

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ  
ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ**

# **ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ**

**ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

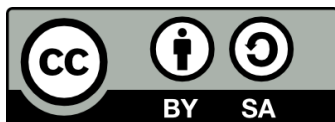
**κ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΘΕΜΕΛΗΣ**

**ΣΕΡΡΕΣ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2015**



## Άδειες Χρήσης

Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons. Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Το έργο αυτό αδειοδοτείται από την Creative Commons Αναφορά Δημιουργού - Παρόμοια Διανομή 4.0 Διεθνές Άδεια. Για να δείτε ένα αντίγραφο της άδειας αυτής, επισκεφτείτε <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.el>.

## Χρηματοδότηση

Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.

Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.

Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



## ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μια ηλεκτρική μηχανή συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιείται ως γεννήτρια, όταν ο άξονάς της στρέφεται από μια *κινητήρια μηχανή (prime mover)*. Η κινητήρια μηχανή μπορεί να είναι ένας ατμοστρόβιλος, ένας νηξελοκινητήρας, ή ένας ηλεκτροκινητήρας. Για να παράγει η γεννήτρια ηλεκτρεγερτική δύναμη, πρέπει ο δρομέας της να στραφεί μέσα στο μαγνητικό πεδίο του στάτη. Το μαγνητικό πεδίο του στάτη (κύριο πεδίο), παράγεται τροφοδοτώντας το τύλιγμα διέγερσης της μηχανής με το συνεχές ρεύμα της διέγερσης  $I_e$ . Σε μηχανές πολύ μικρής ισχύος, το κύριο πεδίο παράγεται από *μόνιμους μαγνήτες (permanent magnet dc machines)*. Η μαγνητική ροή των μόνιμων μαγνητών είναι πολύ μικρότερη από εκείνη που παράγουμε με τους ηλεκτρομαγνήτες.

Ανάλογα με την προέλευση του ρεύματος της διέγερσης, οι γεννήτριες και γενικότερα οι μηχανές συνεχούς ρεύματος, διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- *Μηχανές με ανεξάρτητη διέγερση (separately excited dc machines).*
- *Μηχανές με αυτοδιέγερση (self-excited dc machines).*

Στις μηχανές με ανεξάρτητη διέγερση, το ρεύμα της διέγερσης παρέχεται από μια ξεχωριστή πηγή συνεχούς τάσης. Στις μηχανές με αυτοδιέγερση, το ρεύμα της διέγερσης παρέχεται από την ίδια την γεννήτρια. Έτσι, δεν απαιτείται πρόσθετη πηγή για την παροχή του ρεύματος διέγερσης. Οι μηχανές με αυτοδιέγερση διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης του τυλίγματος διέγερσης με το τύλιγμα του δρομέα:

- *Μηχανές παράλληλης διέγερσης (shunt dc machines).* Σ' αυτές, το τύλιγμα διέγερσης συνδέεται παράλληλα με το δρομέα.

➤ Μηχανές με διέγερση σειράς (*series dc machines*). Σ' αυτές, το τύλιγμα διέγερσης συνδέεται σε σειρά με το δρομέα.

➤ Μηχανές με αθροιστική σύνθετη διέγερση (*cumulatively compounded dc machines*). Σ' αυτές, τα μαγνητικά πεδία που παράγονται από τα τυλίγματα παράλληλης διέγερσης και διέγερσης σειράς προστίθενται.

➤ Μηχανές με διαφορική σύνθετη διέγερση (*differentially compounded dc machines*). Σ' αυτές, τα μαγνητικά πεδία που παράγονται από τα τυλίγματα παράλληλης διέγερσης και διέγερσης σειράς αφαιρούνται.

Οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται πλέον πολύ σπάνια στα συστήματα ισχύος. Ακόμη και όταν απαιτείται η παραγωγή ισχύος σε μορφή συνεχούς τάσης, χρησιμοποιούνται γεννήτριες εναλλασσομένου ρεύματος σε συνδυασμό με ανορθωτές.

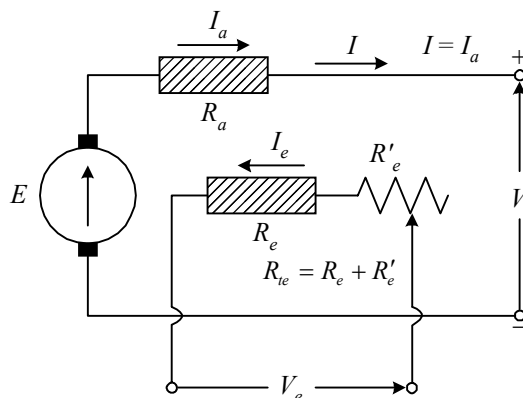
### 3.2 ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΜΕ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ

Στις γεννήτριες με ανεξάρτητη διέγερση, το τύλιγμα της διέγερσης τροφοδοτείται από μια ξεχωριστή πηγή συνεχούς τάσης. Έτσι, υπάρχει η δυνατότητα ακριβούς ρύθμισης του ρεύματος διέγερσης και της μαγνητικής ροής του κύριου πεδίου, με αποτέλεσμα την εξαιρετική ρύθμιση της τάσης εξόδου της γεννήτριας. Το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας με ανεξάρτητη διέγερση εικονίζεται στο Σχ. 3.1. Η τάση εξόδου της γεννήτριας συμβολίζεται με  $V$ . Η εσωτερικά παραγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) της γεννήτριας  $E$ , είναι ίση με

$$E = C_e \phi \omega_r \quad (3.1)$$

Η μαγνητική ροή  $\phi$  του κύριου πεδίου ορίζεται από το ρεύμα της διέγερσης  $I_e$ , το οποίο παρέχεται από την ανεξάρτητη πηγή  $V_e$ . Το ρεύμα διέγερσης και η ροή  $\phi = \phi(I_e)$ , ρυθμίζονται μέσω της μεταβλητής αντίστασης  $R'_e$ , η οποία συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα διέγερσης. Η ωμική αντίσταση του τυλίγματος διέγερσης είναι ίση με  $R_e$ . Αντίστοιχα, το κύκλωμα του δρομέα παρουσιάζει αντίσταση  $R_a$ . Στην αντίσταση  $R_a$  περιλαμβάνονται οι ωμικές αντιστάσεις των τυλιγμάτων του δρομέα, των βοηθητικών πόλων και του τυλίγματος αντιστάθμισης, εφόσον υπάρχει. Στη γεννήτρια με ανεξάρτητη διέγερση, το ρεύμα του φορτίου  $I$ , είναι ίσο με το ρεύμα στο δρομέα  $I_a$  ( $I = I_a$ ). Η τάση εξόδου συνδέεται με την ΗΕΔ με τη σχέση

$$V = E - I_a R_a \quad (3.2)$$



Σχ. 3.1 Ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας με ανεξάρτητη διέγερση

