



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΥΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΑΜΑΞΟΣΤΟΙΧΙΩΝ, ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ
ΙΣΧΥΟΣ**

Διπλωματική Εργασία

Ιωάννης Χ. Γραμματικάκης-Κονταργύρης

Επιβλέπων: Αντωνόπουλος Αντώνης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 25 Σεπτεμβρίου 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΥΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΑΜΑΞΟΣΤΟΙΧΙΩΝ, ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ
ΙΣΧΥΟΣ**

Διπλωματική Εργασία

Ιωάννης Χ. Γραμματικάκης-Κονταργύρης

Επιβλέπων: Αντωνόπουλος Αντώνης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 25^η Σεπτεμβρίου 2020.

.....
Α. Αντωνόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Σ. Παπαθανασίου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Α. Κλαδάς
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2020

.....

Γραμματικάκης-Κονταργύρης Χ. Ιωάννης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

Copyright © Γραμματικάκης-Κονταργύρης Χ. Ιωάννης, 2020.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματός της, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η ηλεκτροκίνηση αποτελεί ένα σημαντικό πεδίο έρευνας και εφαρμογών, με σημαντικούς επιμέρους στόχους στα πλαίσια του μετασχηματισμού του ενεργειακού μείγματος του πλανήτη, και την μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Σε αυτά τα πλαίσια, είναι σημαντικός ο ρόλος των ηλεκτρικών αμαξοστοιχειών. Οι σχετικές εφαρμογές, έχουν ξεκινήσει ήδη από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, όμως η βελτιστοποίηση και επέκτασή τους, παρουσιάζει προκλήσεις. Μια από αυτές είναι και ισχυρά ρεύματα αρνητικής ακολουθίας, που προκαλεί η ασύμμετρη φόρτιση του δικτύου. Η πηγή αυτής της ασυμμετρίας εδράζεται στην αρχιτεκτονική του δικτύου τροφοδοσίας των αμαξοστοιχιών. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, μελετήθηκε η καταστολή των συγκεκριμένων ρευμάτων, για δύο διαφορετικές διατάξεις του υποσταθμού τροφοδοσίας.

Στο **Κεφάλαιο 1** της εργασίας παρουσιάζεται αυτή η αρχιτεκτονική και οι λόγοι που οδήγησαν σε αυτήν. Συγκεκριμένα απαντάται το γιατί επιλέχθηκε οι αμαξοστοιχίες να αποτελούν τεράστια μονοφασικά φορτία, τροφοδοτούμενα από μια φάση του τριφασικού δικτύου. Παρατίθενται τα επιμέρους στοιχεία του συστήματος τροφοδοσίας (υποσταθμός, παντογράφος, διατάξεις αντιστάθμισης), ενώ παρουσιάζονται στο σύνολο τους, τα προβλήματα ισχύος των ηλεκτρικών αμαξοστοιχιών, πέρα από τα ρεύματα αρνητικής ακολουθίας.

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται συνοπτικά, τα κυριότερα ηλεκτρικά στοιχεία του δικτύου τροφοδοσίας των διατάξεων που θα εξετάσουμε, ο Μετασχηματιστής ανοιχτού τριγώνου, ο Μετασχηματιστής Τριγώνου-Αστέρα και ο μονοφασικός αντιστροφέας.

Στο **Κεφάλαιο 3** αναλύεται η λειτουργία του υποσταθμού τροφοδοσίας, και της διάταξης αντιστάθμισης. Για τις δύο περιπτώσεις των διαφορετικών μετασχηματιστών, εξάγονται, αρχικά για καθαρά ωμικό φορτίο, τα διανυσματικά διαγράμματα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, συμπεριλαμβανομένων των συνιστωσών των ρευμάτων αντιστάθμισης, και παρουσιάζονται οι μαθηματικές εκφράσεις των συνιστωσών αυτών, για κάθε περιοχή λειτουργίας του συστήματος. Οι σχετικές εκφράσεις γενικεύονται για τις διάφορες τιμές του συντελεστή ισχύος του φορτίου.

