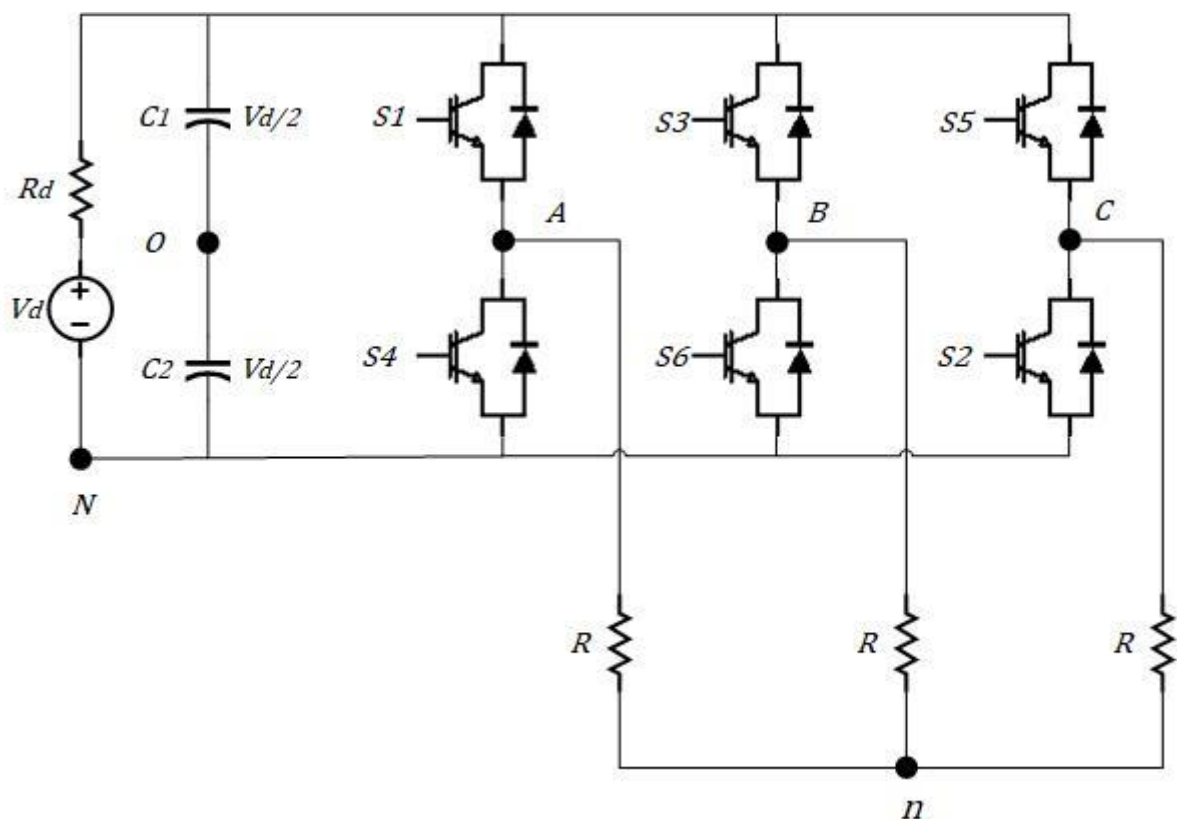




## Ηλεκτρονική Ισχύος 1

### Εργαστηριακή Άσκηση 3

### Αντιστροφείς (DC/AC Converters)



Σχήμα 1: Τριφασικός αντιστροφέας που τροφοδοτεί ωμικό φορτίο

#### Σκοπός της άσκησης

Η άσκηση αυτή έχει σκοπό την κατανόηση της λειτουργίας του τριφασικού αντιστροφέα δύο επιπέδων με ημιτονοειδή διαμόρφωση εύρους παλμών (SPWM) για τη μετατροπή σημάτων ισχύος από συνεχή σε εναλλασσόμενα.

#### Απαραίτητες γνώσεις

Βιβλίο: «Ηλεκτρονικά Ισχύος», Σ. Ν. Μανιάς, Εκδ. Συμεών, 2<sup>η</sup> έκδοση.