### 3.2.1 Χαρακτηριστική Κενού

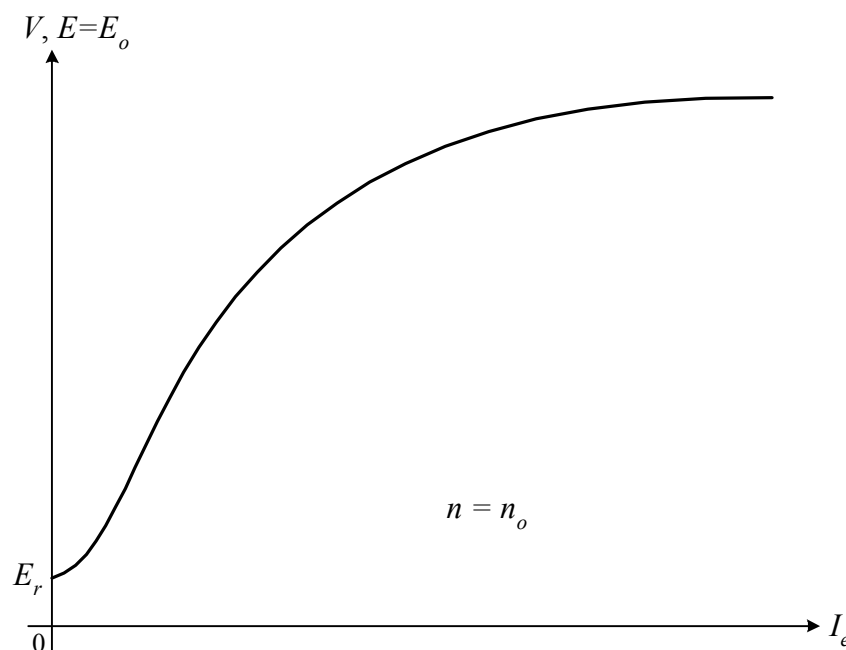
Σ' όλες τις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος ορίζεται η χαρακτηριστική κενού και η χαρακτηριστική φορτίου. Η *χαρακτηριστική κενού* λαμβάνεται λειτουργώντας τη μηχανή ως γεννήτρια με ανεξάρτητη διέγερση και παρουσιάζει τη μεταβολή της ΗΕΔ ως προς το ρεύμα της διέγερσης  $I_e$ . Καθώς η μηχανή λειτουργεί χωρίς φορτίο, η τάση εξόδου της είναι ίση με την ΗΕΔ  $E_o$ . Έτσι, η *χαρακτηριστική κενού αντιστοιχεί στην καμπύλη μαγνήτισης της μηχανής* (Σχ. 3.2). Ο κορεσμός του πυρήνα της μηχανής, όταν το ρεύμα διέγερσης υπερβεί κάποια τιμή, είναι σαφές στο Σχ. 3.2. Υπενθυμίζουμε ότι οι ηλεκτρικές μηχανές λειτουργούν στο γόνατο της καμπύλης μαγνήτισης, δηλαδή στο μη γραμμικό τμήμα της χαρακτηριστικής κενού. Η χαρακτηριστική κενού λαμβάνεται σε κάποια σταθερή ταχύτητα της γεννήτριας  $n_o$ . Επομένως, η ΗΕΔ της γεννήτριας  $E$ , στην επιθυμητή ταχύτητα  $n$ , υπολογίζεται από τη σχέση

$$\frac{E}{E_o} = \frac{n}{n_o} \quad (3.3)$$

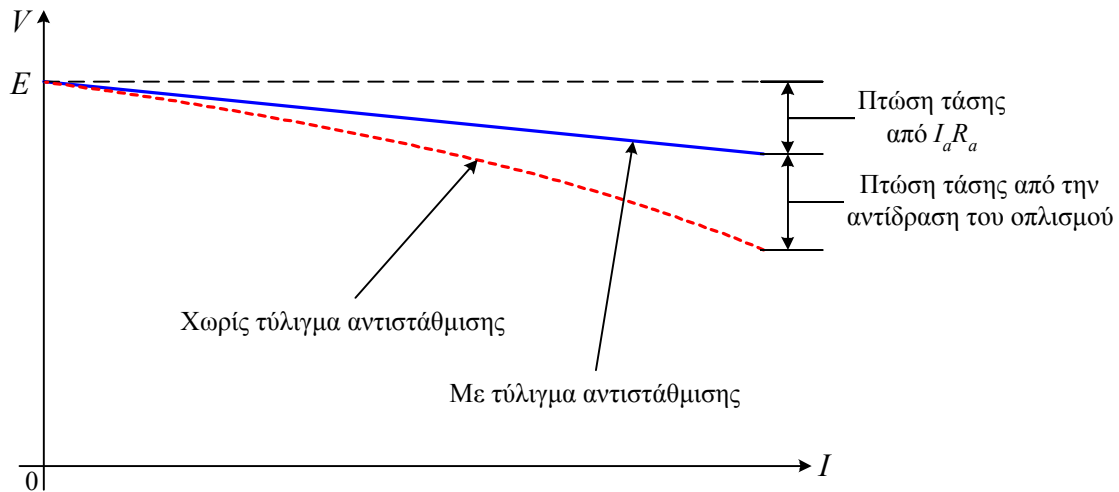
Στην Εξ. (3.3), με  $n$  συμβολίζεται η ταχύτητα της μηχανής σε στροφές ανά λεπτό (revolutions per minute, rpm). Η ταχύτητα των ηλεκτρικών μηχανών συνήθως αναφέρεται σ' αυτή τη μονάδα. Η σχέση μετατροπής μεταξύ της γωνιακής ταχύτητας  $\omega_r$  σε rad/s και της  $n$  σε rpm, είναι η

$$n = \frac{60}{2\pi} \omega_r \quad (3.4)$$

Από το Σχ. 3.2 παρατηρούμε ότι, για μηδενικό ρεύμα διέγερσης η ΗΕΔ της γεννήτριας έχει μια μικρή τιμή  $E_r$ . Αυτή η ΗΕΔ οφείλεται στην *παραμένουσα μαγνητική ροή (residual flux)* στους πόλους της μηχανής. Η παραμένουσα ροή είναι ίση με το 2–3% της ονομαστικής ροής. Στην παραμένουσα ροή οφείλεται η αυτοδιέγερση των γεννητριών συνεχούς ρεύματος.



Σχ. 3.2 Χαρακτηριστική κενού των μηχανών συνεχούς ρεύματος, στην ταχύτητα  $n_o$



Σχ. 3.3 Χαρακτηριστική φορτίου της γεννήτριας με ανεξάρτητη διέγερση

### 3.2.2 Χαρακτηριστική Φορτίου

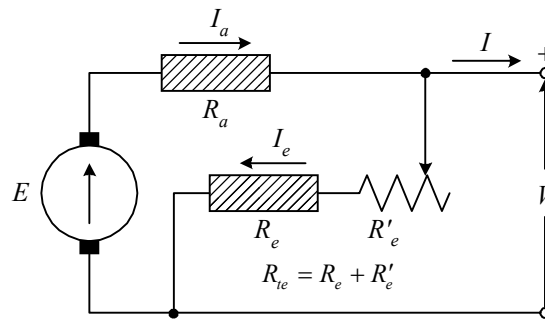
Η χαρακτηριστική φορτίου των γεννητριών συνεχούς ρεύματος παρουσιάζει τη μεταβολή της τάσης εξόδου (φορτίου)  $V$ , ως προς το ρεύμα εξόδου (φορτίου)  $I$ . Στις γεννήτριες ανεξάρτητης διέγερσης η ΗΕΔ δεν εξαρτάται από το ρεύμα του φορτίου, Εξ. (3.1). Έτσι, από την Εξ. (3.2), η τάση εξόδου μεταβάλλεται γραμμικά με το ρεύμα φορτίου (Σχ. 3.3). Η μείωση της τάσης εξόδου με την αύξηση του ρεύματος φορτίου, οφείλεται στην πτώση τάσης στην αντίσταση  $R_a$ .

Η γραμμική μεταβολή της τάσης εξόδου ισχύει μόνο όταν η γεννήτρια διαθέτει τύλιγμα αντιστάθμισης. Όταν αυτό δεν συμβαίνει, η αντίδραση του οπλισμού προκαλεί τη μείωση της μαγνητικής ροής, άρα και της ΗΕΔ, με την αύξηση του ρεύματος φορτίου. Έτσι, η πτώση της τάσης εξόδου με το ρεύμα του φορτίου είναι μεγαλύτερη χωρίς το τύλιγμα αντιστάθμισης, όπως εικονίζεται στο Σχ. 3.3 με διακεκομμένη γραμμή. Γενικότερα, η αντίδραση του επαγωγικού τύμπανου τροποποιεί τις χαρακτηριστικές φορτίου των γεννητριών, οι οποίες δεν διαθέτουν τύλιγμα αντιστάθμισης.