Στο **Κεφάλαιο 4** προσομοιώνεται, με βάση τους υπολογισμούς του προηγούμενου κεφαλαίου, το σύστημα, του υποσταθμού με το φορτίο και τη διάταξη αντιστάθμισης, σε περιβάλλον Simulink για τους δύο διαφορετικούς μετασχηματιστές. Παρουσιάζονται οι κυματομορφές των ρευμάτων του δικτύου πριν και μετά την αντιστάθμιση, καθώς και των ρευμάτων και τάσεων του αντιστροφέα. Δίνονται σχετικά παραδείγματα για όλες τις περιοχές λειτουργίας του συστήματος.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται, τα διαγράμματα των ρευμάτων του αντιστροφέα για τις διάφορες τιμές του συντελεστή ισχύος του φορτίου, για τους δύο διαφορετικούς μετασχηματιστές. Προσδιορίζονται οι μέγιστες τιμές των ρευμάτων του αντιστροφέα για τις διάφορες αυτές τιμές.

Στο **Κεφάλαιο 6** καταγράφονται τα συμπεράσματα της εργασίας, καθώς και σκέψεις μελλοντικού εμπλουτισμού της.

Λέξεις-κλειδιά: Ηλεκτρικές αμαξοστοιχίες, ηλεκτρική κίνηση, αντιστροφέας, μετασχηματιστής ανοιχτού τριγώνου, μετασχηματιστής τρίγωνο-αστέρα, αντιστάθμιση ισχύος

Abstract

Electromobility is an important field of research with significant applications in real life. Specific goals have been set for this field, as part the energy mixture transformation and the decline of CO₂ emissions. Those goals also involve electrical locomotives. Their applications have started since the beginnings of the 20th century, but their optimization and expansion of their use pose new challenges. One of those is the large amount of negative-sequence currents that is caused by the asymmetrical load of the grid. The source of this asymmetry is found on the grid architecture. In the context of this diploma thesis, the suppression of these negative-sequence currents is examined, for two different structures of the power feed substation.

In **Chapter 1** the grid architecture is presented as well as the reason, that led engineers to choose it. Particularly, the reasons of why the locomotives are large single-phase loads, even though they are powered by a three phase grid. The componetnts of power feeding system are presented (substation, pantograph, compensation devices) as well as the power quality problems in the function of electrical locomotives despite the negative-sequence currents.

In **Chapter 2**, the main electrical components of the power feeding system are presented. Those are the V-v transformer, Y-Δ transformer and the single-phase inverter.

In **Chapter 3**, the function of the substation and the compenstation circuit is described. First, we examine the function for loads with power factor equal with 1. For each of the two transformers, the vector diagramms for the primary and secondary side are presented, including the compensation currents. The mathematical equations for those currents in every operating area are shown. The results are generalized for loads with power factor different than 1.

In **Chapter 4** the system is simulated with the help of Matlab-Simulink Software, according to the previous' chapter computations, for the two differnet transformers. The grid current waveforms are presented before and after the compensation, as well as the inverter's voltage and current waveforms. Examples for every operating area are given.

In **Chapter 5** the inverter's current diagramms are being presented, for the differnet values of the load's power factor, for the two different transformers. The currents' maximum values are found for each different power factor.

In **Chapter 6** the conclusions of the diploma thesis, are presented, as well as thoughts for future enrichment of the study.

Keywords: Electrical locomotives, electromobility, inverter, V-v transformer, Star-Delta transformer, electrical power compensation

