

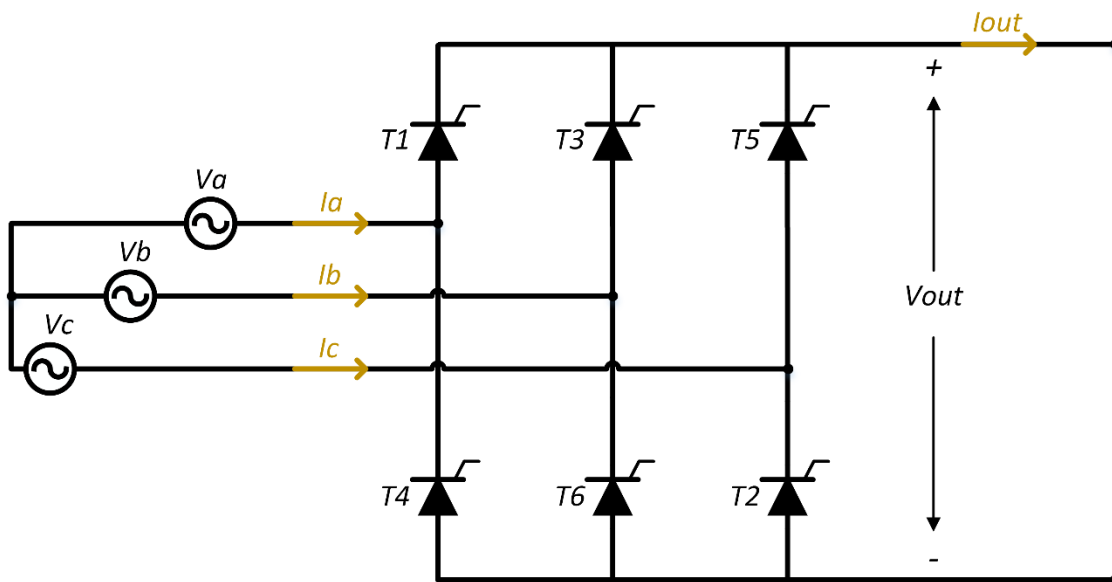


Ηλεκτρονική Ισχύος 1

Εργαστηριακή Άσκηση 2

Ελεγχόμενη Τριφασική Ανόρθωση

Πλήρους Γέφυρας



Σχήμα 1: Κύκλωμα τριφασικής ανόρθωσης πλήρους γέφυρας με θυρίστορ

Σκοπός της άσκησης

Η άσκηση αυτή έχει σκοπό την κατανόηση της λειτουργίας των ελεγχόμενων ανορθωτικών διατάξεων πλήρους γέφυρας στη μετατροπή εναλλασσόμενων σημάτων σε συνεχή.

Απαραίτητες βιβλιογραφία

«Ηλεκτρονικά Ισχύος», Σ. Ν. Μανιάς, Εκδ. Συμεών, 2η έκδοση, Κεφάλαιο 5.

«Εισαγωγή στα Ηλεκτρονικά Ισχύος», Mohan, Undeland, Robbins, John Wiley & Sons (μεταφρασμένο στα Ελληνικά: Εκδ. ΤΖΙΟΛΑΣ, 3η έκδοση 2010), Κεφάλαιο 6.

«How to select the right thyristor (SCR) for your application», Application note AN4608, ST Microelectronics (διαθέσιμο online).



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος

Εισαγωγή

Η τριφασική γέφυρα 6 παλμών είναι μια συνδεσμολογία που χρησιμοποιείται για να μετατρέψει ένα εναλλασσόμενο τριφασικό σήμα εισόδου σε συνεχές. Σχηματικά, μια τέτοια διάταξη αποτυπώνεται στο Σχήμα 1. Για το σκοπό αυτό, τα θυρίστορ της διάταξης πάντοτε άγουν σε ζεύγη. Ανάλογα με το ζεύγος των θυρίστορ που βρίσκονται σε αγωγή κάθε στιγμή, προκύπτει και η τελική τάση εξόδου του κυκλώματος.