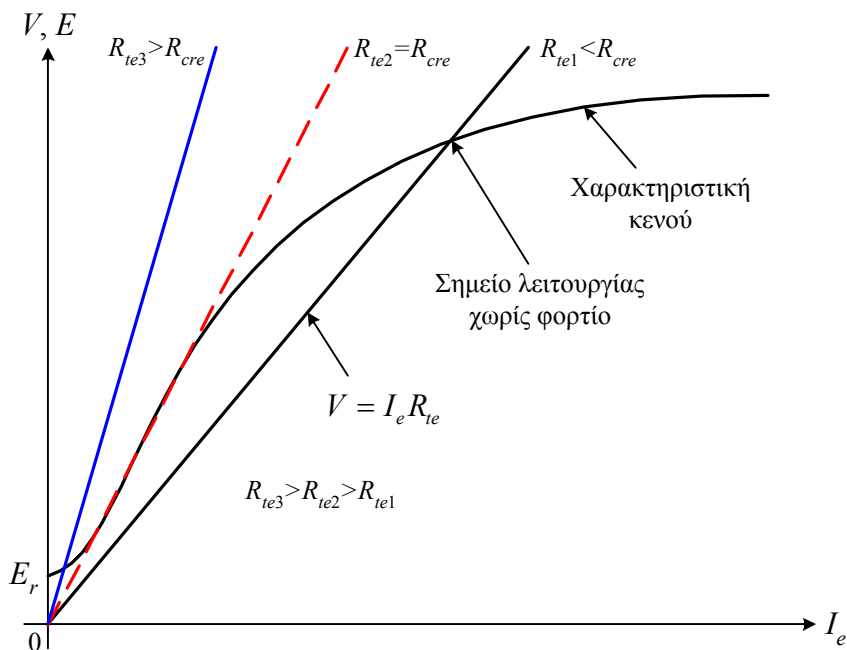
Η σταθεροποίηση της τάσης εξόδου μιας γεννήτριας με ανεξάρτητη διέγερση, ως προς τις μεταβολές του φορτίου, μπορεί να γίνει πολύ εύκολα με τη ρύθμιση του ρεύματος διέγερσης. Για τον ίδιο σκοπό μπορεί να ρυθμίζεται η ταχύτητα περιστροφής από την κινητήρια μηχανή, Εξ. (3.1). Όμως, η μέθοδος μεταβολής της ταχύτητας δεν είναι βολική στις πρακτικές εφαρμογές.

### 3.3 ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ

Στις γεννήτριες παράλληλης διέγερσης, το τύλιγμα διέγερσης συνδέεται παράλληλα με το κύκλωμα του δρομέα. Το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας εικονίζεται στο Σχ. 3.4. Το ρεύμα της διέγερσης παρέχεται στη γεννήτρια από το κύκλωμα του δρομέα. Έτσι, δεν απαιτείται η ανεξάρτητη πηγή τροφοδοσίας. Η αυτοδιέγερση της γεννήτριας οφείλεται στον παραμένοντα μαγνητισμό των πόλων του στάτη. Όταν η γεννήτρια αρχίσει να στρέφεται από την κινητήρια μηχανή, η παραμένουσα μαγνητική ροή  $\phi_r$  προκαλεί την ανάπτυξη μιας ΗΕΔ  $E_r = C_e \phi_r \omega_r$ . Η τάση  $E_r$  είναι περίπου ίση με το 2–3% της ονομαστικής τάσης εξόδου της γεννήτριας. Αυτή η αρχική τάση προκαλεί τη ροή ενός ρεύματος στο τύλιγμα της διέγερσης, το οποίο αυξάνει την παραμένουσα ροή. Με την αύξηση της ροής αυξάνεται παραπέρα η ΗΕΔ, η οποία προκαλεί νέα αύξηση του ρεύματος διέγερσης και της μαγνητικής ροής. Η δημιουργούμενη θετική ανάδραση έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη της τάσης εξόδου  $V$ , η τιμή της οποίας εξαρτάται από την αντίσταση  $R_{ie}$  στο κύκλωμα διέγερσης (Σχ. 3.5).



Σχ. 3.4 Ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας παράλληλης διέγερσης



Σχ. 3.5 Αυτοδιέγερση της γεννήτριας παράλληλης διέγερσης με  $R_{te} = R_{te1}$

Οι ευθείες στο Σχ. 3.5 εκφράζουν την πτώση τάσης στο κύκλωμα της διέγερσης  $V = I_e R_{te}$ , για τρεις τιμές της αντίστασης  $R_{te}$ . Η καμπύλη είναι η χαρακτηριστική κενού της μηχανής, την οποία έχουμε λάβει λειτουργώντας τη μηχανή με ανεξάρτητη διέγερση (παρ. 3.2.1). Η τάση που αναπτύσσει η γεννήτρια παράλληλης διέγερσης κατά τη διαδικασία της αυτοδιέγερσής της, προκύπτει από το σημείο τομής της χαρακτηριστικής κενού με την ευθεία  $I_e R_{te}$ .

Από την παραπάνω διαδικασία, προκύπτουν οι λόγοι μη ανάπτυξης τάσης σε μια γεννήτρια με παράλληλη διέγερση.

1. *Έλλειψη παραμένουτος μαγνητισμού.* Η αυτοδιέγερση της γεννήτριας παράλληλης διέγερσης δεν είναι δυνατή, όταν δεν υπάρχει παραμείνον μαγνητισμός, καθώς τότε δεν είναι δυνατή η ανάπτυξη της αρχικής τάσης  $E_r$ . Μια μηχανή μπορεί να χάσει τον παραμείνοντα μαγνητισμό από υπερβολική θέρμανση, από κτυπήματα κατά τη μεταφορά της, από τη σύνδεση εναλλασσόμενης τάσης στο τύλιγμα διέγερσης, ή αν παραμείνει μεγάλο χρονικό διάστημα εκτός λειτουργίας. Στην περίπτωση αυτή, αποσυνδέετε το τύλιγμα διέγερσης από το δρομέα και τροφοδοτείται από μια πηγή συνεχούς τάσης. Έτσι αναπτύσσεται ένα μαγνητικό πεδίο, το οποίο επαναφέρει την παραμείνουσα ροή στη μηχανή.

2. *Αντίστροφη φορά του τυλίγματος διέγερσης ή της φοράς περιστροφής.* Και στις δύο περιπτώσεις το ρεύμα διέγερσης που προκαλεί η αρχική ΗΕΔ  $E_r$  παράγει ένα μαγνητικό πεδίο, το

οποίο έχει αντίθετη φορά από το  $\phi_r$ . Έτσι, το ρεύμα της διέγερσης αντί να αυξάνει το πεδίο στη μηχανή, προκαλεί το μηδενισμό του και η γεννήτρια δεν μπορεί να διεγερθεί.

3. *Μεγάλη αντίσταση στο κύκλωμα διέγερσης.* Αν η αντίσταση στο κύκλωμα διέγερσης είναι μεγαλύτερη από μια κρίσιμη τιμή, τότε το ρεύμα διέγερσης δεν είναι επαρκές για να διεγείρει τη γεννήτρια. Η κρίσιμη τιμή της αντίστασης διέγερσης  $R_{cre}$ , αντιστοιχεί στην ευθεία με διακεκομμένη γραμμή του Σχ. 3.5. Έτσι, αν  $R_{ie} > R_{cre}$  η γεννήτρια δεν μπορεί να διεγερθεί.

4. *Εφαρμογή φορτίου στη γεννήτρια κατά την αυτοδιέγερσή της.* Το φορτίο της γεννήτριας συνήθως έχει πολύ μικρότερη αντίσταση από την αντίσταση  $R_{ie}$  του κυκλώματος διέγερσης. Έτσι, το ρεύμα που παράγει η μηχανή  $I_a$  ρέει κυρίως στο φορτίο, με αποτέλεσμα το ρεύμα της διέγερσης να μην είναι αρκετό για τη διέγερση της γεννήτριας. Επομένως, η αυτοδιέγερση της γεννήτριας πρέπει να γίνεται χωρίς φορτίο.

