ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ

Πλήρεις Σημειώσεις Μελέτης & Αναλυτική Διδακτέα Ύλη

Μάθημα: Ηλεκτρονικά Ισχύος **Επίπεδο:** Θεωρητική & Εργαστηριακή Εκπαίδευση **Υλικό:** e-Class Study Notes

ΕΝΟΤΗΤΑ 1 Εισαγωγή στα Ηλεκτρονικά Ισχύος & Θεμελιώδεις Αρχές

Τα **Ηλεκτρονικά Ισχύος** αποτελούν τον κλάδο της ηλεκτρολογίας/ηλεκτρονικής που ασχολείται με τη μετατροπή, τον έλεγχο και τη διαχείριση της ηλεκτρικής ισχύος με τον υψηλότερο δυνατό βαθμό απόδοσης.

1.1 Γραμμικοί vs Διακοπτικοί Ρυθμιστές

Σε αντίθεση με τα ασθενή ρεύματα όπου οι ημιαγωγοί λειτουργούν στη γραμμική περιοχή (λειτουργία ως μεταβλητές αντιστάσεις με μεγάλες θερμικές απώλειες), στα Ηλεκτρονικά Ισχύος οι ημιαγωγικές διατάξεις λειτουργούν αποκλειστικά ως **ιδανικοί διακόπτες** (κατάσταση ΑΓΩΓΗΣ / ON με μηδενική τάση, ή κατάσταση ΑΠΟΚΟΠΗΣ / OFF με μηδενικό ρεύμα).

1.2 Βαθμός Απόδοσης & Απώλειες Ισχύος

- Βαθμός Απόδοσης: $\eta = (P_{out} / P_{in}) \times 100\% = [P_{out} / (P_{out} + P_{loss})] \times 100\%$
- Συνολικές Απώλειες: $P_{loss} = P_{cond}$ (Απώλειες Αγωγιμότητας) + P_{sw} (Απώλειες Μεταγωγής)
- Απώλειες Αγωγιμότητας: $P_{cond} = I_{rms}^2 \cdot R_{DS(on)}$ ή $V_{CE(sat)} \cdot I_{avg}$
- Απώλειες Μεταγωγής: $P_{sw} = f_{sw} \cdot (E_{on} + E_{off})$

1.3 Θερμική Διαχείριση

Η παραγόμενη θερμότητα στην επαφή του ημιαγωγού πρέπει να απαχθεί στο περιβάλλον για να αποφευχθεί η καταστροφή του εξαρτήματος:

$$T_j = T_a + P_{loss} \cdot (R_{th,jc} + R_{th,cs} + R_{th,sa})$$

Όπου: T_j = Θερμοκρασία Ζεύξης (Junction), T_a = Θερμοκρασία Περιβάλλοντος, R_{th} = Θερμικές Αντιστάσεις (jc: ζεύξης-κελύφους, cs: κελύφους-ψύκτρας, sa: ψύκτρας-περιβάλλοντος).

💡 **Ερωτήσεις Μελέτης Ενότητας 1:**

1. Γιατί η διακοπτική λειτουργία προσφέρει υψηλότερο βαθμό απόδοσης από τη γραμμική;
2. Πώς επηρεάζει η συχνότητα μεταγωγής (f_{sw}) το μέγεθος των παθητικών εξαρτημάτων (πηνία/πυκνωτές) και τις απώλειες μεταγωγής;

ΕΝΟΤΗΤΑ 2 Ημιαγωγοί Διακόπτες Ισχύος (Power Semiconductor Devices)

Οι ημιαγωγοί ισχύος διακρίνονται ανάλογα με τη δυνατότητα ελέγχου της κατάστασης αγωγής και αποκοπής τους.

