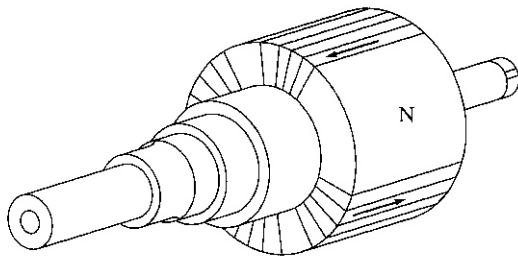
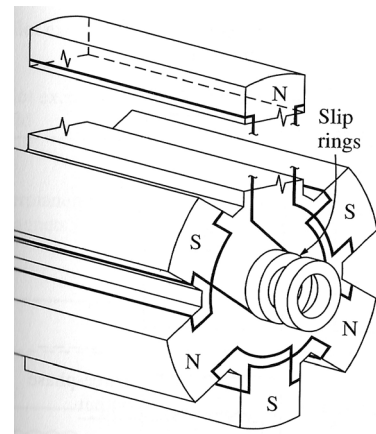


ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

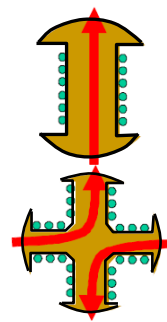
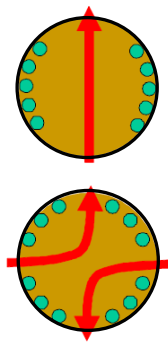
Για τη λειτουργία των σύγχρονων γεννητριών (που ονομάζονται και *εναλλακτήρες*) απαραίτητη προϋπόθεση είναι η τροφοδοσία του τυλίγματος του δρομέα με συνεχές ρεύμα. Καθώς περιστρέφεται ο δρομέας (που είναι πρακτικά ένας μεγάλος στρεφόμενος ηλεκτρομαγνήτης) λόγω κάποιας κινητήριας μηχανής, περιστρέφεται μαζί του και το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο, επάγοντας τριφασική τάση στο τύλιγμα του στάτη. Ο δρομέας μπορεί να είναι είτε κυλινδρικός, είτε εκτύπων πόλων (τότε οι πόλοι διακρίνονται στην επιφάνεια του δρομέα) και είναι κατασκευασμένος από δυναμοελάσματα. Οι κυλινδρικοί δρομείς φέρουν αυλακώσεις όπου τοποθετούνται τα τυλίγματα και χρησιμοποιούνται κυρίως σε γεννήτριες μέχρι τεσσάρων πόλων. Αντίθετα, σε γεννήτριες με περισσότερους πόλους επιλέγονται δρομείς εκτύπων πόλων.



Κυλινδρικός δρομέας



Δρομέας εκτύπων πόλων



Δρομείς με 2 και 4 πόλους

Η τροφοδοσία του δρομέα με συνεχές ρεύμα μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους: α) από εξωτερική πηγή συνεχούς ρεύματος, οπότε στο στρεφόμενο δρομέα προσαρμόζονται ψήκτρες και δακτυλίδια, β) από πηγή συνεχούς ρεύματος τοποθετημένη στον άξονα της μηχανής. Στην πρώτη περίπτωση, καθένα από τα δύο άκρα του τυλίγματος του δρομέα αντιστοιχεί σε ένα δακτυλίδι, οπότε μέσω των ψηκτρών επιτυγχάνεται η συνεχής τροφοδοσία του κυκλώματος. Τα μειονεκτήματα αυτής της λύσης σχετίζονται με τη φθορά των ψηκτρών (λόγω τριβής), καθώς και με την πτώση τάσης πάνω σ' αυτές, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές απώλειες ισχύος. Στη δεύτερη

περίπτωση, το ρεύμα του δρομέα προέρχεται από μια *διεγέρτρια μηχανή*, η οποία είναι μια μικρή γεννήτρια ΕΡ. Το κύκλωμα διέγερσης της τελευταίας τροφοδοτείται από το στάτη της κύριας γεννήτριας και το κύκλωμα οπλισμού της βρίσκεται πάνω στον άξονα του δρομέα. Η τριφασική έξοδος της διεγέρτριας ανορθώνεται από τριφασικό ανορθωτή και το συνεχές ρεύμα που προκύπτει διαρρέει το κύκλωμα διέγερσης της κύριας γεννήτριας. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται τα μειονεκτήματα του πρώτου τρόπου τροφοδοσίας, αφού πλέον δεν εμπλέκονται μηχανικά τμήματα.