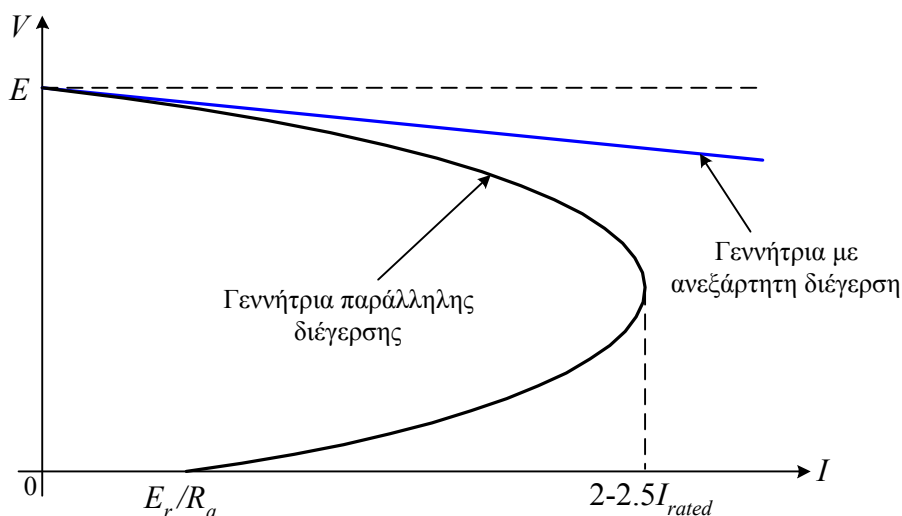
### 3.3.1 Χαρακτηριστική Φορτίου

Από το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας παράλληλης διέγερσης, είναι φανερό ότι ισχύουν οι σχέσεις

$$I_a = I_e + I \quad (3.5)$$

$$V = E - I_a R_a = I_e R_{ie} \quad (3.6)$$

Η χαρακτηριστική φορτίου της γεννήτριας παράλληλης διέγερσης, διαφέρει από εκείνη της γεννήτριας ανεξάρτητης διέγερσης, επειδή το ρεύμα διέγερσης εξαρτάται από την τάση εξόδου της μηχανής (Σχ. 3.6). Στη γεννήτρια ανεξάρτητης διέγερσης το ρεύμα  $I_e$  και η ΗΕΔ διατηρούνται σταθερές με το φορτίο. Όμως, στη γεννήτρια παράλληλης διέγερσης η αύξηση του ρεύματος φορτίου  $I$  προκαλεί την αύξηση του ρεύματος δρομέα  $I_a$  και έτσι τη μείωση της τάσης εξόδου  $V$ . Εξαιτίας της μείωσης της τάσης  $V$ , μειώνεται το ρεύμα διέγερσης, η μαγνητική ροή και η ΗΕΔ της μηχανής. Η μείωση της ΗΕΔ προκαλεί μια επιπλέον μείωση στην τάση εξόδου, η οποία δεν υπάρχει στις γεννήτριες ανεξάρτητης διέγερσης. Έτσι, για δεδομένο ρεύμα φορτίου η πτώση της τάσης εξόδου στις γεννήτριες παράλληλης διέγερσης είναι μεγαλύτερη, από την αντίστοιχη πτώση στις γεννήτριες με ανεξάρτητη διέγερση ( $I_a R_a$ ).



Σχ. 3.6 Χαρακτηριστική φορτίου της γεννήτριας παράλληλης διέγερσης



Από το Σχ. 3.6 παρατηρούμε ότι, καθώς η αντίσταση φορτίου μειώνεται, το ρεύμα του φορτίου αυξάνει και στη γεννήτρια ανεξάρτητης διέγερσης λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του  $E/R_a$  όταν το φορτίο βραχυκυκλωθεί. Αντίθετα, στη γεννήτρια παράλληλης διέγερσης το ρεύμα εξόδου αυξάνεται μέχρι μια κρίσιμη τιμή, η οποία είναι περίπου ίση με 2–2.5 φορές το ονομαστικό ρεύμα της μηχανής. Στη συνέχεια, η μείωση της αντίστασης φορτίου προκαλεί τη μείωση του ρεύματος, το οποίο τελικά λαμβάνει την τιμή  $E_r/R_a$  για μηδενική αντίσταση φορτίου. Όταν η γεννήτρια παράλληλης διέγερσης βραχυκυκλωθεί, τότε  $V = 0$  και  $I_e = 0$ . Επομένως, ο παραμένον μαγνητισμός είναι υπεύθυνος για το ρεύμα του φορτίου στην κατάσταση βραχυκύκλωσης.

### 3.4 ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΜΕ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΣΕΙΡΑΣ

Στις γεννήτριες με διέγερση σειράς, το τύλιγμα διέγερσης συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα του δρομέα, όπως εικονίζεται στο ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας (Σχ. 3.7). Επειδή το τύλιγμα διέγερσης διαρρέεται από το υψηλό ρεύμα του φορτίου, έχει μικρό αριθμό σπειρών και κατασκευάζεται από αγωγό μεγάλης διατομής. Έτσι, η ωμική αντίσταση του τυλίγματος διέγερσης είναι πολύ μικρή. Αντίθετα, τα τυλίγματα διέγερσης των μηχανών με ανεξάρτητη και παράλληλη διέγερση κατασκευάζονται από αγωγό μικρής διατομής και με μεγάλο αριθμό σπειρών. Έτσι, εμφανίζουν μεγάλη αντίσταση, ώστε το ρεύμα της διέγερσης να είναι μικρό.

Στη γεννήτρια με διέγερση σειράς ισχύουν οι σχέσεις

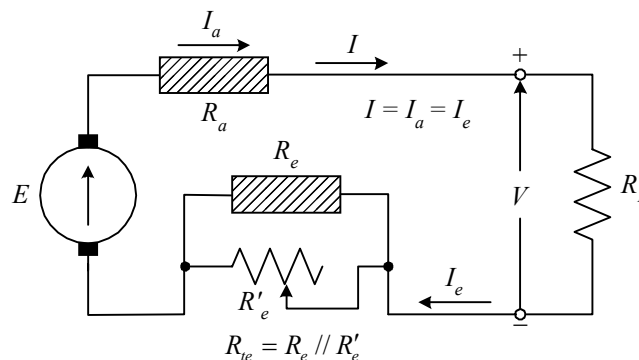
$$I = I_a = I_e \quad (3.7)$$

$$V = E - I(R_a + R_e) \quad (3.8)$$

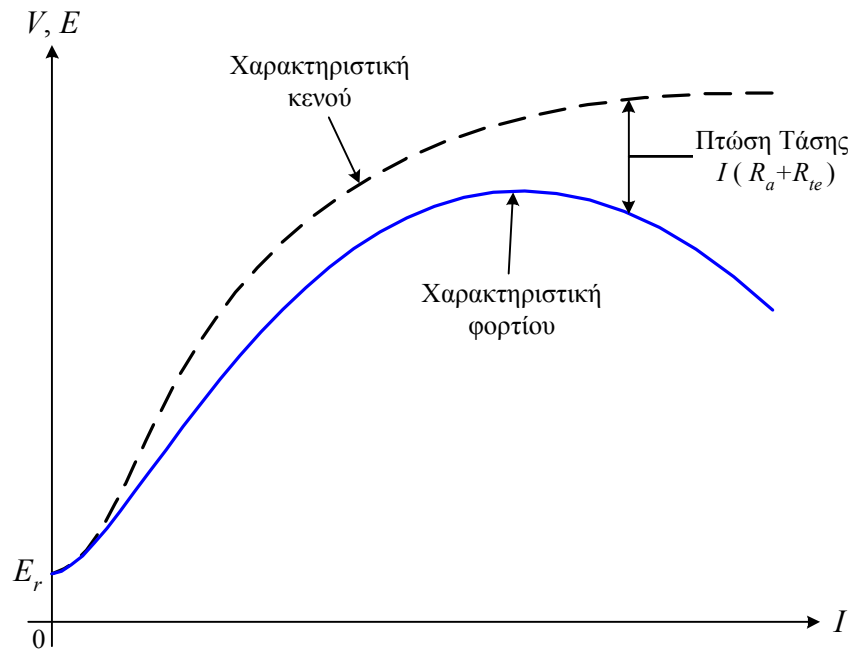
#### 3.4.1 Χαρακτηριστική Φορτίου

Για την αυτοδιέγερση της γεννήτριας με διέγερση σειράς, ισχύουν οι παρατηρήσεις της γεννήτριας με παράλληλη διέγερση, με τη διαφορά ότι το φορτίο πρέπει να είναι αρχικά συνδεδεμένο στη μηχανή. Στη λειτουργία χωρίς φορτίο, το ρεύμα διέγερσης είναι μηδέν και στα άκρα της γεννήτριας εμφανίζεται η μικρή τάση  $E_r$ , την οποία προκαλεί η παραμένουσα ροή. Η χαρακτηριστική φορτίου εικονίζεται στο Σχ. 3.8. Η χαρακτηριστική φορτίου έχει τη μορφή της χαρακτηριστικής κενού, μειωμένης κατά την πτώση τάσης στις ωμικές αντιστάσεις των τυλιγμάτων,  $I(R_a + R_e)$ . Η μείωση της τάσης εξόδου  $V$  ως προς την ΗΕΔ, αυξάνει με την αύξηση του ρεύματος φορτίου εξαιτίας του μαγνητικού κορεσμού, ο οποίος τείνει να κάνει την  $E$  σταθερή.