Κεφάλαιο 6 (εκτός 6.4-6.8).



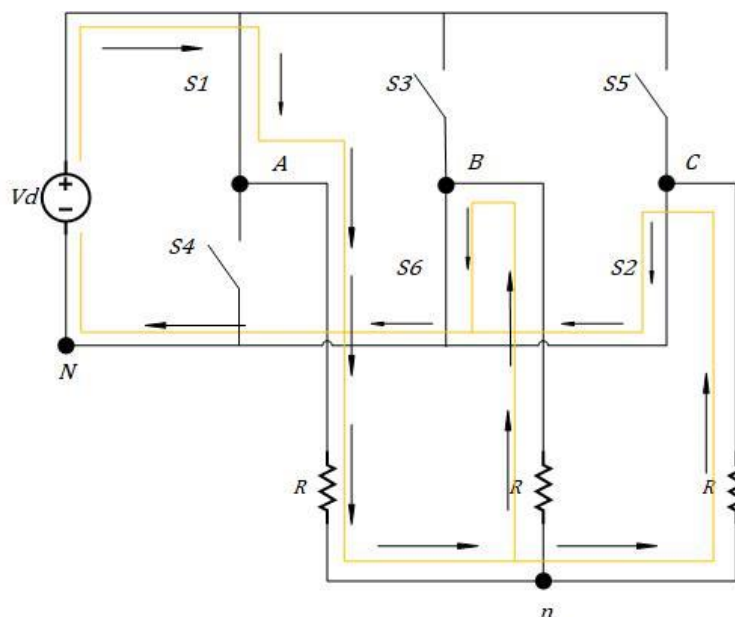
## Εισαγωγή

Ο αντιστροφέας αποτελεί την ηλεκτρονική διάταξη που επιτρέπει τη μετατροπή της συνεχούς τάσης (ή του συνεχούς ρεύματος) σε εναλλασσόμενη και πλήρως ελεγχόμενη ως προς τη συχνότητα και την ενεργό τιμή.

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται μία διάταξη τριφασικού αντιστροφέα σε συνδεσμολογία γέφυρας. Ο τριφασικός αντιστροφέας αποτελείται συνήθως από 6 ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία, τα οποία είναι συνήθως IGBTs ή MOSFETs σε συνδυασμό με αντιπαράλληλες διόδους.

Τα ημιαγωγικά στοιχεία λειτουργούν σαν διακόπτες, επιτρέποντας την εμφάνιση διαφορετικών - εναλλασσόμενων πολικών τάσεων. Για την ορθή λειτουργία του αντιστροφέα, δεν επιτρέπεται να άγουν ταυτόχρονα δύο ημιαγωγοί που βρίσκονται στην ίδια στήλη (βραχυκύκλωμα). Γενικά, σε αγωγή βρίσκονται ένας ή δύο ημιαγωγοί της πάνω σειράς και οι παράλληλοι ή ο παράλληλος αντίστοιχα ημιαγωγός της κάτω σειράς. Ωστόσο, σε ειδικές περιπτώσεις ενδέχεται να βρίσκονται σε αγωγή (ή αποκοπή) ταυτόχρονα και οι τρεις ημιαγωγοί της ίδιας σειράς, αν πρόκειται να εφαρμοστεί μηδενική τάση στο φορτίο.

Στο Σχήμα 2 δίνεται ένα παράδειγμα μίας τυπικής φάσης λειτουργίας του τριφασικού αντιστροφέα του Σχήματος 1. Από την πάνω σειρά άγει ο ημιαγωγός  $S_1$ , ενώ από την κάτω σειρά άγουν οι  $S_6, S_2$ . Η πολική τάση σε αυτή τη φάση λειτουργίας είναι  $V_{AB} = V_d$ . Σε μία άλλη φάση λειτουργίας που άγουν οι  $S_4, S_3, S_2$ , εμφανίζεται πολική τάση  $V_{AB} = -V_d$ .