Ταχύτητα περιστροφής

Η ονομασία αυτής της κατηγορίας των γεννητριών οφείλεται στο γεγονός ότι οι συχνότητες των τάσεων που παράγουν βρίσκεται σε συγχρονισμό με την ταχύτητα περιστροφής τους. Η ηλεκτρική συχνότητα του στάτη σχετίζεται με την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου μέσω της σχέσης

$$f_c = \frac{n_m P}{60}$$

όπου n_m η ταχύτητα περιστροφής του πεδίου σε rpm και $2P$ το πλήθος των μαγνητικών πόλων. Για παράδειγμα, μια διπολική γεννήτρια θα παράγει τάση συχνότητας $f_c = 50$ Hz όταν η ταχύτητα περιστροφής είναι $n_m = 60 \cdot 50 / 1 = 3000$ rpm. Αντίστοιχα, μια σύγχρονη γεννήτρια τεσσάρων πόλων θα παράγει συχνότητα 50 Hz αν περιστρέφεται με ταχύτητα $n_m = 60 \cdot 50 / 2 = 1500$ rpm.

Παραγόμενη τάση

Σχετικά με την τιμή της παραγόμενης τάσης, στο προηγούμενο κεφάλαιο υπολογίστηκε μια έκφραση που δίνει την τάση που επάγεται σε κάθε φάση ($E_A = 4.44 N_c \Phi f$). Η συγκεκριμένη σχέση μπορεί να γραφτεί πιο απλά και ως

$$E_A = K \Phi \omega$$

αν ληφθούν υπόψη μόνο εκείνα τα μεγέθη που μπορούν να μεταβληθούν κατά τη λειτουργία μιας μηχανής (K είναι μια σταθερά που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής). Αφού η τάση E_A είναι ανάλογη της μαγνητικής ροής, η οποία εξαρτάται από το ρεύμα διέγερσης I_F του δρομέα, η καμπύλη $E_A - I_F$ ονομάζεται *καμπύλη μαγνήτισης* ή *χαρακτηριστική ανοιχτού κυκλώματος*.

ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Είναι προφανές ότι η τάση E_A που επάγεται σε κάθε φάση ισούται με την τάση V_ϕ στους ακροδέκτες μόνο στην περίπτωση που το αντίστοιχο κύκλωμα δε διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Σε κάθε άλλη περίπτωση πρέπει να ληφθούν υπόψη παράγοντες όπως είναι π.χ. η αντίδραση του οπλισμού, η αυτεπαγωγή και η ωμική αντίσταση των αγωγών που συνθέτουν το κύκλωμα του στάτη.

Η αντίδραση του οπλισμού οφείλεται στο ρεύμα που διαρρέει τους αγωγούς του στάτη, όταν είναι συνδεδεμένο κάποιο φορτίο στη γεννήτρια. Το ρεύμα αυτό δημιουργεί μαγνητικό πεδίο \mathbf{B}_S , το οποίο επηρεάζει το αρχικό πεδίο \mathbf{B}_R στο εσωτερικό της μηχανής, μεταβάλλοντας τελικά την τάση στα άκρα της γεννήτριας. Προφανώς, στην περίπτωση απουσίας συνδεδεμένου φορτίου η επαγόμε-