Οι γεννήτριες με διέγερση σειράς, λόγω της μεγάλης διακύμανσης της τάσης εξόδου με το ρεύμα του φορτίου είναι κατάλληλες μόνο σε ειδικές εφαρμογές, με κυριότερη τις ηλεκτροσυγκολλήσεις. Ειδικότερα, οι γεννήτριες σειράς των ηλεκτροσυγκολλήσεων κατασκευάζονται με μεγάλη αντίδραση του οπλισμού.



Σχ. 3.7 Ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας με διέγερση σειράς



Σχ. 3.8 Χαρακτηριστική φορτίου της γεννήτριας με διέγερση σειράς

### 3.5 ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΜΕ ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΣΥΝΘΕΤΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ

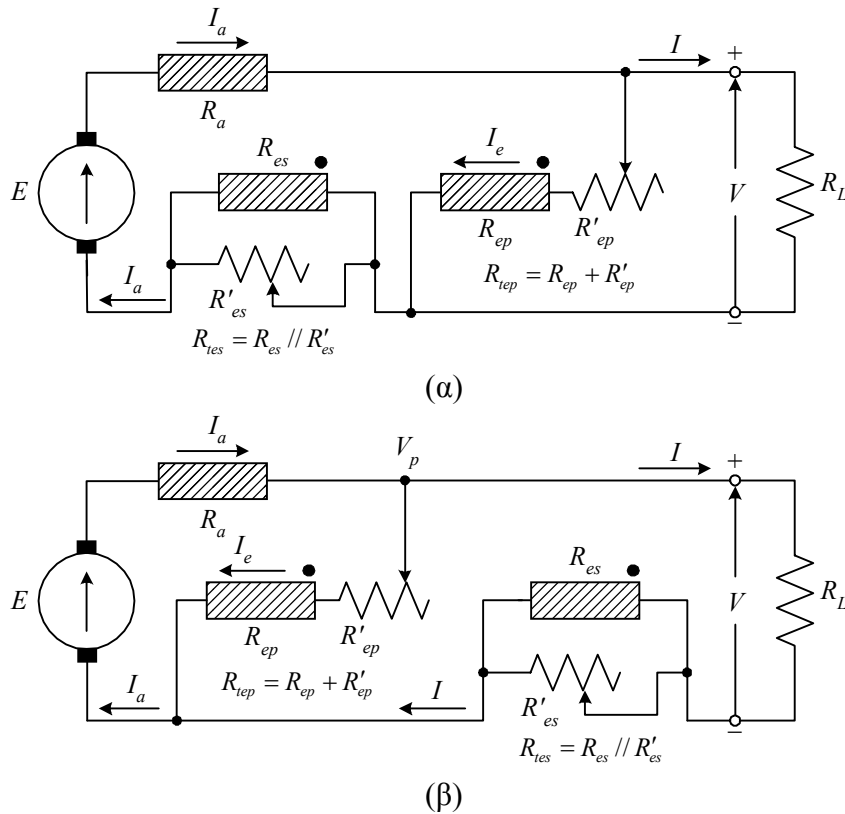
Οι γεννήτριες αθροιστικής σύνθετης διέγερσης διαθέτουν δύο τυλίγματα διέγερσης, από τα οποία το ένα συνδέεται σε σειρά και το άλλο παράλληλα με το τύλιγμα του οπλισμού. Επιπλέον, η φορά σύνδεσης των δύο τυλιγμάτων είναι τέτοια, έτσι ώστε τα μαγνητικά πεδία που αναπτύσσονται να προστίθενται. Στο Σχ. 3.9 εικονίζονται τα δύο ισοδύναμα κυκλώματα της γεννήτριας, ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης των τυλιγμάτων διέγερσης. Στο ισοδύναμο κύκλωμα του Σχ. 3.9α, το τύλιγμα σειράς  $R_{es}$  διαρρέεται από το ρεύμα του οπλισμού  $I_a$  και ονομάζεται *long shunt*. Στο ισοδύναμο κύκλωμα του Σχ. 3.9β, το τύλιγμα σειράς διαρρέεται από το ρεύμα του φορτίου  $I$  και ονομάζεται *short shunt*. Η μεταξύ τους διαφορά δεν είναι σημαντική, καθώς το ρεύμα  $I_e$  στο τύλιγμα της παράλληλης διέγερσης  $R_{ep}$  είναι πολύ μικρότερο από το ρεύμα του οπλισμού. Έτσι, ισχύει  $I_a \approx I$ . Τα ρεύματα της παράλληλης διέγερσης  $I_e$  και της διέγερσης σειράς  $I_a$  ή  $I$  αντίστοιχα, εισέρχονται στο παράλληλο τύλιγμα και το τύλιγμα σειράς από τον ακροδέκτη με την τελεία. Επομένως, οι μαγνητικές τους ροές αθροίζονται.

Στη γεννήτρια αθροιστικής σύνθετης διέγερσης, με τη δομή του ισοδύναμου κυκλώματος του Σχ. 3.9α, ισχύουν οι σχέσεις

$$I_a = I_e + I \quad (3.9)$$

$$V = E - I_a (R_a + R_{tes}) \quad (3.10)$$

$$I_e = \frac{V}{R_{tep}} \quad (3.11)$$



Σχ. 3.9 Ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας με αθροιστική σύνθετη διέγερση σε σύνδεση *long shunt* (α) και σε σύνδεση *short shunt* (β)

Στη γεννήτρια αθροιστικής σύνθετης διέγερσης, με τη σύνδεση του ισοδύναμου κυκλώματος του Σχ. 3.9β, ισχύουν οι σχέσεις