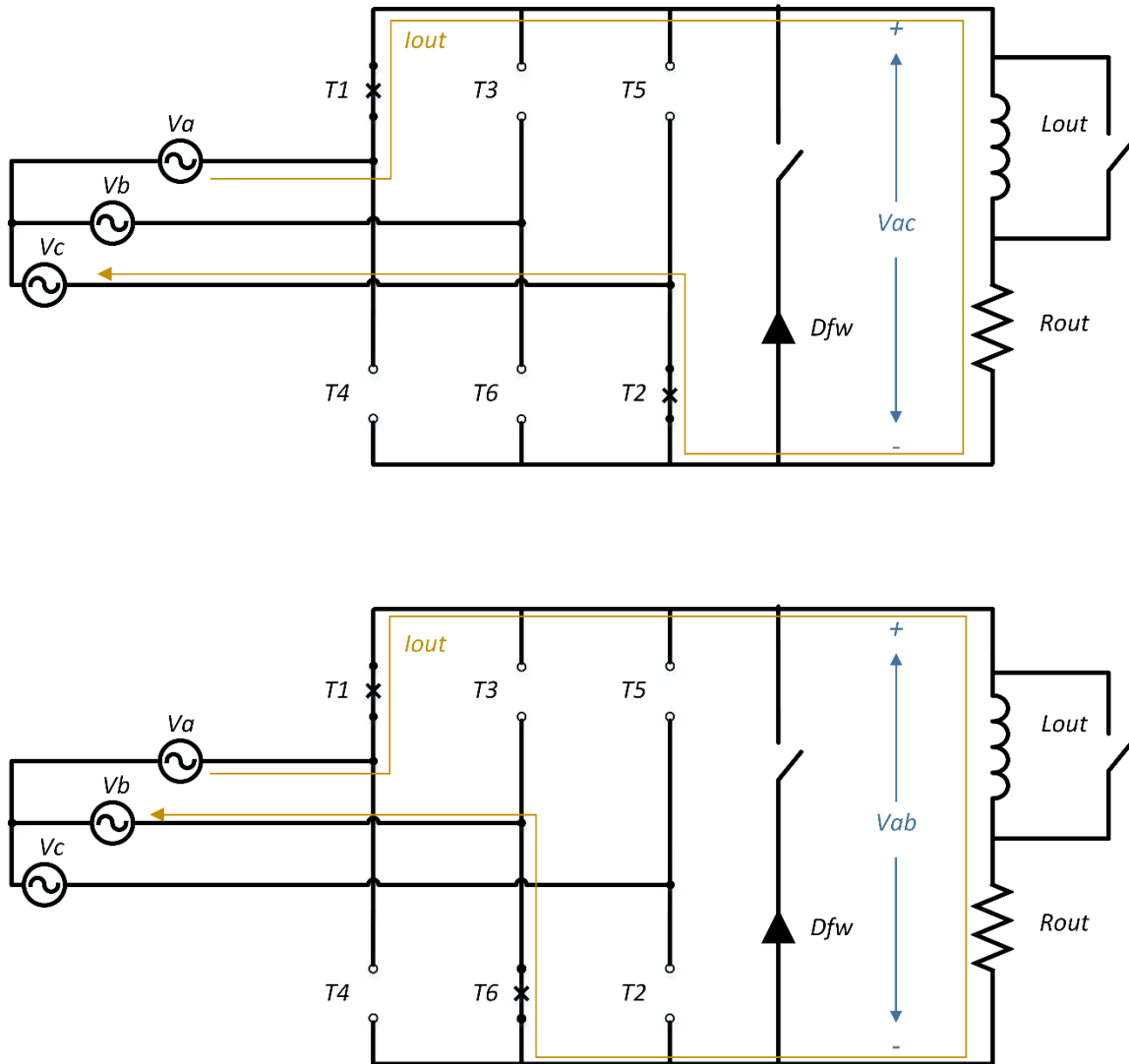
Κάθε θυρίστορ της πάνω ομάδας (T1, T3, T5) είναι θετικά πολωμένο όταν η αντίστοιχη φασική τάση που συνδέεται στην άνοδό του έχει μεγαλύτερη στιγμιαία τιμή από τις υπόλοιπες δύο. Αντίστοιχα, κάθε θυρίστορ της κάτω ομάδας (T4, T6, T2) είναι θετικά πολωμένο όταν η αντίστοιχη φασική τάση που συνδέεται στην κάθοδό του έχει μικρότερη στιγμιαία τιμή από τις άλλες δύο.