Σχήμα 2: Παράδειγμα μιας κατάστασης λειτουργίας. Άγουν οι  $S_1, S_6, S_2$ .



### Αρμονικές συνιστώσες

Η ποιότητα της τάσης και του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα αξιολογείται με βάση το αρμονικό περιεχόμενο τους. Πέρα από τη θεμελιώδη αρμονική συνιστώσα (συνήθως στη συχνότητα των 50 ή 60 Hz), τα σήματα εξόδου περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα αρμονικών συνιστωσών σε διάφορες συχνότητες πέραν της θεμελιώδους. Είναι αναγκαίος ο υπολογισμός του πλάτους και των συχνοτήτων των αρμονικών συνιστωσών προκειμένου να σχεδιαστεί σωστά και οικονομικά το φίλτρο εξόδου, σκοπός του οποίου είναι να περικόπτει τις ανώτερες αρμονικές συνιστώσες.

Η ανάλυση του αρμονικού περιεχομένου ενός σήματος γίνεται με σειρά Fourier.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos(n\omega t - \theta_n)$$

όπου

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(n\omega t) d(\omega t)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(n\omega t) d(\omega t)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) d(\omega t)$$

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$\theta_n = \tan^{-1} \left( \frac{b_n}{a_n} \right)$$



## Μέρος Α

Για όλο το Μέρος Α και τον αντιστροφέα του Σχήματος 1, αγνοήστε την αντίσταση, που είναι εν σειρά με τη πηγή,  $R_d$  ( $R_d = 0$ ). Η είσοδος τροφοδοτείται από πηγή συνεχούς τάσης  $V_d$ .

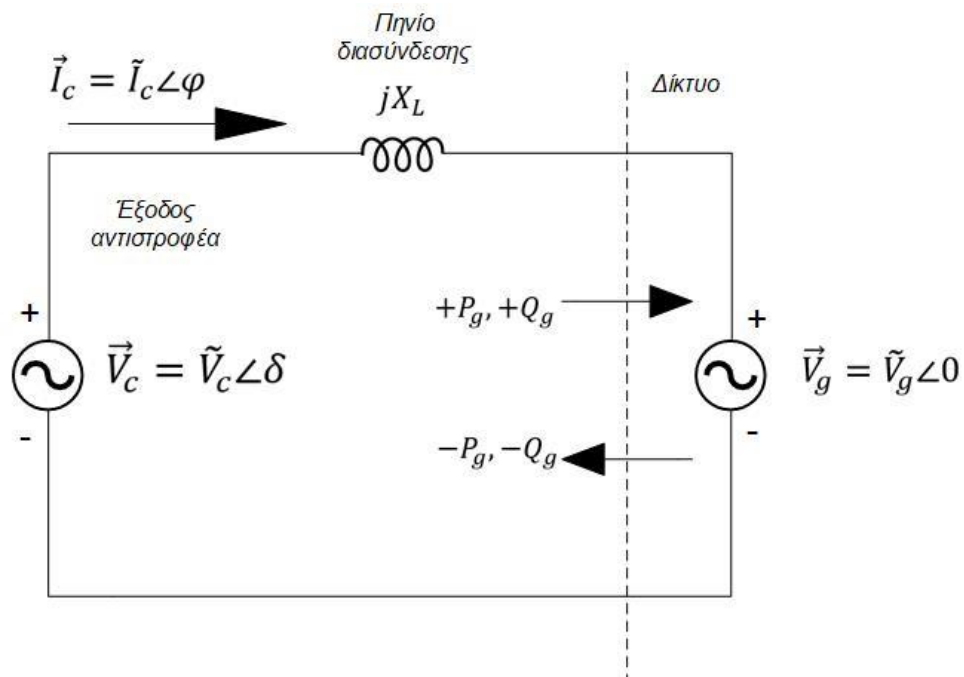
1. Θεωρήστε τον αντιστροφέα του Σχήματος 1, ο οποίος λειτουργεί με διαμόρφωση πλήρους τετραγωνικού παλμού ( $180^\circ$ ). Να σχεδιάσετε για μία περίοδο την κυματομορφή:
  - α) των σημάτων ελέγχου για το κάθε ένα από τα IGBTs,
  - β) των φασικών τάσεων  $V_{AO}, V_{BO}, V_{CO}$ ,
  - γ) της πολικής τάσης  $V_{AB}$ ,
  - δ) της φασικής τάσης  $V_{An}$ ,
  - ε) της διαφοράς δυναμικού του ουδετέρου κόμβου του φορτίου προς τη μεσαία λήψη ( $O$ ) της πλευράς συνεχούς ρεύματος (ΣΡ)  $V_{no}$ .