$$I_a = I_e + I \tag{3.12}$$

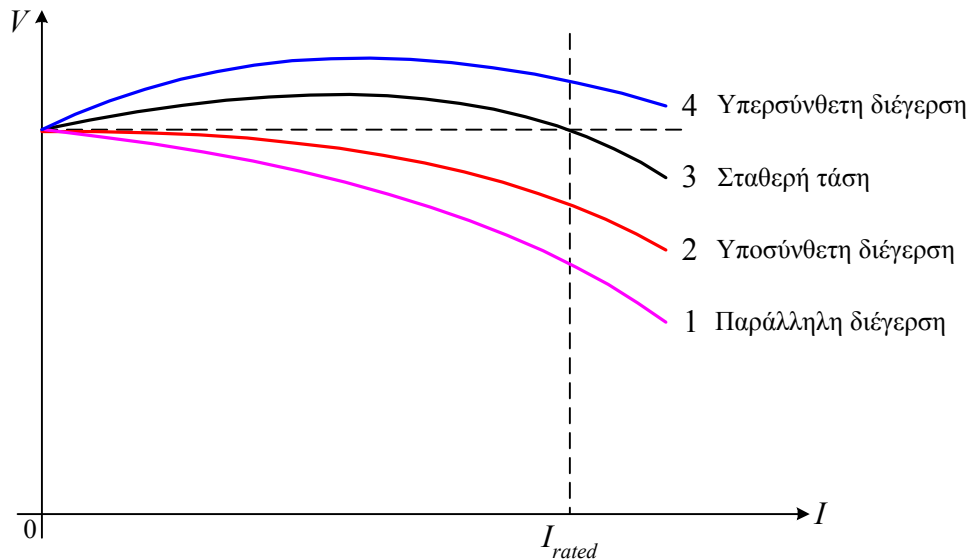
$$V_p = E - I_a R_a \tag{3.13}$$

$$V = V_p - I R_{tes} \tag{3.14}$$

$$I_e = \frac{V_p}{R_{tep}} \tag{3.15}$$

### 3.5.1 Χαρακτηριστικές Φορτίου

Η χαρακτηριστική φορτίου μιας γεννήτριας με αθροιστική σύνθετη διέγερση, εξαρτάται από την επίδραση του τυλίγματος σειράς στο πεδίο που παράγει το παράλληλο τύλιγμα. Αν μέσω της μεταβλητής αντίστασης  $R'_{es}$  βραχυκυκλωθεί το τύλιγμα σειράς, η χαρακτηριστική φορτίου της γεννήτριας είναι αντίστοιχη μ' εκείνη μιας γεννήτριας με παράλληλη διέγερση. Όπως εικονίζει η καμπύλη 1 του Σχ. 3.10, η τάση εξόδου μειώνεται με το ρεύμα του φορτίου εξαιτίας της αυξανόμενης πτώσης τάσης στην αντίσταση  $R_a$  ( $R_{tes} = 0$ ). Για μια μικρή τιμή της αντίστασης  $R'_{es}$ , το τύλιγμα σειράς διαρρέεται από ένα μικρό τμήμα του ρεύματος φορτίου. Επομένως, με την αύξηση του ρεύματος φορτίου αυξάνεται λίγο το μαγνητικό πεδίο του τυλίγματος σειράς, η ολική ροή, η ΗΕΔ και η τάση εξόδου της γεννήτριας.



Σχ. 3.10 Χαρακτηριστικές φορτίου της γεννήτριας με αθροιστική σύνθετη διέγερση, ανάλογα με την επίδραση του τυλίγματος σειράς

Έτσι λαμβάνουμε την καμπύλη 2 στο Σχ. 3.10, στην οποία η μείωση της τάσης εξόδου με το ρεύμα του φορτίου είναι μικρότερη, συγκριτικά με την παράλληλη διέγερση. Η καμπύλη 2 αντιστοιχεί στη λειτουργία της γεννήτριας με *υποσύνθετη διέγερση (under-compounded)*.

Σε μια κατάλληλη τιμή της αντίστασης  $R'_{es}$ , η χαρακτηριστική φορτίου αποκτά τη μορφή της καμπύλης 3, η οποία ονομάζεται *καμπύλη σταθερής τάσης (flat-compounded)*. Τώρα, η τάση εξόδου της γεννήτριας στο ονομαστικό φορτίο, είναι ίση με την τάση της γεννήτριας στο κενό.

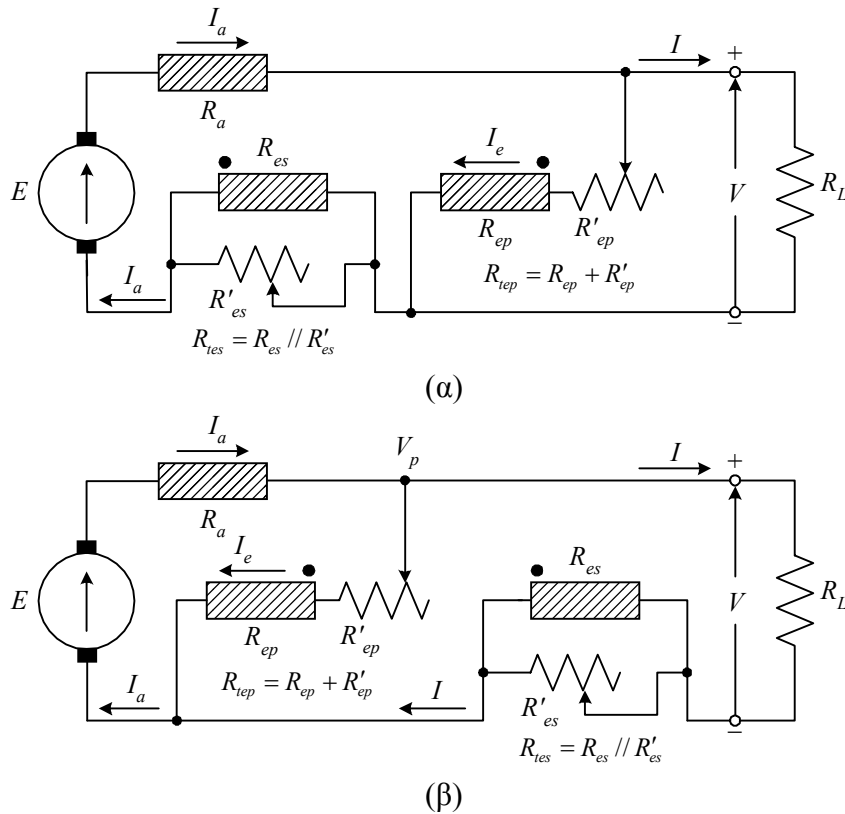
Αυξάνοντας παραπέρα την τιμή της αντίστασης  $R'_{es}$ , η επίδραση του τυλίγματος σειράς στο ολικό πεδίο της γεννήτριας ενισχύεται. Έτσι, η τάση εξόδου της γεννήτριας στο ονομαστικό φορτίο γίνεται μεγαλύτερη από την τάση χωρίς φορτίο (καμπύλη 4). Η γεννήτρια λειτουργεί με *υπερσύνθετη διέγερση (over-compounded)*.

### 3.6 ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΣΥΝΘΕΤΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ

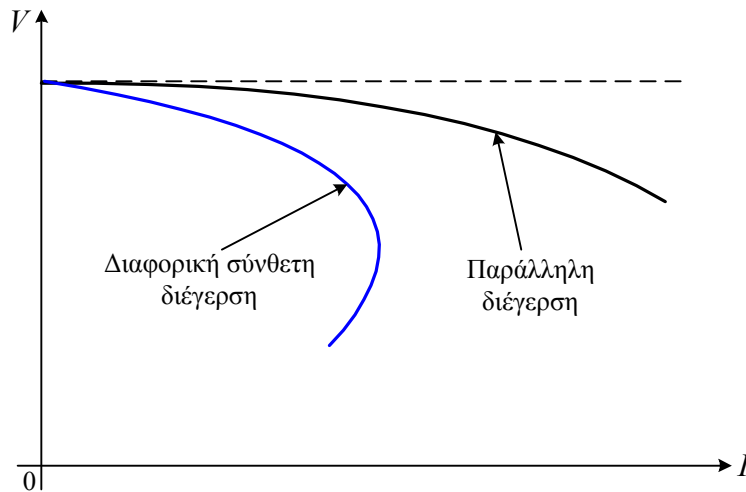
Η διαφορά των γεννητριών με διαφορετική σύνθετη διέγερση, από τις μηχανές με αθροιστική διέγερση, είναι ότι οι μαγνητικές ροές των τυλιγμάτων παράλληλης διέγερσης και διέγερσης σειράς αφαιρούνται. Αυτό εικονίζεται στο Σχ. 3.11, όπου το ρεύμα στο παράλληλο τύλιγμα εισέρχεται σε ακροδέκτη με τελεία, ενώ στο τύλιγμα σειράς το ρεύμα εξέρχεται από ακροδέκτη με τελεία. Οι Εξ. (3.9)–(3.11) και οι Εξ. (3.12)–(3.15) των γεννητριών αθροιστικής διέγερσης, ισχύουν και στις αντίστοιχες γεννήτριες διαφορετικής σύνθετης διέγερσης.

Η χαρακτηριστική φορτίου της γεννήτριας, παρουσιάζει μια πολύ απότομη πτώση της τάσης εξόδου με την αύξηση του ρεύματος φορτίου (Σχ. 3.12). Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στο τύλιγμα σειράς, η μαγνητική ροή του οποίου μειώνει το ολικό πεδίο της μηχανής. Έτσι, με την αύξηση του ρεύματος φορτίου μειώνεται η ολική ροή και η ΗΕΔ, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η πτώση τάσης στις αντιστάσεις  $R_a$  και  $R_{tes}$ . Αυτοί οι δύο μηχανισμοί, που στη γεννήτρια αθροιστικής σύνθετης διέγερσης είχαν αντίθετη δράση, τώρα δρουν προς την ίδια κατεύθυνση, με αποτέλεσμα την έντονη μείωση της τάσης εξόδου με το φορτίο.