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Αντωνόπουλο Αντώνη, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα πραγματικά ενδιαφέρον θέμα, για την προσωπική του προσπάθεια, τη συνεχή βοήθεια, επιστημονική καθοδήγηση, αρμονική συνεργασία που μου προσέφερε καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Με το κλείσιμο, του κύκλου των προπτυχιακών μου σπουδών, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για τη δυνατότητα που έδωσε να φτάσω μέχρι εδώ με κόπους και θυσίες, όπως επίσης στους φίλους μου που ήταν στο πλευρό μου όλα αυτά τα χρόνια, συνοδοιπόροι στο ταξίδι στη γνώση, για τη συνεχή στήριξή τους.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Δίκτυα τροφοδότησης ηλεκτρικών τρένων και προβλήματα ποιότητας ισχύος.....	11
1.1 Εισαγωγή.....	11
1.2 Αρχιτεκτονική δικτύου τροφοδοσίας	11
1.2.1 Ομοφασικό σύστημα τροφοδοσίας ^[6]	13
1.3 Προβλήματα ποιότητας ισχύος στις ηλεκτρικές αμαξοστοιχίες	14
1.3.1 Ρεύματα Αρνητικής Ακολουθίας.....	14
1.3.2 Αρμονικές συνιστώσες ρεύματος	16
1.4 Κίνδυνοι που απορρέουν από τα προβλήματα ποιότητας ισχύος.....	16
1.5 Μέθοδος προσέγγισης του προβλήματος.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Διατάξεις σε συστήματα τροφοδοσίας ηλεκτρικών αμαξοστοιχιών	18
2.1 Μετασχηματιστής Ανοιχτού τριγώνου (V-v).....	18
2.2 Μετασχηματιστής Τρίγωνο-Αστέρας (Δ-Y)	19
2.3 Μονοφασικός αντιστροφέας	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ανάλυση λειτουργίας υποσταθμού τροφοδοσίας με διάταξη αντιστάθμισης	21
3.1 Τοπολογία μετασχηματιστή ανοιχτού τριγώνου	22
3.1.1 Σύστημα χωρίς αντιστάθμιση	22
3.1.2 Απαιτήσεις λειτουργίας μετατροπέα	23
3.1.3 Γενίκευση μεθόδου για εύρος Συντελεστή Ισχύος φορτίου: 0,8-1 επαγωγικό ($\phi_{Load}=0-36,9$)	28
3.1.4 Επιστροφή ισχύος στο δίκτυο.....	31
3.2 Τοπολογία μετασχηματιστή Αστέρα-Τρίγωνο (Δ-Y)	34
3.2.1 Σύστημα χωρίς αντιστάθμιση	34
3.2.2 Απαιτήσεις λειτουργίας του μετατροπέα.....	36
3.2.3 Γενίκευση μεθόδου για εύρος Συντελεστή Ισχύος φορτίου: 0,8-1 επαγωγικό ($\phi_{Load}=0-36,9$)	40
3.2.4 Επιστροφή ισχύος στο δίκτυο.....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Προσομοίωση του συστήματος σε περιβάλλον Simulink	47
4.1 Εισαγωγή.....	47
4.2 Προσομοίωση για το μετασχηματιστή ανοιχτού τριγώνου	47
4.2.1 Κύκλωμα προσομοίωσης	47
4.2.2 Παραδείγματα	49
4.3 Προσομοίωση για το μετασχηματιστή αστέρα-τρίγωνο	61
4.3.1 Κύκλωμα προσομοίωσης	61
4.3.2 Παραδείγματα	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Τιμές ρευμάτων αντιστροφέν σε όλες τις περιοχές λειτουργίας	74
5.1 Τιμές ρευμάτων αντιστροφέν για τον μετασχηματιστή ανοιχτού τριγώνου	74
5.1.1 Συντελεστής ισχύος 1 ($\phi_{Load}=0^\circ$).....	75
5.1.2 Συντελεστής ισχύος 0.966 ($\phi_{Load}=15^\circ$)	76
5.1.3 Συντελεστής ισχύος 0.866 ($\phi_{Load}=30^\circ$)	77

