τόσο μεγαλύτερη η ροπή που ασκείται στο δρομέα
 - Τα φορτία των Σύγχρονων Κινητήρων είναι διατάξεις που πρέπει να περιστρέφονται με σταθερή ταχύτητα

7

Σύγχρονοι Κινητήρες

- Γενικά η ροπή ενός σύγχρονου κινητήρα υπολογίζεται από τη σχέση:
$$\tau = \frac{3 \cdot V_{\phi} \cdot E_A \cdot \sin \delta}{\omega_m \cdot X_S}$$
- Για τα μεγέθη αυτά ισχύει:
 - Η τάση V_{ϕ} είναι σταθερή (τάση δικτύου)
 - Η τάση E_A εξαρτάται μόνο από το ρεύμα διέγερσης I_f
 - Η περιστροφική ταχύτητα ω_m είναι σταθερή, καθώς στους σύγχρονους κινητήρες εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα της τάσης του δικτύου
 - Η αντίδραση X_S είναι σταθερή, καθώς εκφράζει τις ονομαστικές απώλειες του κινητήρα

8

Σύγχρονοι Κινητήρες

- Επομένως, όταν το φορτίο του κινητήρα αυξάνεται, θα πρέπει να αυξηθεί η γωνία φόρτισης δ για να μπορέσει ο κινητήρας να προσφέρει αυξημένη ροπή.
- Η γωνία φόρτισης μπορεί όμως να φτάσει μέχρι τις 90° (όπου αντίστοιχα θα είναι $\sin\delta = 1$).
- Στο σημείο εκείνο έχουμε τη μέγιστη θεωρητική ροπή του κινητήρα (ροπή ανατροπής).
- Αν η ροπή του φορτίου ξεπεράσει τη ροπή ανατροπής, τότε το συνολικό μαγνητικό πεδίο του κινητήρα δεν μπορεί να συγκρατήσει το δρομέα, ο οποίος θα αρχίσει να επιβραδύνει.
- Αν δεν αποσυνδέσουμε στο σημείο αυτό τον κινητήρα από την τροφοδοσία του, τότε αυτός θα καταστραφεί, καθώς θα δέχεται στην είσοδό του ενέργεια, την οποία δε θα μπορεί να μετατρέψει (αφού ο δρομέας θα είναι ακινητοποιημένος). Η ενέργεια αυτή θα μετατραπεί λοιπόν σε θερμότητα, η οποία θα συσσωρευτεί στον κινητήρα μέχρι την τελική καταστροφή του.

9

Σύγχρονοι Κινητήρες και Άεργη Ισχύς

- Ένα επιπλέον πλεονέκτημα των σύγχρονων κινητήρων είναι το γεγονός ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αντιστάθμιση άεργης ισχύος στο δίκτυο.
- Συγκεκριμένα, η ροπή ενός σύγχρονου κινητήρα εξαρτάται ΜΟΝΟ από τη ροπή του φορτίου.
- Επομένως, αν μεταβάλλουμε το ρεύμα διέγερσης στο δρομέα, τότε δε θα αλλάξει η ροπή εξόδου του κινητήρα, αλλά μόνο το ρεύμα του στάτη.
- Μαζί με τη μεταβολή του ρεύματος αυτού, έχουμε ταυτόχρονα μεταβολή της άεργης ισχύος του κινητήρα.
- Έτσι, ο κινητήρας αρχικά συμπεριφέρεται ως επαγωγικό φορτίο (δηλαδή καταναλώνει άεργη ισχύ). Μεταβάλλοντας το ρεύμα διέγερσης μπορούμε να μειώσουμε αυτή την άεργη ισχύ, μέχρι το σημείο να τη μηδενίσουμε.
- Αν αυξήσουμε ακόμα περισσότερο το ρεύμα διέγερσης του δρομέα, τότε ο κινητήρας θα αρχίσει να συμπεριφέρεται ως χωρητικό φορτίο (δηλαδή να παράγει άεργη ισχύ). Την παραγόμενη αυτή άεργη ισχύ μπορούμε να τη χρησιμοποιήσουμε για να αντισταθμίσουμε άλλα επαγωγικά φορτία.
- Μερικές φορές, σύγχρονοι κινητήρες χρησιμοποιούνται χωρίς φορτίο, μόνο για την παροχή των ιδιοτήτων τους (Στρέφόμενοι Πυκνωτές).