Εξάρτημα	Τρόπος Ελέγχου	Χαρακτηριστικά Μεταγωγής	Πεδίο Εφαρμογής
Δίοδος Ισχύος	Μη ελεγχόμενος (Πολικότητα τάσης)	Χαμηλή/Μεσαία f_{sw}, χρόνο-ανάκτησης t_{rr}	Ανόρθωση, Δίοδος Freewheeling
Θυρίστορ (SCR)	Ελεγχόμενο ON (Παλμός Gate), OFF μέσω κυκλώματος	Χαμηλή f_{sw} (< 1 kHz), Πολύ υψηλή ισχύς	Ελεγχόμενοι Ανορθωτές, HVAC, Δίκτυα
Power MOSFET	Ελεγχόμενο ON/OFF μέσω Τάσης (V_{GS})	Πολύ υψηλή f_{sw} (> 100 kHz), Αρνητικός συντελεστής θερμοκρασίας	DC/DC μετατροπείς, Τροφοδοτικά SMPS
IGBT	Ελεγχόμενο ON/OFF μέσω Τάσης (V_{GE})	Μεσαία/Υψηλή f_{sw} (20–50 kHz), Χαμηλή $V_{CE(sat)}$	Inverters, Ηλεκτροκίνηση, Βιομηχανικοί Οδηγοί

💡 **Ερωτήσεις Μελέτης Ενότητας 2:**

1. Συγκρίνετε τα Power MOSFET και IGBT ως προς την ταχύτητα μεταγωγής και την αντοχή σε υψηλές τάσεις.
2. Τι είναι ο χρόνος ανάκτησης φορτίου (t_{rr}) στη δίοδο ισχύος και γιατί είναι κρίσιμος;

ΕΝΟΤΗΤΑ 3 Ανορθωτές (Μετατροπείς AC/DC)

Οι ανορθωτές μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση (AC) του δικτύου σε συνεχή τάση (DC).

3.1 Μη Ελεγχόμενοι Ανορθωτές (Με Διόδους)

- **Μονοφασική Γέφυρα Graetz:** Μέση τιμή τάσης εξόδου: $V_{dc} = (2 \cdot V_m) / \pi \approx 0.9 \cdot V_{rms}$
- **Τριφασική Γέφυρα (6 παλμών):** Μέση τιμή τάσης εξόδου:
  $V_{dc} = (3 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{LL}) / \pi \approx 1.35 \cdot V_{LL}$

3.2 Ελεγχόμενοι Ανορθωτές (Με Θυρίστορ / SCR)

Με τη μεταβολή της γωνίας εναύσματος (α) των θυρίστορ, ρυθμίζεται η μέση τιμή της συνεχούς τάσης εξόδου:

$$V_{dc}(\alpha) = [(2 \cdot V_m) / \pi] \cdot \cos(\alpha) \quad \text{(Μονοφασική πλήρης γέφυρα σε συνεχή αγωγή)}$$

• Για 0° ≤ α < 90°: Λειτουργία ως **Ανορθωτής** (ροή ισχύος από AC προς DC).
• Για 90° < α < 180°: Λειτουργία ως **Αναγεννητικός Αντιστροφέας** (ροή ισχύος από DC προς AC).

3.3 Ρόλος της Διόδου Ελεύθερης Τροχιάς (Freewheeling Diode)

Σε επαγωγικά φορτία (R-L), η δίοδος ελεύθερης τροχιάς παρέχει δρόμο εκτόνωσης του ρεύματος του πηνίου όταν οι κύριοι διακόπτες σβήνουν, προστατεύοντας τη διάταξη και αποτρέποντας την εμφάνιση αρνητικής τάσης στην έξοδο.

> 💡 **Ερωτήσεις Μελέτης Ενότητας 3:**
> 1. Υπολογίστε τη V_{dc} μονοφασικού πλήρως ελεγχόμενου ανορθωτή για V_{rms} = 230V και γωνίες εναύσματος α = 30° και α = 60°.
> 2. Πώς επηρεάζει η γωνία α τον συντελεστή ισχύος (Power Factor) του συστήματος;

ΕΝΟΤΗΤΑ 4 Μετατροπείς Συνεχούς σε Συνεχές (DC/DC Converters)

Οι μετατροπείς DC/DC ρυθμίζουν τη στάθμη μιας συνεχούς τάσης χρησιμοποιώντας τεχνική Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (PWM) με κύκλο λειτουργίας (Duty Cycle): $D = t_{on} / T_s$ (όπου $0 \le D \le 1$).