5.1.4 Συντελεστής ισχύος 0.8 ($\phi_{Load}=36.9^\circ$)	78
5.2 Τιμές ρευμάτων αντιστροφών για τον μετασχηματιστή Τρίγωνο-Αστέρα.	79
5.2.1 Συντελεστής ισχύος 1 ($\phi_{Load}=0^\circ$)	80
5.2.2 Συντελεστής ισχύος 0.966 ($\phi_{Load}=15^\circ$)	81
5.2.3 Συντελεστής ισχύος 0.866 ($\phi_{Load}=30^\circ$)	82
5.2.4 Συντελεστής ισχύος 0.799 ($\phi_{Load}=36.9^\circ$)	83
5.3 Παρατηρήσεις	84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Παρατηρήσεις, εμπλουτισμός της μελέτης.....	85
6.1 Παρατηρήσεις	85
6.2 Εμπλουτισμός της μελέτης	85
Βιβλιογραφία	86
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	87
Π.1 Υπολογισμός ρευμάτων αντιστάθμισης για δοσμένη φόρτιση στο δευτερεύον και έλεγχος της προσομοίωσης για τον μετασχηματιστή ανοιχτού τριγώνου	87
Π.2 Δημιουργία επιφανειών ρευμάτων αντιστάθμισης και ρευμάτων δευτερεύοντος του μετασχηματιστή σε όλες τις περιοχές λειτουργίας.....	89
Π.3 Υπολογισμός ρευμάτων αντιστάθμισης για δοσμένη φόρτιση στο δευτερεύον και έλεγχος της προσομοίωσης για τον μετασχηματιστή τρίγωνο αστέρα	91
Π.4 Δημιουργία επιφανειών ρευμάτων αντιστάθμισης και ρευμάτων δευτερεύοντος του μετασχηματιστή σε όλες τις περιοχές λειτουργίας για το μετασχηματιστή τρίγωνο-αστέρα	93

Δίκτυα τροφοδότησης ηλεκτρικών αμαξοστοιχιών και προβλήματα ποιότητας ισχύος

1.1 Εισαγωγή

Οι ηλεκτρικές αμαξοστοιχίες, χρονολογούν τη λειτουργία τους ήδη από τις αρχές του προηγούμενου αιώνα^[1].

Η τεχνολογία τους έχει εξελιχθεί πολύ μέσα στα χρόνια. Οι ταχύτητες που μπορεί να καταγράψουν, αγγίζουν στις μέρες μας μέχρι και τα 268 μίλια την ώρα^[2] (Shanghai maglev train) . Οι λόγοι όμως που εξ αρχής έκαναν τον άνθρωπο να στραφεί στην ηλεκτρική κίνηση παραμένουν επίκαιροι. Η μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μέσω των εκπομπών CO₂ είναι ένας από τους σημαντικότερους, και για την επίτευξή του, ρόλο έχουν και τα ηλεκτρικά τρένα.

Λόγω αυτού οι στόχοι για εξάπλωση της ηλεκτροκίνησης είναι υψηλοί. Στη χώρα μας για παράδειγμα, πρόσφατα θεσπίστηκε στόχος, μέχρι το 2030, ένα στα τρία νέα οχήματα που τίθεται σε κυκλοφορία, να είναι ηλεκτρικό. Ταυτόχρονα, σχεδιάζονται και υλοποιούνται πολιτικές στήριξης της ηλεκτροκίνησης. Τέτοιες είναι η επιδότηση αγοράς ηλεκτρικών οχημάτων, η απαλλαγή τους από τέλη, η εξάπλωση σταθμών τροφοδοσίας τους ανά τη χώρα, η απαλλαγή τους από μέτρα περιορισμού κυκλοφορίας στο κέντρο της Αθήνας κ.α.^[3]

Παράλληλα ξεδιπλώνονται και διαφορετικές ιδέες για τους ρόλους που μπορεί να παίξουν τα ηλεκτρικά μέσα μεταφοράς, στη μορφή που φαίνονται να παίρνουν τα ηλεκτρικά δίκτυα του μέλλοντος. Η γενίκευση της χρήσης των ΑΠΕ, έχει φέρει νέες προκλήσεις για την ηλεκτροδότηση και τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να παίξουν το δικό τους ρόλο για την επίλυση τους. Για παράδειγμα, η χρήση τους σαν διέξοδο αποθήκευσης ενέργειας, κατά τις μεσημεριανές ώρες, όπου τα φωτοβολταϊκά καταγράφουν την αιχμή της παραγωγής τους, χωρίς αυτή να είναι άμεσα χρειαζόμενη.