Στη διάρκεια μιας περιόδου, σε κάθε θυρίστορ δίνεται ένας παλμός έναυσης και αυτό άγει για 120° ($1/3$ της περιόδου). Οι παλμοί έναυσης των θυρίστορ της ίδιας ομάδας ((T1, T3, T5)/(T4, T6, T2)) έχουν διαφορά 120° μεταξύ τους.

Η γωνία έναυσης των θυρίστορ μετράται από την γωνία της «φυσικής» αγωγής της αντίστοιχης διόδου στο ίδιο κύκλωμα μη-ελεγχόμενης ανόρθωσης. Προσοχή: Η «φυσική» αγωγή δεν αντιστοιχεί σε μηδενισμό φασικής τάσης, αλλά στο μηδενισμό κάποιας πολικής τάσης, διαφορετικής για κάθε θυρίστορ (μπορείτε να εντοπίσετε ποιας σε κάθε περίπτωση;).

Στο Σχήμα 2, φαίνεται σχηματικά η ροή του ρεύματος και η τάση στην έξοδο της ανόρθωσης, για το διάστημα της περιόδου που άγει το θυρίστορ T1 (120°). Πιο συγκεκριμένα:

- ο όταν άγουν τα θυρίστορ T1 και T2, η τάση εξόδου ισούται με την πολική τάση V_{ac} .
- ο όταν άγουν τα θυρίστορ T1 και T6, η τάση εξόδου ισούται με την πολική τάση V_{ab} .



Σχήμα 2: Λειτουργία γέφυρας, όταν άγει το θυρίστορ T1

Ερωτήσεις/Ασκήσεις

Α. Γενικές ερωτήσεις

1. Αν υποθέσουμε πως η γέφυρα που απεικονίζεται στο Σχήμα 1 τροφοδοτείται από συμμετρικό τριφασικό δίκτυο, ποιες τάσεις ασκούνται στα άκρα του Th1, σε βάθος μιας περιόδου δικτύου;
2. Γιατί η τοπολογία που απεικονίζεται στο Σχήμα 1 ονομάζεται εξαπαλμική ή γέφυρα 6 παλμών;
3. Ποιες είναι οι απαραίτητες συνθήκες για να περάσει σε αγωγή ένα θυρίστορ; Ποια είναι η στοιχειώδης διαφορά στη λειτουργία του σε σχέση με μία δίοδο; Τι γνωρίζετε για το ρεύμα μανδάλωσης (latching current);



4. Ποιες είναι οι απαραίτητες συνθήκες για να περάσει σε σβέση ένα θυρίστορ;

Βρείτε το φύλλο αναφοράς (datasheet) του θυρίστορ BTW69-800RG της ST Microelectronics και απαντήστε στα ακόλουθα ερωτήματα (θα χρειαστεί να συμβουλευθείτε και τις οδηγίες εφαρμογής AN4608):