νη τάση οφείλεται αποκλειστικά στο πεδίο \mathbf{B}_R του δρομέα και είναι ίση με \mathbf{E}_A . Όταν, όμως, ρεύμα διαρρέει το κύκλωμα του στάτη, το μαγνητικό του πεδίο \mathbf{B}_S έχει σαν αποτέλεσμα την επαγωγή επιπρόσθετης τάσης \mathbf{E}_{stat} σε κάθε φάση. Σημειώνεται πως οι φορές των διανυσμάτων \mathbf{E}_A , \mathbf{B}_R συμπίπτουν, όπως και οι φορές των \mathbf{E}_{stat} , \mathbf{B}_S . Τελικά η τάση στα άκρα κάθε φάσης είναι συνολικά ίση με

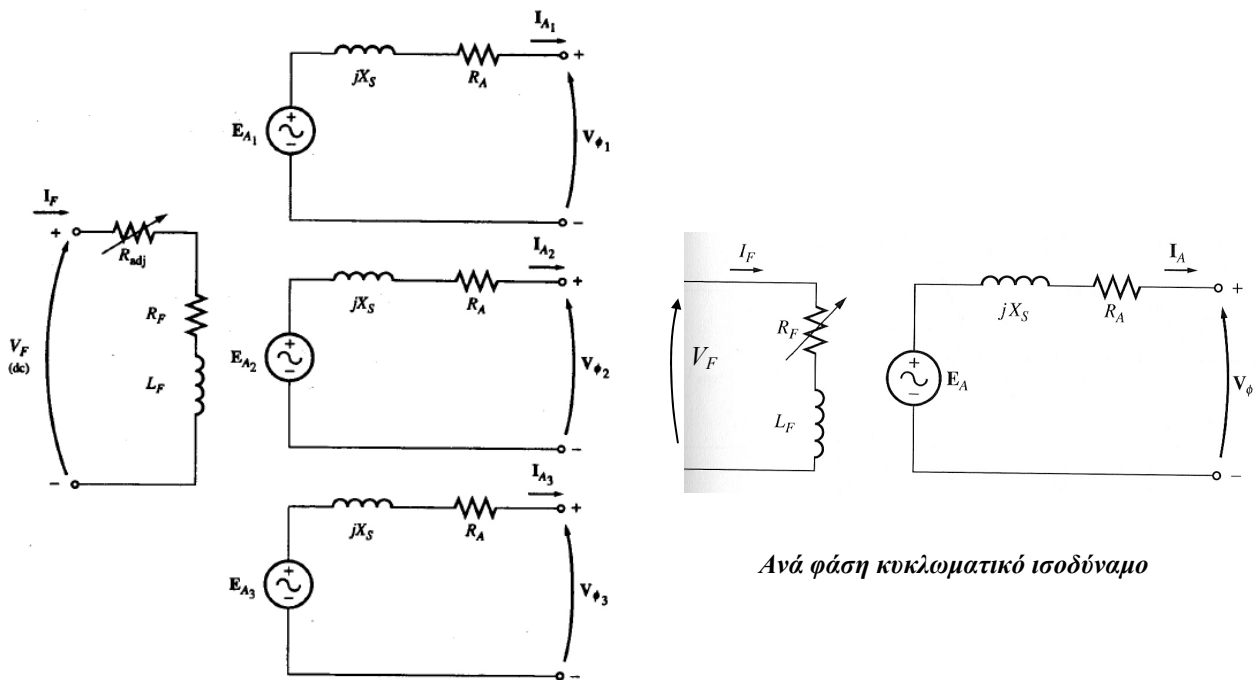
$$\mathbf{V}_\phi = \mathbf{E}_A + \mathbf{E}_{stat}.$$

Στο κυκλωματικό ισοδύναμο μιας σύγχρονης γεννήτριας συμβολίζουμε με X_S τη **σύγχρονη αντίδραση** της μηχανής, η οποία αποτελεί το άθροισμα δύο όρων που αντιστοιχούν στην αντίδραση του οπλισμού και στην αυτεπαγωγή των τυλιγμάτων του στάτη:

$$X_S = X + X_A.$$

Το τύλιγμα της διέγερσης παριστάνεται, κατά τα γνωστά, από μια ωμική αντίσταση και μια αυτεπαγωγή, σε σειρά με τις οποίες συνδέεται μια ρυθμιστική αντίσταση για τον έλεγχο του ρεύματος διέγερσης. Το υπόλοιπο κύκλωμα αποτελείται από τα τμήματα που αντιστοιχούν σε καθεμιά από τις τρεις φάσεις, εκεί όπου εμφανίζονται η παραγόμενη τάση στο εσωτερικό της μηχανής, η σύγχρονη αντίδραση και η ωμική του αντίσταση. Η μόνη διαφορά στα τρία επιμέρους κυκλώματα παρατηρείται στη φάση της επαγόμενης τάσης (διαφορά φάσης κατά 120° ανά δύο). Για το λόγο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά το ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση, αρκεί βέβαια το φορτίο της γεννήτριας να είναι και αυτό συμμετρικό. Από το ισοδύναμο κύκλωμα προκύπτει άμεσα ότι

$$\mathbf{V}_\phi = \mathbf{E}_A - jX_S \mathbf{I}_A - R_A \mathbf{I}_A.$$



Ανά φάση κυκλωματικό ισοδύναμο

Πλήρες κυκλωματικό ισοδύναμο σύγχρονης γεννήτριας

Στην περίπτωση που οι τρεις φάσεις είναι συνδεδεμένες σε αστέρα, οι πολικές τάσεις είναι

$$V_T = \sqrt{3}V_\phi$$

ενώ για σύνδεση σε τρίγωνο ισχύει

$$V_T = V_\phi.$$

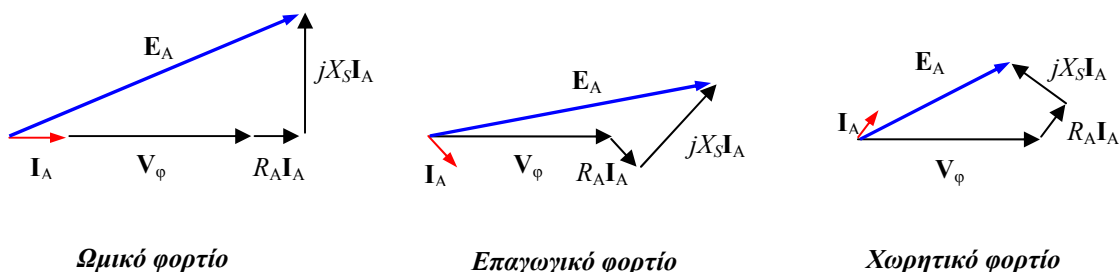
ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΑ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ

Εδώ θα παρουσιαστεί ο τρόπος υπολογισμού των εναλλασσόμενων τάσεων με τη χρήση διανυσματικών διαγραμμάτων, όπου τα διάφορα μιγαδικά μεγέθη αναπαριστώνται με στρεφόμενα διανύσματα (καθένα με συγκεκριμένο πλάτος και φάση).

Ας θεωρήσουμε το μονοφασικό κυκλωματικό ισοδύναμο μιας σύγχρονης γεννήτριας και, αρχικά, ότι αυτή τροφοδοτεί ένα καθαρά *ωμικό* φορτίο R . Παίρνοντας ως αναφορά όλων των μεγεθών την τάση V_ϕ (δηλ. θεωρείται μηδενική η φάση της), το ρεύμα I_A θα είναι συμφασικό με τη V_ϕ , διότι το φορτίο αντιστοιχεί σε πραγματικό αριθμό ($V_\phi = RI_A$). Αντίστοιχα, επειδή ο πολλαπλασιασμός με τη μιγαδική μονάδα αντιστοιχεί σε στροφή του πολλαπλασιαζόμενου διανύσματος κατά $+90^\circ$, η πτώση τάσης $jX_S I_A$ είναι ένα διάνυσμα κάθετο στο I_A . Τελικά το διάνυσμα E_A έχει ως αρχή την αρχή του V_ϕ και ως πέρας το πέρας του $jX_S I_A$.