Να σημειώσετε στους άξονες τις κύριες τιμές του χρόνου και του πλάτους κάθε κυματομορφής.

2. Για έναν τριφασικό αντιστροφέα σε λειτουργία διαμόρφωσης πλήρους τετραγωνικού παλμού ( $180^\circ$ ), να υπολογίσετε τα πλάτη ( $c_n = \hat{V}_{ab,n}$ ) όλων των αρμονικών συνιστωσών της πολικής τάσης  $V_{ab}$ .
3. Θεωρήστε τον αντιστροφέα του Σχήματος 1, ο οποίος ελέγχεται με ημιτονοειδή διαμόρφωση εύρους παλμών, στη γραμμική περιοχή λειτουργίας ( $m_a < 1$ ). Αν η θεμελιώδης συχνότητα της τάσης εξόδου είναι  $50 \text{ Hz}$  και η συχνότητα φέροντος είναι  $1 \text{ kHz}$ , ποιος είναι ο αριθμός των παλμών που θα εμφανιστούν σε μία περίοδο στην κυματομορφή της φασικής τάσης εξόδου  $V_{AO}$ ;
4. Πώς η συχνότητα του φέροντος σήματος επηρεάζει τα φίλτρα που σε ορισμένες εφαρμογές χρησιμοποιούνται στην έξοδο του αντιστροφέα;
5. Θεωρήστε τριφασικό αντιστροφέα, συνδεδεμένο με το δίκτυο ΧΤ μέσω πηνίου αντίδρασης  $X_L$  και αμελητέας ωμικής αντίστασης. Εξάγετε τους τύπους που δίνουν τις τιμές της ενεργού και άεργου ισχύος  $P$  και  $Q$ , συναρτήσει της τάσης του δικτύου  $\tilde{V}_g$ , της θεμελιώδους τάσης εξόδου του αντιστροφέα  $\tilde{V}_c$ , της διαφοράς φάσης  $\delta$  των διανυσμάτων των δύο τάσεων και της αντίδρασης προσαρμογής  $X_L$  στη θεμελιώδη συχνότητα.

$$P = f(\tilde{V}_c, \tilde{V}_g, \delta, X_L)$$

$$Q = g(\tilde{V}_c, \tilde{V}_g, \delta, X_L)$$



Σχήμα 3: Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα

## Μέρος Β

Ζητείται να προσομοιώσετε τη λειτουργία του τριφασικού αντιστροφέα του Σχήματος 1 σε περιβάλλον PLECS. Η τεχνική παλμοδότησης είναι SPWM με συχνότητα φέροντος  $1 \text{ kHz}$  και ο συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους  $m_a = 0,8$ . Η θεμελιώδης συχνότητα του αντιστροφέα είναι  $50 \text{ Hz}$  και η τάση εισόδου είναι  $V_d = 400 \text{ V}$ . Θεωρήστε επίσης ότι  $R_d = 1 \text{ m}\Omega$  και  $C_1 = C_2 = 1 \mu\text{F}$ .