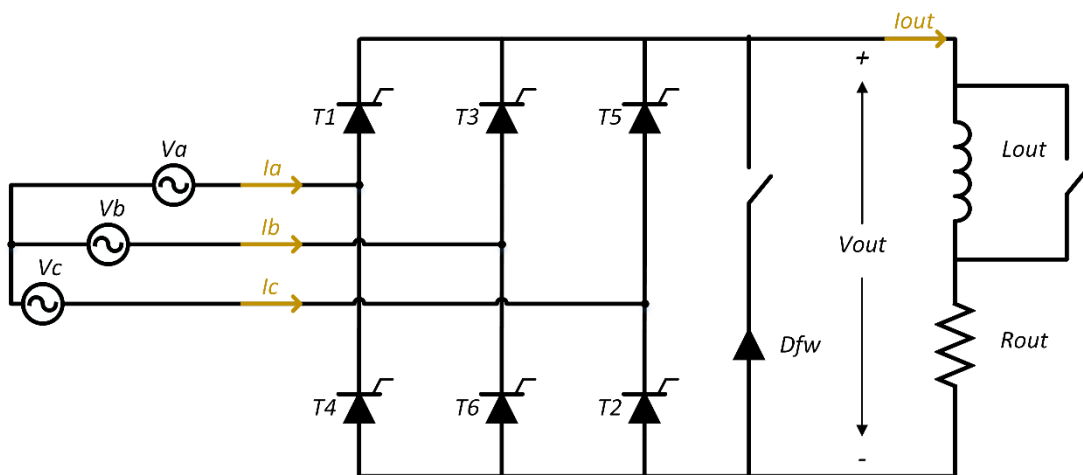
5. Ποια είναι η μέγιστη τάση που μπορεί να διαχειριστεί το θυρίστορ αυτό; Τι υποδεικνύουν οι παράμετροι UDRM/URRM;
6. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανόρθωση τάσης τριφασικού δικτύου διανομής με τα χαρακτηριστικά του ελληνικού δικτύου;
7. Εάν επιθυμούσαμε να οδηγήσουμε έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος, ονομαστικής ισχύος 10 kW, με ονομαστική τάση τυμπάνου 400 V, έχοντας ως τροφοδοσία το ελληνικό 3Φ δίκτυο, θεωρείτε ότι το θυρίστορ BTW69-800RG θα αποτελούσε μια λογική επιλογή; Αν όχι, γιατί; Ποιες είναι οι ελάχιστες ονομαστικές τιμές (τάση αποκοπής, ρεύμα RMS) που πρέπει να έχει ένα θυρίστορ σε αυτή την εφαρμογή;

Β. Τριφασική γέφυρα 6 παλμών

Β.1. Βασική λειτουργία κυκλώματος

Υλοποιήστε το κύκλωμα τριφασικής γέφυρας 6 παλμών, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3, σε περιβάλλον προσομοίωσης PLECS. Υπολογίστε τις τιμές που ζητούνται παρακάτω από την προσομοίωση, κάνοντας εμφανή στην αναφορά τον τρόπο υπολογισμού που χρησιμοποιήσατε για να απαντήσετε στα παρακάτω ερωτήματα. Οι τιμές των στοιχείων του κυκλώματος συνοψίζονται παρακάτω:

- Φασική τάση εισόδου (V_a, V_b, V_c) = 230 Vrms
- Συχνότητα δικτύου = 50 Hz
- Ωμική αντίσταση εξόδου (R_{out}) = 15 Ω
- Πηνίο εξόδου (L_{out}) = 2400 mH



Σχήμα 3: Κύκλωμα ελεγχόμενης τριφασικής ανορθωτικής γέφυρας 6 παλμών με παθητικό φορτίο