Στην περίπτωση που το φορτίο είναι *επαγωγικό*, η πτώση τάσης V_ϕ προηγείται του ρεύματος I_A , ενώ στην περίπτωση που το φορτίο είναι *χωρητικό* η τάση έπεται του ρεύματος. Από τα διαγράμματα προκύπτει άμεσα ότι για δεδομένη φασική τάση και ρεύμα οπλισμού, απαιτείται παραγωγή μεγαλύτερης τάσης E_A για την τροφοδοσία επαγωγικού φορτίου, σε σχέση με αυτή που χρειάζεται ένα χωρητικό φορτίο. Αυτό σημαίνει πως χρειάζεται μεγαλύτερο ρεύμα διέγερσης (αν η ταχύτητα ω πρέπει να παραμείνει σταθερή), διότι ισχύει ότι $E_A = K\Phi\omega$. Ισοδύναμα, η φασική τάση στα άκρα της γεννήτριας είναι μικρότερη στην περίπτωση των επαγωγικών φορτίων σε σχέση με τα χωρητικά, για δεδομένο ρεύμα διέγερσης και φορτίου.

Σημειώνεται πως, στην πράξη, τις περισσότερες φορές η τιμή της σύγχρονης αντίδρασης είναι αρκετά μεγαλύτερη από την ωμική αντίσταση του οπλισμού, με αποτέλεσμα η τελευταία να μπορεί να αγνοηθεί χωρίς μεγάλο σφάλμα.



ΙΣΧΥΣ – ΡΟΠΗ – ΓΩΝΙΑ ΦΟΡΤΙΟΥ

Η ισχύς εισόδου σε μια σύγχρονη γεννήτρια είναι, φυσικά, μηχανικής φύσης, παρέχεται από κάποια μηχανή (όπως π.χ. ένας υδροστρόβιλος ή ένας ατμοστρόβιλος) και ισούται με

$$P_{in} = \tau_{app} \omega_m .$$

Λόγω των απωλειών περιστροφής, το τμήμα της μηχανικής που μετατρέπεται σε ηλεκτρική είναι ίσο με

$$P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m = 3E_A I_A \cos \gamma$$

όπου γ η διαφορά φάσης μεταξύ των \mathbf{E}_A και \mathbf{I}_A . Η ενεργός ισχύς στην έξοδο της γεννήτριας είναι

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

αν χρησιμοποιηθούν τα φασικά μεγέθη, ή, ισοδύναμα,

$$P_{out} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta$$

αν χρησιμοποιηθούν η τάση V_L και το ρεύμα I_L της γραμμής. Αντίστοιχα, η άεργος ισχύς στην έξοδο της γεννήτριας είναι

$$Q_{out} = 3V_\phi I_A \sin \theta = \sqrt{3} V_L I_L \sin \theta .$$

Μια προσεγγιστική σχέση για την ισχύ εξόδου μιας σύγχρονης γεννήτριας μπορεί να προκύψει στην περίπτωση που η τιμή της ωμικής αντίστασης R_A είναι τόσο μικρή, ώστε να μπορεί να αγνοηθεί. Τότε, από το διανυσματικό διάγραμμα της γεννήτριας προκύπτει ότι το ευθύγραμμο τμήμα ℓ έχει μήκος ίσο με

$$\ell = E_A \sin \delta$$

όπως και

$$\ell = X_s I_A \cos \theta$$

οπότε

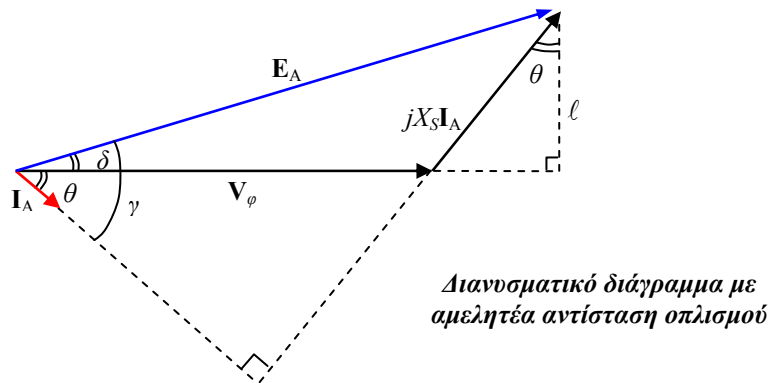
$$I_A \cos \theta = \frac{E_A \sin \delta}{X_s} .$$