1.2 Αρχιτεκτονική δικτύου τροφοδοσίας

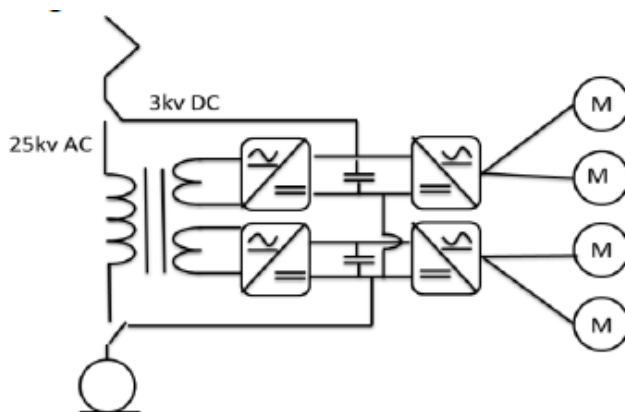
Οι ηλεκτρικές αμαξοστοιχίες αποτελούν μονοφασικά φορτία σημαντικής ισχύος (5-20 MW)^[1]. Η τροφοδοσία τους βασίζεται στην επαφή της γραμμής τροφοδοσίας με τον παντογράφο, είτε η γραμμή βρίσκεται στον αέρα ή στο έδαφος. Για τη διαλειτουργικότητα^[1] τους μεταξύ κρατών, που μπορεί να έχουν διαφορετικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά στο δίκτυο τους, αλλά και για τη μεταπήδηση τους ,από το ένα δίκτυο στο άλλο σε κράτη με δύο διαφορετικά συστήματα τροφοδοσίας (Γαλλία-Γερμανία, Δανία-Σουηδία), βασίζουν την τροφοδοσία των κινητήρων τους στο συνδυασμό μετασχηματιστών και μετατροπέων^[4].

Οι αμαξοστοιχίες τροφοδοτούνται από το δίκτυο μέσης τάσης (συνήθως) ή κοντινά σε αυτό επίπεδα τάσης. Η τροφοδοσία τους είναι μονοφασική εναλλασσόμενη τάση, τροφοδοτούνται δηλαδή από μια φάση του δικτύου, παρόλο που στο εσωτερικό τους φέρουν τριφασικό κινητήρα. Τα πλεονεκτήματα της μονοφασικής τροφοδοσίας είναι πρώτον ότι η αμαξοστοιχία «ακολουθείται» από ένα (αν η ράγα χρησιμοποιείται σαν ουδέτερος) ή δυο καλώδια και όχι τρία ή τέσσερα που θα απαιτούσε το τριφασικό. Αυτό έχει σαν συνέπεια να χρειάζεται λιγότερους παντογράφους για τη σύνδεση με τα καλώδια, οι οποίοι αποτελούν μηχανικά μέρη που απαιτούν συντήρηση και είναι καλό να αποφεύγονται. Ταυτόχρονα παρουσιάζουν (οι παντογράφοι) και μειονεκτήματα από ηλεκτρικής σκοπιάς εισάγοντας πιθανότητα για ηλεκτρικά τόξα μεταξύ αυτών και των γραμμών.



Εικόνα 1.1: Παντογράφος^[5]

Στη συνέχεια, η εναλλασσόμενη τάση, ανορθώνεται στο εσωτερικό της αμαξοστοιχίας και τροφοδοτεί ένα μετατροπέα. Αυτός με τη σειρά του μετατρέπει τη συνεχή τάση σε τριφασική εναλλασσόμενη κατάλληλης συχνότητας και πλάτους, ούτως ώστε να οδηγήσει τον τριφασικό κινητήρα της αμαξοστοιχίας. Η επιλογή τριφασικού κινητήρα, γίνεται για λόγους σταθερής ροπής και καλύτερης σχέσης ισχύος-όγκου του κινητήρα.