1. Για γωνίες $\alpha=0^\circ$, $\alpha=30^\circ$, $\alpha=60^\circ$, $\alpha=90^\circ$ να υπολογίσετε τα παρακάτω, για την περίπτωση που στην έξοδο υπάρχει συνδεδεμένη μόνο η ωμική αντίσταση (R_{out}), δηλαδή τα άκρα της αυτεπαγωγής L_{out} είναι βραχυκυκλωμένα:
 - a. Τη μέση και την ενεργό τιμή τάσης και ρεύματος εξόδου (\bar{V}_{out} , \tilde{V}_{out} , \bar{I}_{out} , \tilde{I}_{out}) της συνδεσμολογίας. Να παρουσιάσετε τα αποτελέσματα σε δύο γραφήματα (ένα για τις τάσεις και ένα για τα ρεύματα) ως προς τη γωνία α .
 - b. Για ποια γωνία έναυσης παρουσιάζεται η μέγιστη (μέση) τιμή του ρεύματος εξόδου; Ποιο είναι το εύρος ρύθμισης (δηλαδή ποιες τιμές μπορεί να λάβει η γωνία έναυσης ώστε να έχουμε κάποια απόκριση στην έξοδο)¹;
 - c. Την φαινόμενη, και την ενεργό ισχύ (S_{out} , P_{out}) στην έξοδο της γέφυρας.
 - d. Για ποιες γωνίες έναυσης α (εντός του δυνατού εύρους ρύθμισης) εμφανίζεται η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της ενεργού ισχύος εξόδου της συνδεσμολογίας;
 - e. Την φαινόμενη, ενεργό και (συνολική) άεργο ισχύ (S_{in} , P_{in} , N_{in}) στην είσοδο της γέφυρας.
 - f. Την άεργο ισχύ που οφείλεται στη φασική διαφορά μεταξύ της τάσης και του ρεύματος της βασικής αρμονικής (Q_1).
 - g. Να παρουσιάσετε τα αποτελέσματα των ερωτημάτων c, e, f σε ένα κοινό γράφημα (με μεταβλητή τη γωνία α). Τι παρατηρείτε;
 - h. Τον συντελεστή ισχύος (λ) και τον συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης του ρεύματος εισόδου ($THD_i\%$).
2. Επαναλάβετε το ερώτημα 1, για την περίπτωση που στην έξοδο υπάρχει ωμικο-επαγωγικό φορτίο, δηλαδή το πηνίο (L_{out}) συνδέεται σε σειρά με την ωμική αντίσταση (R_{out}) – τα άκρα του διακόπτη που έχει τοποθετηθεί παράλληλα στην αυτεπαγωγή ανοιχτοκυκλωμένα.
3. Παρουσιάστε σε διάγραμμα τις τιμές που υπολογίσατε για την μέση τιμή της τάσης εξόδου (\bar{V}_{out}), ως προς τη γωνία έναυσης α , συγκριτικά για την περίπτωση ύπαρξης μόνο ωμικού (ερώτημα 1) και την περίπτωση ωμικο-επαγωγικού φορτίου (ερώτημα 2). Επαναλάβετε για τις μεταβλητές \tilde{V}_{out} , \bar{I}_{out} , \tilde{I}_{out} , λ , $THD_i\%$ ². Να εξηγήσετε τις παρατηρήσεις σας.
4. Ας υποθέσουμε ότι ο ανορθωτής αυτός τροφοδοτεί ένα φορτίο ρεύματος σταθερής τιμής, π.χ. $\bar{I}_{out} = \tilde{I}_{out} = 20$ A. Για να προσομοιώσετε αυτό το φορτίο, μπορείτε να διατηρήσετε την τιμή της αυτεπαγωγής που δίνεται παραπάνω, θα πρέπει όμως να προσαρμόζετε την αντίσταση του φορτίου κατάλληλα, ανάλογα με την τιμή της γωνίας έναυσης α , για να διατηρήσετε το ρεύμα εξόδου σταθερό. Να παρουσιάσετε την Q_1 σε ένα διάγραμμα, συναρτήσει της P_{in} , για τις διάφορες τιμές της γωνίας α . Τι είδους σχέση συνδέει αυτά τα δύο μεγέθη σε αυτή την περίπτωση;

¹ Υπενθύμιση: Ορίζουμε την γωνία έναυσης με αναφορά τη «φυσική μετάβαση», δηλαδή τη μετάβαση κατά τη λειτουργία διόδου.

² Μπορείτε να απεικονίσετε κάποιες από τις μεταβλητές σε ένα ενιαίο διάγραμμα, εφόσον κρίνετε πως αυτό εξυπηρετεί στην κατανόηση της συσχέτισης των μεταβλητών με τη γωνία α .