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ισχύς εξόδου να παίρνει τη μορφή

$$P = \frac{3V_\phi E_A \sin \delta}{X_s} .$$

Η γωνία δ μεταξύ των διανυσμάτων V_ϕ και E_A ονομάζεται *γωνία φορτίου* ή *γωνία ροπής* και προσδιορίζει τη μέγιστη τιμή της ισχύος που παρέχει η γεννήτρια (μαζί με το όριο ευσταθούς λειτουργίας της μηχανής). Τέλος, επειδή είναι $P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m$, προκύπτει μια ανάλογη έκφραση και για τη ροπή:

$$\tau_{ind} = \frac{3V_\phi E_A \sin \delta}{\omega_m X_s} .$$



ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Σύμφωνα με το ισοδύναμο κύκλωμα μιας σύγχρονης γεννήτριας, οι παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία της είναι η σχέση ρεύματος διέγερσης – τάσης E_A , η σύγχρονη αντίδραση και η αντίσταση του τυλίγματος οπλισμού. Για τον προσδιορισμό τους ακολουθούμε τις εξής τεχνικές:

Πείραμα ανοιχτού κυκλώματος

Χωρίς να είναι συνδεδεμένο στη γεννήτρια κάποιο φορτίο, αυτή περιστρέφεται με ονομαστική ταχύτητα, οπότε η τάση V_ϕ στα άκρα μιας φάσης θα ισούται με την E_A , διότι το ρεύμα I_A είναι μηδενικό. Έτσι, μεταβάλλοντας το ρεύμα διέγερσης προκύπτει η καμπύλη $E_A - I_F$, δηλ. η *χαρακτηριστική ανοιχτού κυκλώματος*. Η τελευταία είναι ευθεία γραμμή για μικρές τιμές του ρεύματος διέγερσης, μέχρι να αρχίσουν να εμφανίζονται τα φαινόμενα κορεσμού. Συνεπώς, από τη χαρακτηριστική αυτή δηλαδή προκύπτει η τιμή της E_A για συγκεκριμένο ρεύμα διέγερσης.

Πείραμα βραχυκύκλωσης

Βραχυκυκλώνοντας τώρα τα άκρα των φάσεων (παρεμβάλλοντας αμπερόμετρα) έχουμε προφανώς $V_\phi = 0$, οπότε θα ισχύει και

$$\mathbf{I}_A = \frac{\mathbf{E}_A}{R_A + jX_S}.$$

Το μέτρο του ρεύματος του οπλισμού ισούται τότε με

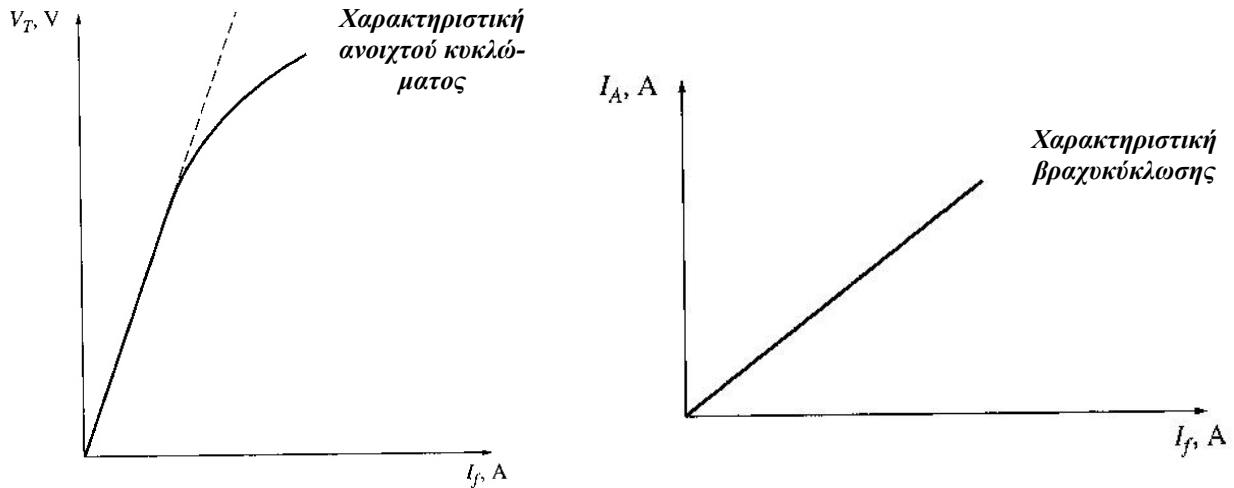
$$I_A = \frac{E_A}{\sqrt{R_A^2 + X_S^2}}.$$