10

Εκκίνηση Σύγχρονων Κινητήρων

- Δεν μπορούμε να εκκινήσουμε ένα σύγχρονο κινητήρα απλώς και μόνο συνδέοντάς τον στο δίκτυο.
- Στην περίπτωση αυτή, από τη χρονική στιγμή που θα συνδέσουμε τον κινητήρα το μαγνητικό πεδίο του στάτη θα κινείται με την ονομαστική του ταχύτητα, δηλαδή πολύ γρήγορα για να μπορέσει να το παρακολουθήσει ο ακινητοποιημένος δρομέας.
- Το αποτέλεσμα θα είναι η ανάπτυξη ροπής στο δρομέα, η οποία θα είναι μεταβαλλόμενη και κατά μέτρο, αλλά και κατά κατεύθυνση, και η οποία μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή του κινητήρα.
- Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί ειδικοί τρόποι εκκίνησης

11

Εκκίνηση Σύγχρονων Κινητήρων

- Οι τρόποι εκκίνησης ενός σύγχρονου κινητήρα είναι:
 - Εκκίνηση με μείωση της συχνότητας τροφοδοσίας. Η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας, οπότε με τη λύση αυτή ουσιαστικά περιστρέφουμε το μαγνητικό πεδίο του στάτη πιο αργά κατά την εκκίνηση, ώστε να μπορεί να το ακολουθήσει ο ακίνητος δρομέας.
 - Εκκίνηση με βοήθεια εξωτερικής κινητήριας μηχανής
 - Τυλίγματα απόσβεσης στο δρομέα. Πρόκειται για την ενσωμάτωση στο δρομέα ενός βραχυκυκλωμένου κλωβού. Η ροπή που αναπτύσσεται στον κλωβό από την απευθείας σύνδεση του κινητήρα στο δίκτυο είναι μεταβαλλόμενη κατά μέτρο, αλλά όχι κατά κατεύθυνση, οπότε ο δρομέας μπορεί να εκκινήσει κανονικά. Η λύση αυτή προσφέρει το επιπλέον πλεονέκτημα της καλύτερης αντίδρασης του κινητήρα σε μεταβατικά φαινόμενα, όπου ο βραχυκυκλωμένος κλωβός βοηθά στην απόσβεση τυχόν ταλαντώσεων.

12

Επαγωγικοί Κινητήρες

- Η ενσωμάτωση ενός βραχυκυκλωμένου κλωβού στο δρομέα για διευκόλυνση της διαδικασίας εκκίνησης ενός σύγχρονου κινητήρα αποδείχτηκε τελικά καλύτερη λύση από ότι αναμενόταν!
- Τα ρεύματα που αναπτύσσονται εξ επαγωγής σε ένα βραχυκυκλωμένο κλωβό (ή γενικά σε ένα βραχυκυκλωμένο τύλιγμα) είναι αρκετά για να δημιουργήσουν το μαγνητικό πεδίο που χρειάζεται ο δρομέας μιας ηλεκτρικής μηχανής.
- Η χρήση λοιπόν της ιδέας των βραχυκυκλωμένων τυλιγμάτων στο δρομέα οδήγησε στην ανάπτυξη ενός διαφορετικού είδους ηλεκτρικών μηχανών, των **ασύγχρονων** ή **επαγωγικών μηχανών**.
- Στις επαγωγικές μηχανές, ο στάτης έχει την ίδια ακριβώς κατασκευή με αυτόν μιας σύγχρονης μηχανής.