Τύπος Μετατροπέα	Σχέση Τάσης Εξόδου (CCM)	Πολικότητα Εξόδου	Χαρακτηριστική Ιδιότητα
Υποβιβαστής (Buck)	$V_o = D \cdot V_{in}$	Ίδια με την είσοδο	$V_o \le V_{in}$, Συνεχές ρεύμα εξόδου
Ανυψωτής (Boost)	$V_o = V_{in} / (1 - D)$	Ίδια με την είσοδο	$V_o \ge V_{in}$, Συνεχές ρεύμα εισόδου
Υποβιβαστής-Ανυψωτής (Buck-Boost)	$V_o = -V_{in} \cdot [D / (1 - D)]$	Αναστροφή πολικότητας	V_o μπορεί να είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη της V_{in}

4.1 Περιοχές Λειτουργίας

- **Συνεχής Κατάσταση Αγωγής (CCM):** Το ρεύμα του πηνίου I_L παραμένει αυστηρά μεγαλύτερο του μηδενός καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου T_s.
- **Ασυνεχής Κατάσταση Αγωγής (DCM):** Το ρεύμα I_L μηδενίζεται για ένα τμήμα της περιόδου (συμβαίνει σε ελαφρά φορτία).

> 💡 **Ερωτήσεις Μελέτης Ενότητας 4:**
> 1. Για μετατροπέα Boost με V_{in} = 12V και D = 0.6, υπολογίστε την τάση εξόδου V_o.
> 2. Πώς υπολογίζεται η κρίσιμη επαγωγικότητα L_{min} για διατήρηση της λειτουργίας CCM;

ΕΝΟΤΗΤΑ 5 Αντιστροφείς (Μετατροπείς DC/AC - Inverters)

Οι αντιστροφείς μετατρέπουν τη συνεχές τάση (DC) σε εναλλασσόμενη (AC) ρυθμιζόμενης συχνότητας και πλάτους.

5.1 Τοπολογίες Αντιστροφέων

- **Μονοφασικός Πλήρους Γέφυρας (Full-Bridge):** 4 διακόπτες ισχύος. Η θεμελιώδης συνιστώσα τάσης εξόδου: $V_{1,rms} = (4 \cdot V_{dc}) / (\sqrt{2} \cdot \pi) \approx 0.9 \cdot V_{dc}$
- **Τριφασικός Αντιστροφέας:** 6 διακόπτες ισχύος σε 3 σκέλη (legs) με γωνιακή διαφορά φάσης 120°.

5.2 Τεχνική Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (Sinusoidal PWM)

Στη μεθοδολογία SPWM, συγκρίνεται ένα ημιτονοειδές σήμα αναφοράς (συχνότητας f_r) με ένα φέρον τριγωνικό σήμα υψηλής συχνότητας (f_c):

- Δείκτης Διαμόρφωσης Πλάτους: $m_a = V_{peak,ref} / V_{peak,tri}$ (Για γραμμική περιοχή: $0 \le m_a \le 1$)
- Δείκτης Διαμόρφωσης Συχνότητας: $m_f = f_c / f_r$ (Καθορίζει τη συχνότητα των αρμονικών)

💡 **Ερωτήσεις Μελέτης Ενότητας 5:**

1. Τι συμβαίνει όταν $m_a > 1$ (υπερδιαμόρφωση) στην έξοδο του αντιστροφέα;
2. Πώς επηρεάζει ο δείκτης m_f το μέγεθος των απαιτούμενων φίλτρων εξόδου;

ΕΝΟΤΗΤΑ 6 Ρυθμιστές Εναλλασσόμενης Τάσης (AC/AC Converters)

Οι ρυθμιστές AC/AC μετατρέπουν μια εναλλασσόμενη τάση σταθερού πλάτους και συχνότητας σε εναλλασσόμενη τάση μεταβλητού πλάτους (με ίδια συχνότητα) χωρίς τη χρήση ενδιάμεσου σταδίου DC.