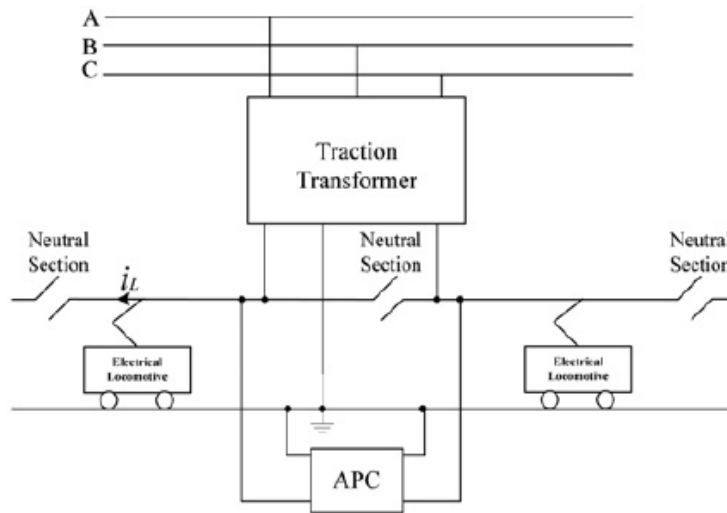


Εικόνα 1.2: Δομή συστήματος τροφοδοσίας του κινητήρα^[1]

1.2.1 Παραδοσιακό σύστημα τροφοδοσίας^[6]

Η πιο συνηθισμένη δομή του συστήματος τροφοδοσίας φαίνεται στην εικόνα 1.3. Σε αυτή την περίπτωση ο μετασχηματιστής του υποσταθμού τροφοδοσίας, χρησιμοποιείται για να μετατρέψει την τριφασική παροχή του δικτύου σε δυο μονοφασικές γραμμές που τροφοδοτούνε δύο γειτονικούς τομείς του συστήματος μας. Οι τομείς εκτείνονται έως και 30km και χωρίζονται μεταξύ τους με ουδέτερες ζώνες, περιοχές δηλαδή που η αμαξοστοιχία δεν τροφοδοτείται, μήκους έως και 1km. Αυτή η δομή βοηθάει για την ισόρροπη κατανομή των ρευμάτων στις τρεις φάσεις του δικτύου, όμως προϋποθέτει ότι οι δύο μονοφασικές γραμμές στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, θα εξυπηρετούν, παρόμοια, ιδανικά ίδια, φορτία ταυτόχρονα. Κάτι τέτοιο όμως έχει πολύ μικρές πιθανότητες να συμβεί.

Το σύστημα συμπληρώνεται με μια διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος, που η είσοδος και η έξοδος της συνδέονται παράλληλα με το φορτίο κάθε μιας φάσης του δευτερεύοντος. Η διάταξη αυτή, στην ουσία επιτρέπει στο δίκτυο να δίνει μια συμμετρική φόρτιση στο πρωτεύον του μετασχηματιστή, και πραγματοποιεί τη μικροδιόρθωση που απαιτείται στο δευτερεύον, μετακυλύοντας ισχύ από τη μια φάση στην άλλη.



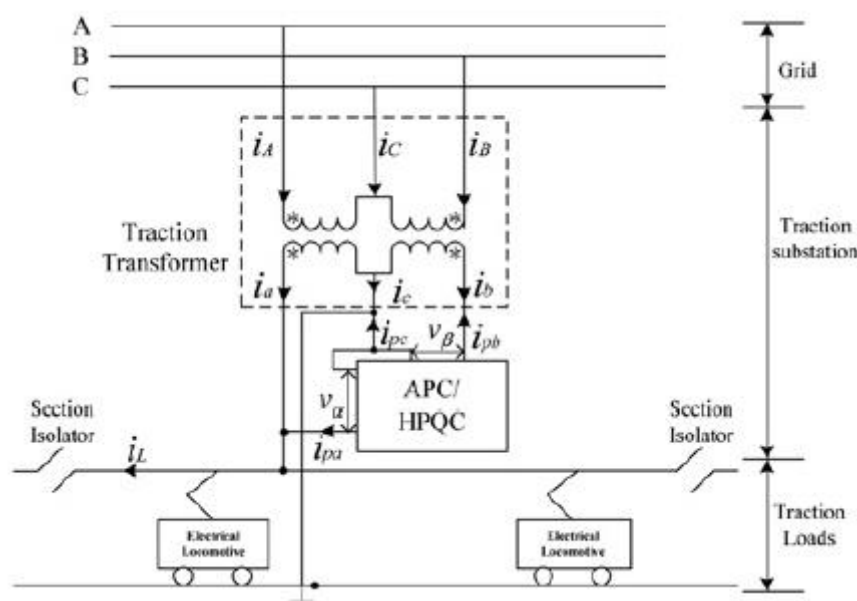
Εικόνα 1.3: Παραδοσιακό σύστημα τροφοδοσίας^[6]