13

Επαγωγικοί Κινητήρες

- Ο δρομέας όμως είναι στην περίπτωση των επαγωγικών μηχανών απλούστερος, καθώς δε χρειάζεται να υπάρχει ειδική διάταξη για εξωτερική τροφοδότηση.
- Στις επαγωγικές μηχανές υπάρχουν δύο είδη δρομέα:
 - Ο βραχυκυκλωμένος κλωβός
 - Ο δακτυλιοφόρος δρομέας (ο οποίος αποτελείται από ένα τριφασικό βραχυκυκλωμένο τύλιγμα, κάτοπτρο του τυλίγματος του στάτη)
- Το μεγάλο κέρδος στις επαγωγικές μηχανές είναι η απλούστερη κατασκευή, καθώς και οι μικρότερες ανάγκες για συντήρηση, κυρίως στην περίπτωση του βραχυκυκλωμένου κλωβού.
- Για τους παραπάνω λόγους οι επαγωγικές μηχανές χρησιμοποιούνται ευρέως ως κινητήρες, αλλά σπάνια ως γεννήτριες.

14

Επαγωγικοί Κινητήρες

- Η αρχή λειτουργίας των επαγωγικών κινητήρων είναι σχεδόν ίδια με αυτή των σύγχρονων κινητήρων.
- Η βασική ιδέα είναι πάλι η δημιουργία ενός περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου στο στάτη της μηχανής, καθώς και η δημιουργία ενός συνεχούς μαγνητικού πεδίου στο δρομέα.
- Στην περίπτωση των επαγωγικών κινητήρων όμως, τα απαιτούμενα ρεύματα στο δρομέα δε τροφοδοτούνται με εξωτερική τροφοδότηση, αλλά δημιουργούνται εξ επαγωγής.
- Όπως είδαμε και στα προηγούμενα, αν ένας αγωγός βρεθεί μέσα σε χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, τότε στα άκρα του θα αναπτυχθεί τάση.

15

Επαγωγικοί Κινητήρες

- Στα άκρα των αγωγών του δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα θα επαχθούν λοιπόν τάσεις, αλλά ΜΟΝΟ εφόσον υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ του δρομέα και του μαγνητικού πεδίου του στάτη.
- Επομένως η ταχύτητα του δρομέα δεν μπορεί ΠΟΤΕ να γίνει σύγχρονη, γιατί στην περίπτωση αυτή θα σταματήσουν να επάγονται τάσεις στα άκρα του.
- Εισάγεται λοιπόν στους επαγωγικούς κινητήρες μία νέα έννοια, αυτή της **ολίσθησης**.

16

Ολίσθηση

- Ορίζεται ως **ταχύτητα ολίσθησης** η διαφορά της ταχύτητας του δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα από τη σύγχρονη ταχύτητα:

$$n_{\text{slip}} = n_{\text{sync}} - n_m$$

- Επιπλέον, η ταχύτητα ολίσθησης, εκφρασμένη ως προς τη σύγχρονη ταχύτητα, ονομάζεται **ολίσθηση**:

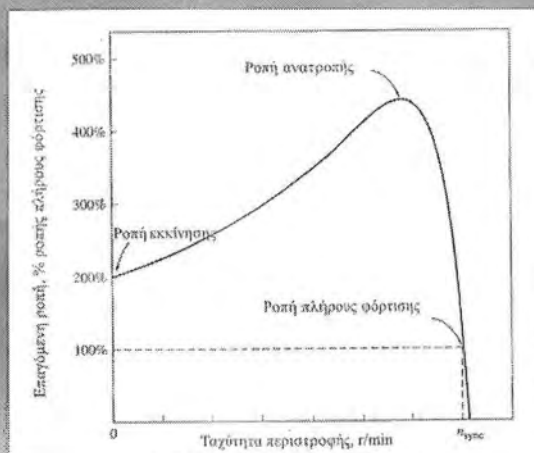
$$s = \frac{n_{\text{slip}}}{n_{\text{sync}}} (\times 100\%)$$

- Η ολίσθηση μπορεί να πάρει τιμές από 1 (δρομέας ακίνητος) μέχρι 0 (δρομέας περιστρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα)

17

Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας

- Ο κινητήρας μπορεί να ξεκινήσει με το φορτίο του, αφού η ροπή εκκίνησης είναι μεγαλύτερη από τη ροπή πλήρους φόρτισης



18

Χρήση επαγωγικών κινητήρων

- Οι επαγωγικοί κινητήρες (και κυρίως οι κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού) βρίσκουν χρήση σε φορτία με σχεδόν σταθερές στροφές (αντλίες, ανυψωτικά μηχανήματα, ανελκυστήρες, συμπιεστές, μεταφορικές ταινίες)
- Μειονεκτήματα:
 - Μεγάλα ρεύματα εκκίνησης
 - Απαιτούμενη άεργη ισχύς
 - Άκαμπτη ταχύτητα