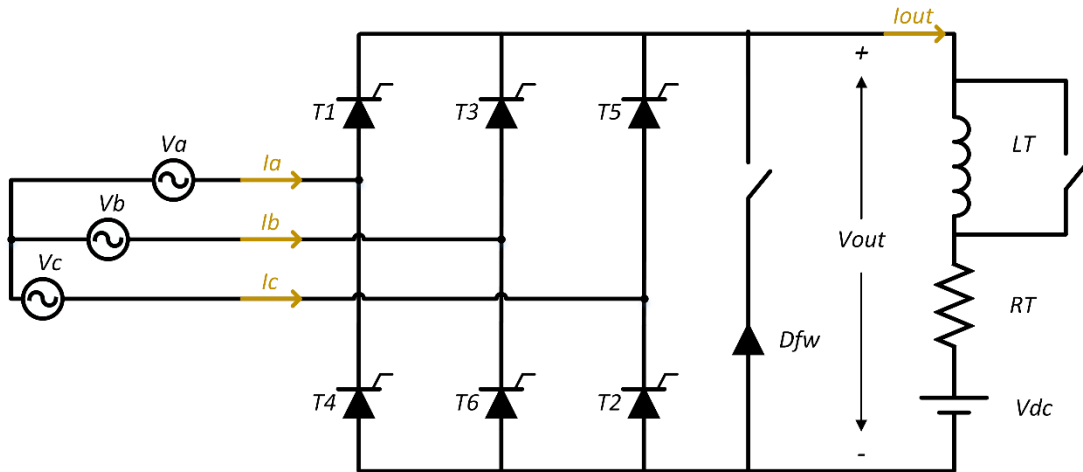


5. Ας υποθέσουμε ότι στο κύκλωμα συνδέεται μια δίοδος ελεύθερης διέλευσης D_{fw} , όπως στο Σχήμα 3. Για τι είδους φορτία και σε ποια περιοχή λειτουργίας θα είχε νόημα η ύπαρξη αυτού του κλάδου; Επιλέξτε ένα τέτοιο σημείο και δείξτε με κατάλληλες προσομοιώσεις τις διαφορές της λειτουργίας του κυκλώματος με ή χωρίς την ύπαρξη δίοδου σε κάποια μεταβλητή που να γίνονται εμφανείς αυτές οι διαφορές.

B.2. Επίδραση δικτύου και σύνδεση κινητήρα/γεννήτριας

- Μια προσέγγιση της επίδρασης του δικτύου στη συμπεριφορά του μετατροπέα μπορεί να προσομοιωθεί με την προσθήκη αυτεπαγωγής στην πλευρά του δικτύου. Τροποποιήστε κατάλληλα το κύκλωμα του ανορθωτή που φαίνεται στο Σχήμα 3, προσθέτοντας ένα πηνίο αυτεπαγωγής $L_s = 1 \text{ mH}$ ανά φάση στην είσοδο του κυκλώματος. Χρησιμοποιήστε και πάλι τις τιμές για τα R_{out} και L_{out} που δίνονται στην αρχή του μέρους B1. Η δίοδος D_{fw} σε αυτό το μέρος της άσκησης παραμένει ανοιχτοκυκλωμένη, ενώ το πηνίο L_{out} βρίσκεται συνδεδεμένο στο κύκλωμα.
 - Υπολογίστε την τιμή της γωνίας επικάλυψης μ και τη μέση τιμή της τάσης εξόδου \bar{V}_{out} για μια γωνία έναυσης $\alpha = 5^\circ$, όπου Z το τελευταίο ψηφίο του αριθμού μητρώου σας. Αν χρειαστεί, προσεγγίστε το ρεύμα φορτίου ως V_{da}/R_{out}^3 , αγνοώντας αρχικά την επίδραση της γωνίας επικάλυψης. Επιβεβαιώστε το αποτέλεσμα σας στην προσομοίωση.
 - Παρουσιάστε σε τρία γραφήματα τις κυματομορφές της τάσης εξόδου (\bar{V}_{out}), της τάσης στην είσοδο του μετατροπέα (V_{ab}) και του ρεύματος εισόδου (I_a), για την ίδια γωνία α , για την περίπτωση ύπαρξης και την περίπτωση απουσίας του πηνίου L_s στην είσοδο του κυκλώματος, κάνοντας εμφανή την επίδραση της γωνίας επικάλυψης.
- Μια προσέγγιση της ηλεκτρικής συμπεριφοράς ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος, είναι μια διάταξη R_T , L_T και πηγής συνεχούς τάσης (ΣΤ), όπου το R_T προσομοιώνει την αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη, το L_T την αυτεπαγωγή του και η πηγή ΣΤ την αντιηλεκτρεγερτική δύναμη του κινητήρα. Προσθέτοντας, λοιπόν, μία πηγή ΣΤ στην έξοδο του μετατροπέα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4 και ρυθμίζοντας την αντίσταση του τυμπάνου $R_T = 1 \Omega$, την αυτεπαγωγή του τυμπάνου $L_T = 25 \text{ mH}$ και την τάση της αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης στα 400 V, έχουμε ένα πολύ απλό ηλεκτρικό μοντέλο, για μία συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας. Η δίοδος D_{fw} σε αυτό το μέρος της άσκησης παραμένει ανοιχτοκυκλωμένη. Επίσης, σε αυτό το μέρος της άσκησης δε χρειάζεται να λάβετε υπόψη την επίδραση του δικτύου, οπότε μπορείτε να αφαιρέσετε ή να βραχυκυκλώσετε την αυτεπαγωγή του δικτύου L_s .