6.1 Μέθοδοι Ελέγχου

- **Έλεγχος Γωνίας Φάσης (Phase Angle Control):** Τα αντιπαράλληλα θυρίστορ άγουν σε ένα τμήμα της κάθε ημιπεριόδου (γωνία α). Χρησιμοποιείται σε αυξομειωτές φωτισμού (Dimmers) και ομαλούς εκκινητές (Soft Starters) κινητήρων.

  $$V_{rms,out} = V_{rms,in} \cdot \sqrt{[1 - (\alpha/\pi) + (\sin(2\alpha) / 2\pi)]}$$

- **Έλεγχος Κύκλων / On-Off Control (Integral Cycle Control):** Η παροχή συνδέεται για n πλήρεις κύκλους και διακόπτεται για m κύκλους. Εφαρμόζεται σε θερμικά φορτία υψηλής αδράνειας με πολύ χαμηλή παραγωγή αρμονικών.

  $$V_{rms,out} = V_{rms,in} \cdot \sqrt{(n / (n + m))} = V_{rms,in} \cdot \sqrt{K}$$

💡 **Ερωτήσεις Μελέτης Ενότητας 6:**

1. Συγκρίνετε τον έλεγχο φάσης με τον έλεγχο κύκλων ως προς την παραγωγή αρμονικών στο δίκτυο.
2. Γιατί ο έλεγχος κύκλων δεν είναι κατάλληλος για τη ρύθμιση της έντασης φωτισμού;

ΕΝΟΤΗΤΑ 7 Σύγχρονες Εφαρμογές Ηλεκτρονικών Ισχύος

Τα Ηλεκτρονικά Ισχύος αποτελούν τον πυρήνα της σύγχρονης ενεργειακής μετάβασης και της βιομηχανίας:

- **Συστήματα UPS (Uninterruptible Power Supplies):**
  - *Off-line:* Ταχεία μεταγωγή σε μπαταρία μόνο σε διακοπή.
  - *On-line Double Conversion (AC/DC → DC/AC):* Μόνιμη τροφοδοσία φορτίου από τον αντιστροφέα, μηδενικός χρόνος μεταγωγής, πλήρης προστασία από διαταραχές.
- **Οδήγηση Ηλεκτρικών Κινητήρων (VFDs):** Έλεγχος λόγου V/f = σταθερό για διατήρηση της ροπής σε ασύγχρονους κινητήρες AC από χαμηλές έως ονομαστικές στροφές.
- **Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ):** Μετατροπείς Φωτοβολταϊκών με αλγόριθμους Εντοπισμού Μέγιστου Σημείου Ισχύος (MPPT - Maximum Power Point Tracking) και διασύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο.
- **Ηλεκτροκίνηση (Electric Vehicles):**
  - *On-Board Chargers (AC/DC):* Φόρτιση μπαταρίας από το δίκτυο.
  - *Traction Inverters (DC/AC):* Οδήγηση του κύριου ηλεκτροκινητήρα κίνησης.
  - *Ανακτητική Πέδηση (Regenerative Braking):* Επιστροφή ενέργειας στη μπαταρία κατά την επιβράδυνση.

💡 **Ερωτήσεις Μελέτης Ενότητας 7:**

1. Ποια είναι τα πλεονεκτήματα ενός On-line UPS διπλής μετατροπής σε σχέση με ένα Off-line UPS;
2. Πώς συμβάλλει ο αλγόριθμος MPPT στη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πάρκου;