1.2.1 Ομοφασικό σύστημα τροφοδοσίας^[6]

Η ανάγκη τροφοδότησης όλο και μεγαλύτερων αμαξοστοιχιών, έφερε στην επιφάνεια σημαντικά μειονεκτήματα του παραδοσιακού συστήματος. Συγκεκριμένα λόγω των μεγαλύτερων φορτίων, μεγάλωναν και τα προβλήματα ποιότητας ισχύος στο δίκτυο. Σημαντικό μειονέκτημα αποτελούν και οι ουδέτερες ζώνες, που επηρεάζουν την ταχύτητα της αμαξοστοιχίας, ενώ η υλοποίηση τους απαιτεί ακριβούς αυτόματους διακόπτες και ελεγκτές.

Στα προβλήματα αυτά, ήρθε να δώσει απάντηση το ομοφασικό σύστημα τροφοδοσίας (Εικόνα 1.4). Εδώ η μια φάση του δευτερέοντος τροφοδοτεί απευθείας το φορτίο, ενώ η άλλη συνδέεται στην είσοδο μιας διάταξης ηλεκτρονικών ισχύος, η έξοδος της οποίας συνδέεται παράλληλα με το φορτίο.

Η δομή αυτή έχει σαν αποτέλεσμα, τη μείωση στο μισό των ουδέτερων ζωνών. Μεγάλο μειονέκτημα της όμως αποτελεί το γεγονός ότι απαιτεί, συγκριτικά με το παραδοσιακό σύστημα, υψηλής ισχύος (άρα και ακριβότερες) διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος.



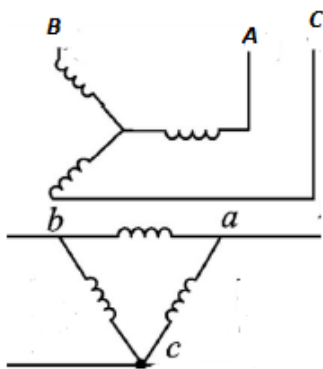
Εικόνα 1.3: Ομοφασικό σύστημα τροφοδοσίας^[6]

1.3 Προβλήματα ποιότητας ισχύος στις ηλεκτρικές αμαξοστοιχίες

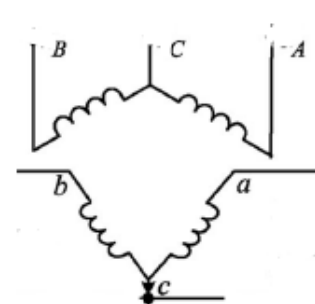
1.3.1 Ρεύματα Αρνητικής Ακολουθίας

Η σύνδεση τους μέσω μονοφασικών μετασχηματιστών υποβιβασμού τάσης, στο τριφασικό δίκτυο, μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα ασύμμετρης φόρτισης στις τρεις γραμμές του δικτύου. Το αποτέλεσμα αυτής είναι η εμφάνιση σημαντικών ποσοτήτων **ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας** (Negative Sequence Currents) στο δίκτυο, που στις χειρότερες περιπτώσεις μπορεί να αποκτήσουν μέχρι και ίδιο πλάτος με τα ρεύματα θετικής ακολουθίας (Positive Sequence Currents). Το μέγεθος του προβλήματος είναι φυσικά συνάρτηση της ισχύος τροφοδοσίας και του φορτίου. Για παράδειγμα, σε ένα δίκτυο με τάση τροφοδοσίας 150kV, η έγχυση ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας που προκαλεί μια αμαξοστοιχία 10MW δεν μπορεί να είναι καθοριστικής σημασίας. Σε ένα μικρότερο δίκτυο όμως (πχ 66kV) ένα παρόμοιο φορτίο θα προκαλούσε σημαντική ασυμμετρία. Αν αυτά τα ρεύματα δεν αντισταθμιστούν τότε λόγω και της μεγάλης ισχύος του φορτίου μπορεί να προκληθούν σημαντικά προβλήματα στο δίκτυο, όπως δυσλειτουργία στην εξυπηρέτηση φορτίων της γύρω περιοχής^{[1] [7]}.