³ $V_{da} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cos \alpha$



Σχήμα 4: Τριφασική ανορθωτική γέφυρα 6 παλμών, με φορτίο ηλεκτρικό μοντέλο μηχανής ΣΡ για μια συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας

- Αν ο κινητήρας στην κατάσταση αυτή αποδίδει στον άξονα ισχύ 15 kW , βρείτε τη γωνία α γι' αυτή την κατάσταση λειτουργίας. Η ισχύς στον άξονα (ή ηλεκτρομαγνητική ισχύς) δίνεται από το γινόμενο (της μέσης τιμής) του ρεύματος με την αντιηλεκτρεγερτική δύναμη, αγνοώντας τις λοιπές απώλειες (πλην των απωλειών χαλκού του τυμπάνου, οι οποίες εκφράζονται από την αντίσταση R_T). Πόσες είναι οι απώλειες χαλκού του τυμπάνου στην κατάσταση αυτή; Εξηγήστε συνοπτικά τη συλλογιστική υπολογισμού των παραμέτρων αυτών. Θεωρήστε το ρεύμα τυμπάνου της μηχανής ΣΡ πλήρως εξομαλυμένο.
- Υλοποιήστε την παραπάνω κατάσταση λειτουργίας στην προσομοίωση, παρουσιάστε τις κυματομορφές ρεύματος και τάσης εξόδου (V_{out}, I_{out}) του κυκλώματος και σχολιάστε τα αποτελέσματα.
- Έστω ότι η φορά περιστροφής της ηλεκτρικής μηχανής αντιστρέφεται (άρα αντιστρέφεται και η φορά της αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης $U_{backEMF}$), ενώ ταυτόχρονα αντιστρέφεται και η λειτουργία της σε γεννήτρια. Σε αυτή την κατάσταση η γεννήτρια ΣΡ, δέχεται 15 kW μηχανικής ισχύος στον άξονά της. Για την κατάσταση λειτουργίας γεννήτριας με $P_{\alpha\xi} = 15 \text{ kW}$, $U_{backEMF} = 400 \text{ V}$, βρείτε τη γωνία έναυσης α , ώστε η γεννήτρια ΣΡ να τροφοδοτεί με ισχύ το δίκτυο. Πόση είναι η ηλεκτρική ισχύς που φτάνει στο δίκτυο (θεωρώντας το μετατροπέα ιδανικό); Εξηγήστε συνοπτικά τη συλλογιστική υπολογισμού των παραμέτρων αυτών.
- Υλοποιήστε την παραπάνω κατάσταση λειτουργίας στην προσομοίωση, παρουσιάστε τις κυματομορφές ρεύματος και τάσης εξόδου (V_{out}, I_{out}) του κυκλώματος και σχολιάστε τα αποτελέσματα.



- 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 αντικειμένου. 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 19/5/2021. Εκπρόθεσμες εργασίες ή εργασίες που δεν υποβάλλονται μέσω του παραπάνω συστήματος υποβολής δεν θα γίνουν δεκτές.