Οι γεννήτριες με διαφορετική σύνθετη διέγερση χρησιμοποιούνται ελάχιστα και σε ειδικές περιπτώσεις, όπως οι ηλεκτροσυγκολλήσεις.



Σχ. 3.11 Ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας με διαφορετική σύνθετη διέγερση σε σύνδεση *long shunt* (α) και σε σύνδεση *short shunt* (β)

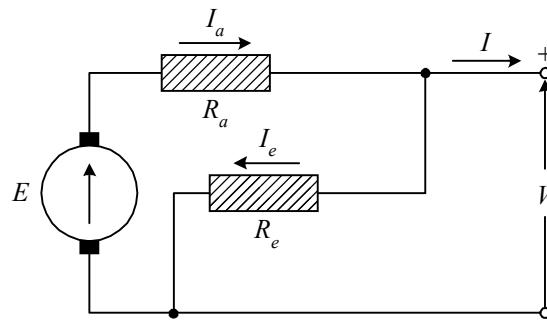


Σχ. 3.12 Χαρακτηριστική φορτίου της γεννήτριας με διαφορετική σύνθετη διέγερση

### 3.7 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

**Παράδειγμα 3.1** Σε μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης, το τύλιγμα του δρομέα έχει αντίσταση  $0.03\Omega$  και το τύλιγμα διέγερσης  $50\Omega$ . Η γεννήτρια τροφοδοτεί ένα φορτίο  $60\text{kW}$  με τάση  $200\text{V}$ . Υπολογίστε:

- α) Τα ρεύματα στο φορτίο, στο τύλιγμα διέγερσης και στον οπλισμό.
- β) Την ΗΕΔ της γεννήτριας.



Ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας με παράλληλη διέγερση

Το ρεύμα στο φορτίο δίνεται από το λόγο της ισχύος εξόδου προς την τάση εξόδου

$$I = \frac{P_o}{V} = \frac{60000}{200} = 300\text{A}$$

Το ρεύμα διέγερσης είναι

$$I_e = \frac{V}{R_e} = \frac{200}{50} = 4\text{A}$$

Το ρεύμα του οπλισμού είναι ίσο με το άθροισμα των παραπάνω ρευμάτων

$$I_a = I + I_e = 300 + 4 = 304\text{A}$$

Η ΗΕΔ είναι ίση με

$$E = V + I_a R_a = 200 + 304 \cdot 0.03 = 209.1\text{V}$$

**Παράδειγμα 3.2** Γεννήτρια συνεχούς ρεύματος με ανεξάρτητη διέγερση, έχει τα εξής ονομαστικά στοιχεία:  $V = 460\text{V}$ ,  $V_e = 90\text{V}$ ,  $P = 230\text{kW}$ ,  $n = 1450\text{rpm}$ ,  $R_a = 0.04\Omega$ ,  $R_e = 8\Omega$ . Η χαρακτηριστική κενού της μηχανής στις  $1000\text{rpm}$ , δίνεται στον παρακάτω πίνακα. Ζητούνται:

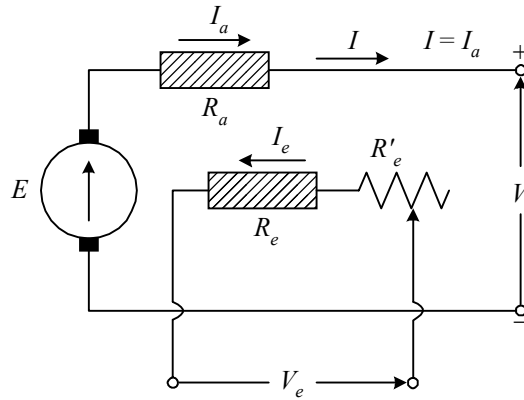
- Η χαρακτηριστική κενού στις  $1450\text{rpm}$ .
- Το ρεύμα διέγερσης στην ονομαστική λειτουργία και η τιμή της  $R'_e$ .

$I_e$ [A]	0	4	6	8	10	12
$E_{1000}$ [V]	17	181	261	317	350	366

Η ΗΕΔ στις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος ορίζεται από τη σχέση,  $E = C_e \phi \omega_r = C_e \phi (2\pi / 60)n$ . Έτσι, για δεδομένο ρεύμα διέγερσης και μαγνητική ροή, αν η ΗΕΔ είναι γνωστή στην ταχύτητα  $1000\text{rpm}$ , η ΗΕΔ στην ταχύτητα των  $1450\text{rpm}$  υπολογίζεται από τη σχέση

$$\frac{E_{1000}}{E_{1450}} = \frac{1000}{1450} \Rightarrow E_{1450} = \frac{1450 E_{1000}}{1000}$$

Εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση για κάθε μια τιμή του ρεύματος διέγερσης, ορίζουμε τη χαρακτηριστική κενού στις  $1450\text{rpm}$ , σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα



Ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας με ανεξάρτητη διέγερση

$I_e$ [A]	0	4	6	8	10	12
$E_{1000}$ [V]	17	181	261	317	350	366
$E_{1450}$ [V]	<b>24.6</b>	<b>262</b>	<b>378</b>	<b>460</b>	<b>507</b>	<b>531</b>

Στην ονομαστική λειτουργία, το ρεύμα του φορτίου είναι

$$I = I_a = \frac{P_o}{V} = \frac{230000}{460} = 500\text{A}$$

και η ΗΕΔ της γεννήτριας είναι ίση με

$$E = V + I_a R_a = 460 + 500 \cdot 0.04 = 480\text{V}$$

Από την χαρακτηριστική κενού στην ονομαστική ταχύτητα των 1450rpm, το ρεύμα της διέγερσης που αντιστοιχεί στην ΗΕΔ των 480V είναι περίπου ίσο με 9A. Η μεταβλητή αντίσταση  $R'_e$  ορίζεται από τη σχέση

$$R'_e + R_e = \frac{V_e}{I_e} \Rightarrow R'_e = \frac{90}{9} - 8 = 2\Omega$$

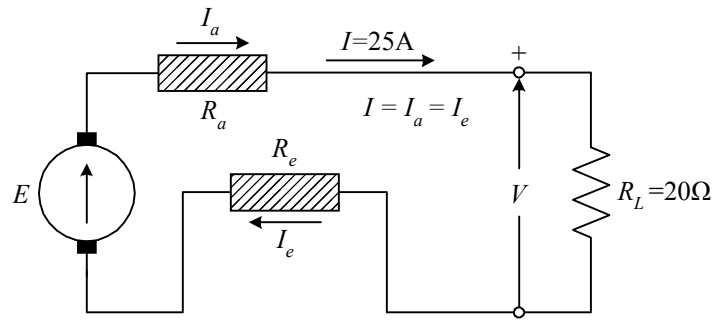
**Παράδειγμα 3.3** Γεννήτρια συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς, δίνει σε φορτίο  $20\Omega$  ρεύμα 25A. Για το ρεύμα αυτό, οι απώλειες χαλκού είναι ίσες με το 8% της εσωτερικά παραγόμενης ισχύος  $P_{in}$ . Υπολογίστε:

- Την τάση εξόδου.
- Την εσωτερικά παραγόμενη ισχύ.
- Την ολική αντίσταση των τυλιγμάτων του οπλισμού και της διέγερσης.
- Την ΗΕΔ.