19

Σύμπλεξη με φορτίο

- Η σύμπλεξη ενός επαγωγικού κινητήρα με το φορτίο του μπορεί να γίνει ως εξής:
 - Απ' ευθείας σύμπλεξη με συμπλέκτη (Korpler)
 - Με ιμάντα: στην περίπτωση αυτή δε μεταδίδονται κραδασμοί και μπορεί να γίνει προσαρμογή της ταχύτητας φορτίου/κινητήρα συνήθως μέχρι το λόγο 1:3
 - Με γρανάζια: η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για χαμηλές ταχύτητες και αυξημένη ροπή

20

Εκκίνηση επαγωγικών κινητήρων

- Κατά την εκκίνηση ενός επαγωγικού κινητήρα έχουμε αύξηση των στροφών από 0 έως τις ονομαστικές στροφές του, ενώ έχουμε αντίστοιχα μείωση της ολίσθησης από 100% σε 1-8% περίπου
- Το ρεύμα για δοσμένο κινητήρα όμως εξαρτάται μόνο από την ολίσθηση και την τάση εισόδου
- Στην εκκίνηση, το ρεύμα αυτό είναι 4-7 φορές το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα
- Κατά την εκκίνηση, οι απώλειες μπορεί να είναι 40 φορές οι απώλειες της κανονικής λειτουργίας
- ΔΕΝ επιτρέπεται λοιπόν απεριόριστη διάρκεια εκκίνησης ή απεριόριστες διαδοχικές εκκινήσεις

21

Εκκίνηση επαγωγικών κινητήρων

- Για τους κινητήρες XT υπάρχουν κυρίως οι εξής μέθοδοι εκκίνησης:
 - Απ' ευθείας εκκίνηση με σταθερή τάση: Χρησιμοποιείται για ισχύ κινητήρα μέχρι 1,5-2kW. Προσφέρει μεγαλύτερη ροπή εκκίνησης, αλλά και αυξημένα ρεύματα.
 - Αν θέλουμε να αποφύγουμε τα αυξημένα ρεύματα εκκίνησης (που σε μεγαλύτερους κινητήρες μπορούν να προκαλέσουν πολλά προβλήματα), θα πρέπει να καταφύγουμε σε πιο ήπιες μεθόδους εκκίνησης. Αυτές μπορεί να είναι είτε με μειωμένη τάση τροφοδοσίας, είτε με μειωμένη συχνότητα τροφοδοσίας. Έτσι έχουμε:
 - Εκκίνηση με μειωμένη τάση στα τυλίγματα (εκκίνηση αστέρα / τριγώνου): Εκκίνηση με συνδεσμολογία τυλιγμάτων σε αστέρα (ρεύμα και ροπή εκκίνησης στο 1/3 της κανονικής εκκίνησης), και μεταγωγή σε τρίγωνο σχεδόν σε ονομαστικές στροφές.
 - Εκκίνηση με ηλεκτρονικό ρυθμιστή τάσης (Soft Starter): Στην περίπτωση αυτή η τάση τροφοδοσίας ρυθμίζεται κατά την εκκίνηση με ηλεκτρονικά ισχύος (θυρίστορες)
 - Εκκίνηση με μετατροπή συχνότητας, όπως είδαμε και στην περίπτωση των σύγχρονων κινητήρων

22

Πέδηση επαγωγικών κινητήρων

- Εναλλακτικές μέθοδοι πέδησης (συνέχεια):
 - Πέδηση με συνεχές ρεύμα: Ο κινητήρας αποσυνδέεται από το τριφασικό δίκτυο και συνδέεται με πηγή συνεχούς ρεύματος. Πάλι υπάρχει θερμική καταπόνηση
 - Πέδηση με αλλαγή αριθμού πόλων (κινητήρες δύο ταχυτήτων): Η θερμική καταπόνηση είναι ίση με αυτήν κατά την εκκίνηση υπό χαμηλή ταχύτητα