Μεταβάλλοντας το ρεύμα διέγερσης καταγράφεται η καμπύλη $I_A - I_F$ που είναι η *χαρακτηριστική βραχυκύκλωσης* και παριστάνεται με μια ευθεία γραμμή. Ο λόγος για τον οποίο η καμπύλη βραχυκύκλωσης έχει μια τέτοια μορφή είναι ο εξής: το μαγνητικό πεδίο του στάτη πρακτικά εξουδετερώνει το πεδίο του δρομέα, με αποτέλεσμα το άθροισμά τους (το συνολικό πεδίο δηλαδή) να έχει μικρή τιμή. Έτσι, δεν εμφανίζεται κορεσμός και η εξεταζόμενη μεταβολή παραμένει γραμμική. Επομένως, από τη χαρακτηριστική βραχυκύκλωσης προκύπτει η τιμή του I_A για συγκεκριμένο ρεύμα διέγερσης.

Τελικά, μέσω των υπολογισμένων τιμών E_A και I_A μπορεί να γίνει εκτίμηση της σύγχρονης αντίδρασης. Αν θεωρηθεί αμελητέα η τιμή της αντίστασης R_A , τότε πολύ απλά θα έχουμε

$$X_s \approx \frac{E_A}{I_A}$$

για κάποια τιμή του ρεύματος διέγερσης (ο αριθμητής προκύπτει από τη χαρακτηριστική ανοιχτού κυκλώματος και ο παρονομαστής από τη χαρακτηριστική βραχυκύκλωσης).



Σχετικά με τον υπολογισμό της τιμής της αντίστασης του κυκλώματος του στάτη, είναι δυνατό να εφαρμοστεί πηγή συνεχούς τάσης στα τυλίγματα, όταν η γεννήτρια δε βρίσκεται σε λειτουργία. Μετρώντας το ρεύμα που προκύπτει υπολογίζεται η R_A , αφού η χρήση συνεχούς τάσης αποκλείει την επίδραση της σύγχρονης αντίδρασης.

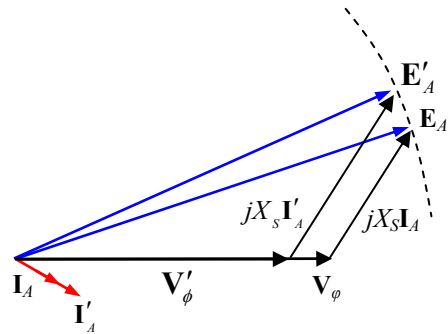
ΑΥΤΟΝΟΜΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Θα εξεταστεί η συμπεριφορά μιας σύγχρονης γεννήτριας που λειτουργεί αυτόνομα και τροφοδοτεί κάποιο φορτίο. Διατηρώντας σταθερή την ταχύτητα της γεννήτριας, όπως και τη μαγνητική ροή του πεδίου του δρομέα, μελετούμε τη μεταβολή της τάσης εξόδου κατά την αύξηση του ρεύματος του φορτίου σε διάφορες περιπτώσεις. Θεωρείται ως δεδομένο ότι το πλάτος της επαγόμενης τάσης E_A διατηρείται πάντα το ίδιο, από τη στιγμή που δεν αλλάζει το ρεύμα διέγερσης και η ταχύτητα περιστροφής.