Η τάση εξόδου είναι ίση με

$$V = IR_L = 25 \cdot 20 = 500\text{V}$$

Αν αγνοήσουμε όλες τις απώλειες εκτός από τις απώλειες χαλκού, η εσωτερικά παραγόμενη ισχύς της γεννήτριας  $P_{in}$ , είναι ίση με την ισχύ εξόδου (φορτίου)  $P_o$  συν τις απώλειες χαλκού  $P_{cu}$



Ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας με διέγερση σειράς

$$P_{in} = P_o + P_{cu} = I^2 R_L + 0.08 P_{in} \Rightarrow 0.92 P_{in} = I^2 R_L \Rightarrow P_{in} = \frac{25^2 \cdot 20}{0.92} = 13587 \text{ W}$$

Οι απώλειες χαλκού είναι ίσες με

$$P_{cu} = 0.08 P_{in} = 0.08 \cdot 13587 = 1087 \text{ W}$$

$$P_{cu} = I^2 (R_a + R_e) \Rightarrow R_a + R_e = \frac{1087}{25^2} = 1.74 \Omega$$

Η ΗΕΔ είναι ίση με

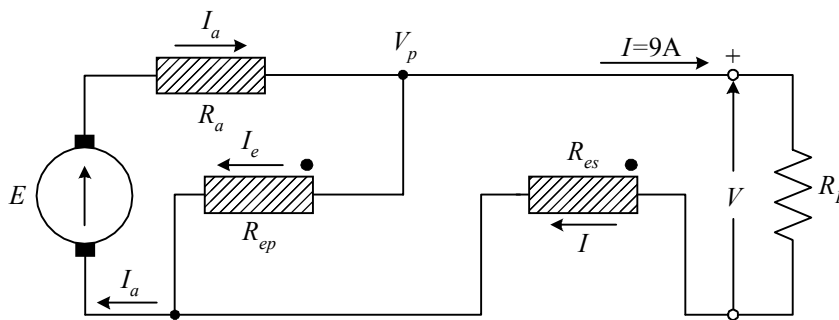
$$E = V + I(R_a + R_e) = 500 + 25 \cdot 1.74 = 543.5 \text{ V}$$

**Παράδειγμα 3.4** Γεννήτρια συνεχούς ρεύματος με αθροιστική σύνθετη διέγερση, έχει τα εξής ονομαστικά στοιχεία:  $V = 440 \text{ V}$ ,  $I = 9 \text{ A}$ ,  $R_a = 1.6 \Omega$ ,  $R_{ep} = 340 \Omega$ ,  $R_{es} = 1 \Omega$ . Υπολογίστε:

α) Την ΗΕΔ.

β) Τις απώλειες χαλκού.

γ) Το βαθμό απόδοσης (οι απώλειες σιδήρου, ψηκτρών και οι κατανεμημένες αγνοούνται).



Ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας με αθροιστική σύνθετη διέγερση σε σύνδεση *short shunt*

Για τον υπολογισμό της ΗΕΔ, ακολουθούμε την παρακάτω σειρά υπολογισμών

$$V_p = V + I R_{es} = 440 + 9 \cdot 1 = 449 \text{ V}$$

$$I_e = \frac{V_p}{R_{ep}} = \frac{449}{340} = 1.32 \text{ A}$$



$$I_a = I + I_e = 9 + 1.32 = 10.32 \text{ A}$$

$$E = V_p + I_a R_a = 449 + 10.32 \cdot 1.6 = 465.5 \text{ V}$$

Οι απώλειες χαλκού είναι ίσες με το άθροισμα των απωλειών στα τυλίγματα του οπλισμού, διέγερσης σειράς και παράλληλης διέγερσης

$$P_{R_a} = I_a^2 R_a = 10.32^2 \cdot 1.6 = 170.4 \text{ W}$$

$$P_{R_{es}} = I^2 R_{es} = 9^2 \cdot 1 = 81 \text{ W}$$

$$P_{R_{ep}} = I_e^2 R_{ep} = 1.32^2 \cdot 340 = 592.4 \text{ W}$$

$$P_{cu} = P_{R_a} + P_{R_{es}} + P_{R_{ep}} = 843.8 \text{ W}$$

Ο βαθμός απόδοσης ορίζεται από τη σχέση

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} = \frac{VI}{VI + P_{cu}} = \frac{440 \cdot 9}{440 \cdot 9 + 843.8} = 82.4\%$$

ή από την εξίσωση

$$\eta = \frac{VI}{EI_a} = \frac{440 \cdot 9}{465.5 \cdot 10.32} = 82.4\%$$

**Παράδειγμα 3.5** Γεννήτρια συνεχούς ρεύματος με ανεξάρτητη διέγερση, έχει τα παρακάτω ονομαστικά στοιχεία:  $V = 440 \text{ V}$ ,  $V_e = 440 \text{ V}$ ,  $I = 400 \text{ A}$ ,  $n = 1500 \text{ rpm}$ ,  $R_a = 0.05 \Omega$ ,  $R_e = 30 \Omega$ . Η καμπύλη μαγνήτισης της γεννήτριας δίνεται από τον παρακάτω πίνακα και αντιστοιχεί στην ονομαστική ταχύτητα. Ζητούνται:

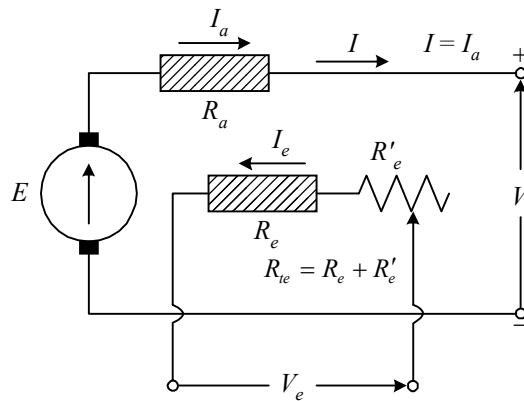
- α) Η τάση της γεννήτριας χωρίς φορτίο όταν στρέφεται με  $1200 \text{ rpm}$  και η ρυθμιστική αντίσταση είναι ίση με  $R'_e = 50 \Omega$ .  
 β) Η τάση στα άκρα της γεννήτριας όταν λειτουργεί με φορτίο, το οποίο απορροφά ρεύμα  $300 \text{ A}$ .  
 γ) Η τιμή της αντίστασης  $R'_e$  έτσι ώστε για το ρεύμα φορτίου των  $300 \text{ A}$ , η τάση εξόδου της γεννήτριας να αποκτήσει και πάλι την τιμή κενού.

$I_e$ [A]	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
$E_{1500}$ [V]	390	412	430	442	450

Το ρεύμα διέγερσης της γεννήτριας είναι ίσο με

$$I_e = \frac{V_e}{R_e + R'_e} = \frac{440}{30 + 50} = 5.5 \text{ A}$$

Η ΗΕΔ της γεννήτριας στις  $1500 \text{ rpm}$ , από την καμπύλη μαγνήτισης, είναι ίση με  $E_{1500} = 430 \text{ V}$ . Η ΗΕΔ στις  $1200 \text{ rpm}$ , ορίζεται από το λόγο των ΗΕΔ στις  $1500 \text{ rpm}$  και  $1200 \text{ rpm}$



Ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας με ανεξάρτητη διέγερση

$$\frac{E_{1500}}{E} = \frac{1500}{1200} \Rightarrow E = \frac{1200 \cdot 430}{1500} = 344\text{V}$$

Η ΗΕΔ είναι ίση με την τάση εξόδου της γεννήτριας όταν αυτή λειτουργεί χωρίς φορτίο  $V_{nl} = E = 344\text{V}$ .

Η τάση στα άκρα της γεννήτριας, όταν το φορτίο απορροφά ρεύμα 300A, είναι ίση με

$$V = E - I_a R_a = 344 - 300 \cdot 0.05 = 329\text{V}$$

Για να επανέλθει η τάση εξόδου της γεννήτριας στα 344V, πρέπει να αυξηθεί η ΗΕΔ με αύξηση του ρεύματος διέγερσης. Η ΗΕΔ πρέπει να γίνει ίση με

$$E = V + I_a R_a = 344 + 300 \cdot 0.05 = 359\text{V}$$

Η ΗΕΔ των 359V στις 1200rpm, αντιστοιχεί σε ΗΕΔ στις 1500rpm ίση με

$$\frac{E_{1500}}{E} = \frac{1500}{1200} \Rightarrow E_{1500} = \frac{1500 \cdot 359}{1200} = 448.7\text{V}$$

Από την καμπύλη μαγνήτισης, το ρεύμα διέγερσης που αντιστοιχεί στην τάση των 448.7V είναι περίπου ίσο με 6.4A. Επομένως, η ρυθμιστική αντίσταση πρέπει να μειωθεί στην τιμή

$$R'_e + R_e = \frac{V_e}{I_e} \Rightarrow R'_e = \frac{440}{6.4} - 30 = 38.75\Omega$$