Για την περίπτωση ωμικού φορτίου  $R = 50 \Omega$ :

1. Παρουσιάστε την κυματομορφή της τάσης εξόδου μιας φάσης του αντιστροφέα, π.χ. της  $V_{AO}$ , χρησιμοποιώντας ως αναφορά τη μεσαία λήψη ( $O$ ) της πλευράς συνεχούς ρεύματος. Δείξτε παράλληλα το ρεύμα εξόδου της ίδιας φάσης του αντιστροφέα, π.χ.  $i_A$ . Είναι η τάση και το ρεύμα εξόδου συμφασικά (στη θεμελιώδη συχνότητα); Εξηγήστε γιατί στο ρεύμα φορτίου εμφανίζονται περισσότερα επίπεδα απ' ότι στην κυματομορφή της τάσης.
2. Παρουσιάστε σε γράφημα τις πολικές τάσεις εξόδου του αντιστροφέα. Χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα εργαλεία, υπολογίστε την ενεργό τιμή της πλήρους κυματομορφής και της θεμελιώδους αρμονικής της πολικής τάσης στην πλευρά του φορτίου.



3. Παρουσιάστε την κυματομορφή της διαφοράς δυναμικού μεταξύ του ουδετέρου του ωμικού φορτίου ( $n$ ) και της μεσαίας λήψης της πλευράς του συνεχούς ρεύματος ( $0$ ). Ποια είναι η μέση τιμή της τάσης  $V_{no}$ ;
4. Μεταβάλλετε το πλάτος των ημιτόνων αναφοράς, ώστε να ο αντιστροφέας να λειτουργεί με συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους  $m_a = 2,0$ . Ελέγξτε την φασική τάση  $V_{AO}$ . Πόσους παλμούς παρατηρείτε σε μία θεμελιώδη περίοδο σε κάθε περίπτωση; Πώς αλλάζει το φάσμα της πολικής τάσης στην περίπτωση αυτή;

**Για την περίπτωση ωμικού-επαγωγικού φορτίου  $RL = \{5 \Omega, 16 mH\}$**

5. Ορίστε τη συχνότητα φέροντος  $1 kHz$  και παρατηρήστε το φάσμα των αρμονικών του ρεύματος εξόδου ( $i_A$ ), χρησιμοποιώντας το Fourier Spectrum ή το Block Fourier Transform (αγνοήστε το μεταβατικό φαινόμενο). Γύρω από ποιες (κεντρικές) συχνότητες εμφανίζονται αρμονικές; Ορίστε την συχνότητα φέροντος στα  $5 kHz$ . Γιατί το ρεύμα παρουσιάζει μικρότερη παραμόρφωση στην περίπτωση αυτή;

**Για την περίπτωση σύνδεσης στο δίκτυο**

Θεωρήστε ότι ο αντιστροφέας είναι συνδεδεμένος στην AC πλευρά με το τριφασικό δίκτυο ΧΤ, μέσω αυτεπαγωγής  $L = 2,73 mH$ , η αντίσταση της οποίας θεωρείται αμελητέα. Στην DC πλευρά είναι συνδεδεμένη συστοιχία συσσωρευτών τάσεως  $720 V$  σε σειρά με την αντίσταση  $R_d = 1 m\Omega$  (αγνοήστε την στους θεωρητικούς υπολογισμούς, συμπεριλάβετε την μόνο στην προσομοίωση).

6. Όταν ο αντιστροφέας φορτίζει τη συστοιχία απορροφώντας ισχύ  $50 kW$  από το δίκτυο, να υπολογίσετε θεωρητικά τον συντελεστή  $m_a$  της SPWM και τη φασική γωνία  $\delta$  μεταξύ τάσης δικτύου και θεμελιώδους τάσης του αντιστροφέα. Η φόρτιση γίνεται υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Μπορείτε να χρησιμοποιήσετε τους τύπους που εξάγατε στο ερώτημα Α.5.
7. Αφού υπολογίσατε θεωρητικά τις παραπάνω τιμές, επιβεβαιώστε τις μέσω της προσομοίωσης για συχνότητα φέροντος  $f_c = 1 kHz$ . Υποδείξεις:
  - Θέστε στο φέρον σήμα αρχική φάση  $-\frac{1}{4f_c}$  (s), έτσι ώστε το τρίγωνο του φέροντος σήματος να ξεκινάει από το 0 και να γίνεται θετικό.
  - Σαν δίκτυο θεωρήστε τρεις συμμετρικές πηγές τάσης με πλάτος  $230 \cdot \sqrt{2} V$ . Κατά τη σύνδεση του αντιστροφέα με το δίκτυο, δώστε προσοχή στην αλληλουχία των φάσεων. Δηλαδή το ορθό σήμα αναφοράς κάθε φάσης του αντιστροφέα να είναι σε φάση με την αντίστοιχη φάση του δικτύου που συνδέεται.