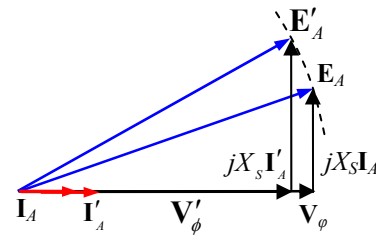
Η πρώτη περίπτωση αναφέρεται σε επαγωγικό φορτίο, με την αύξηση του ρεύματος να γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην αλλάζει ο συντελεστής ισχύος. Το γεγονός αυτό σημαίνει πως μεταβάλλεται μόνο το μέτρο του διανύσματος \mathbf{I}_A και όχι η φάση του. Επειδή, σύμφωνα με τα προηγούμενα, το μέτρο του \mathbf{E}_A διατηρείται αμετάβλητο (ορίζοντας έναν κύκλο συγκεκριμένης ακτίνας), η αυξημένη τιμή του πλάτους του διανύσματος $jX_s \mathbf{I}_A$ συνεπάγεται μειωμένη τιμή για την τάση \mathbf{V}_ϕ .

Ακολουθώντας παρόμοιους συλλογισμούς, διαπιστώνεται πως η τάση εξόδου υφίσταται μια μικρή μείωση στην περίπτωση ωμικών φορτίων, ενώ αν το φορτίο είναι χωρητικό παρατηρείται αύξηση του πλάτους της τάσης.

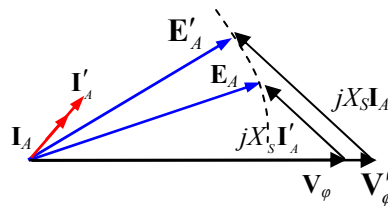
Σημειώνεται πως επειδή η γεννήτρια είναι επιθυμητό να παράγει σταθερή τάση στην έξοδό της, ανεξάρτητα από το συνδεδεμένο φορτίο, αυτό μπορεί να εξασφαλιστεί διορθώνοντας κάθε φορά (δηλ. σε κάθε αλλαγή του φορτίου) την τιμή της τάσης E_A , μέσω του ρεύματος διέγερσης.



Συμπεριφορά σε επαγωγικό φορτίο



Συμπεριφορά σε ωμικό φορτίο



Συμπεριφορά σε χωρητικό φορτίο

ΠΑΡΑΛΛΗΛΙΣΜΟΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Σε αντίθεση με την αυτόνομη λειτουργία, η πιο συνηθισμένη περίπτωση είναι η παράλληλη σύνδεση περισσότερων της μίας σύγχρονων γεννητριών για την τροφοδοσία φορτίων. Μια τέτοια επιλογή συνοδεύεται από διάφορα πλεονεκτήματα, όπως η δυνατότητα τροφοδοσίας μεγάλων φορτίων, μεγαλύτερη αξιοπιστία του συστήματος, δυνατότητα απομάκρυνσης κάποιας γεννήτριας από το δίκτυο χωρίς επιπτώσεις σε αυτό, λειτουργία ορισμένων μόνο γεννητριών όταν το φορτίο είναι μικρό, κ.α. Με άλλα λόγια, ο παραλληλισμός των γεννητριών επιτρέπει την παραγωγή και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας με αξιόπιστο και αποτελεσματικό τρόπο. Ωστόσο, ο παραλληλισμός γεννητριών είναι μια διαδικασία που πρέπει να γίνεται με προσοχή, διαφορετικά είναι πιθανή η πρόκληση βλαβών στις γεννήτριες ή και η διακοπή της τροφοδοσίας του φορτίου. Συγκεκριμένα, πρέπει να ικανοποιούνται οι ακόλουθες προϋποθέσεις:

- τα πλάτη των πολικών τάσεων στα άκρα των γεννητριών να είναι τα ίδια,
- η διαδοχή των φάσεων να είναι η ίδια,
- να μην υπάρχει διαφορά φάσης μεταξύ των αντιστοίχων τάσεων,
- η συχνότητα των γεννητριών να είναι η ίδια.