- Προσθέστε ή αφαιρέστε σε όλα τα σήματα αναφοράς του αντιστροφέα τη γωνία  $\delta$  που υπολογίσατε θεωρητικά (σε rad).
  - Θέστε το πλάτος των σημάτων αναφοράς όσο το  $m_a$  που υπολογίσατε θεωρητικά.
  - α) Τυπώστε την τάση  $V_{AO}$  και το ρεύμα  $i_A$ . Χρησιμοποιώντας το Fourier Spectrum ή το Block Fourier Transform, εμφανίστε και συμπεριλάβετε στο κείμενο σας σε σχετική εικόνα το πλάτος της θεμελιώδους τάσης  $V_{AO}$  και του θεμελιώδους ρεύματος  $i_A$ , υπολογίστε και επιβεβαιώστε τις αντίστοιχες RMS τιμές που υπολογίσατε θεωρητικά. Επιβεβαιώστε ότι μεταφέρεται η σωστή τιμή ενεργού ισχύος.
  - β) Τέλος, επιβεβαιώστε τη διαφορά γωνίας  $\delta$  μεταξύ της φασικής τάσης εξόδου του αντιστροφέα  $V_{AO}$  και της αντίστοιχης φασικής τάσης του δικτύου. Τυπώστε σε κοινό διάγραμμα χρησιμοποιώντας Signal Multiplexer τις δύο προαναφερόμενες τάσεις. Χρησιμοποιείτε Fourier Spectrum και επιλέξτε από το Scope Parameters την εμφάνιση πλάτους και φάσης. Συμπεριλάβετε στην αναφορά σας φωτογραφία που να επιβεβαιώνει τη θεωρητική γωνία  $\delta$  που υπολογίσατε.
8. Ποιος είναι ο συντελεστής ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD) του ρεύματος στην AC πλευρά του αντιστροφέα;

- Η εργασία είναι ατομική.
- Απαντήστε συνοπτικά και επί της ουσίας στα ερωτήματα της άσκησης. Οι απαντήσεις σας πρέπει να είσαι σαφείς και οι διατυπώσεις σας ξεκάθαρες. Ορισμένα ερωτήματα απαιτούν αυτενέργεια και σύνθεση γνώσεων του αντικείμενου. Θα εκτιμηθεί, πέραν των σωστών απαντήσεων, και η όλη ανάλυση που παρουσιάζεται.
- Για την παράδοση της εργασίας, υποβάλλετε την έκθεση αναφοράς σε μορφή .pdf, ή .docx στο λογισμικό Turnitin, για έλεγχο αυθεντικότητας. Ενθαρρύνουμε τη συνεργασία μεταξύ των φοιτητών, όχι όμως την από κοινού σύνταξη εργασιών, οι οποίες είναι αυστηρά ατομικές. ΠΡΟΣΟΧΗ: Μην συμπεριλάβετε στην έκθεσή σας τις εκφωνήσεις των ερωτημάτων, καθώς αν αυτές εμφανίζονται αυτούσιες σε πολλές εργασίες αξιολογούνται από το λογισμικό ως λογοκλοπή.
- Ο μέγιστος αποδεκτός βαθμός ομοιότητας με πηγές είναι 20%. Βαθμοί ομοιότητας μεγαλύτεροι του 20% θα συνεκτιμηθούν στη βαθμολόγηση των εργασιών.
- Η προθεσμία υποβολής της έκθεσης αναφοράς είναι αυστηρά ως τις **4/6/2021**. Εκπρόθεσμες εργασίες ή εργασίες που δεν υποβάλλονται μέσω του παραπάνω συστήματος υποβολής δεν θα γίνουν δεκτές.