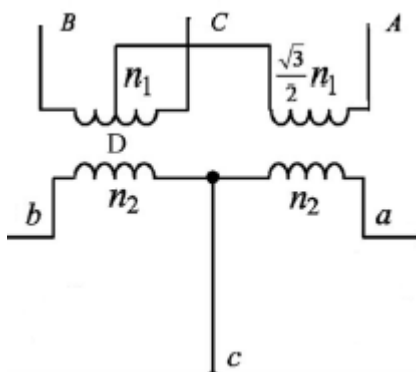
Το πλάτος των ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας, αλλά και η ίδια η ύπαρξη τους επηρεάζονται από τον τύπο μετασχηματιστή που χρησιμοποιείται στο δίκτυο τροφοδοσίας. Συνήθεις τύποι μετασχηματιστών που χρησιμοποιούνται είναι οι Τρίγωνο-Αστέρας, Αστέρας-Τρίγωνο, ανοιχτού τριγώνου (V-v), Scott, Le-Blanc, Woodbridge. Αυτού του τύπου οι μετασχηματιστές μπορούν στην ουσία να μετατρέπουν την συμμετρική τριφασική παροχή στο πρωτεύον σε δύο συμμετρικές μονοφασικές παροχές στο δευτερεύον με την κατάλληλη συνδεσμολογία των τυλιγμάτων τους.



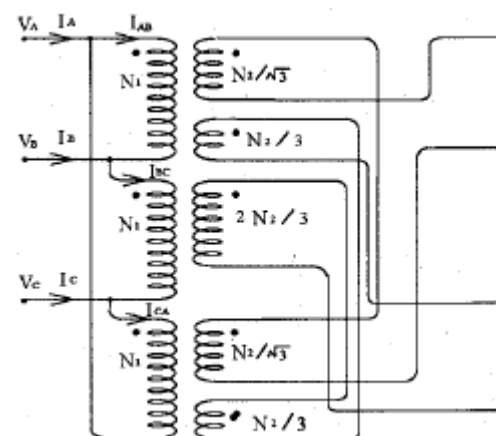
Εικόνα 1.4: Μετασχηματιστής Αστέρας-Τρίγωνο ^[8]



Εικόνα 1.5: Μετασχηματιστής Αστέρας-Τρίγωνο ^[8]



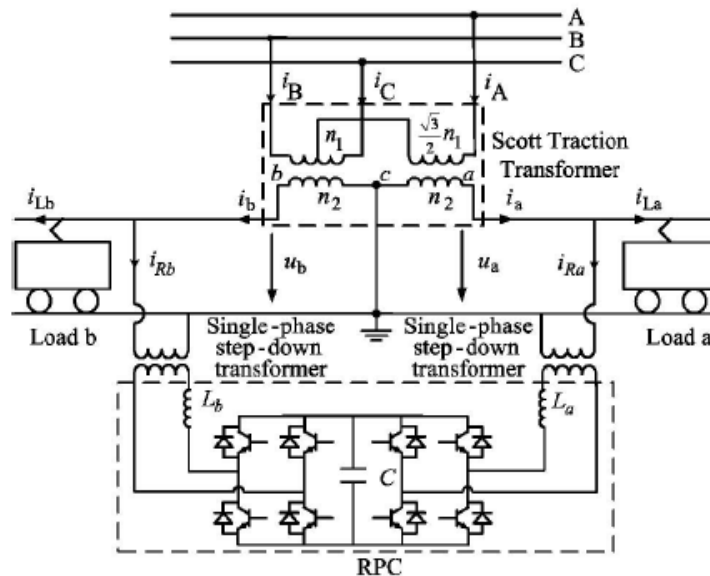
Εικόνα 1.6: Μετασχηματιστής Scott ^[8]



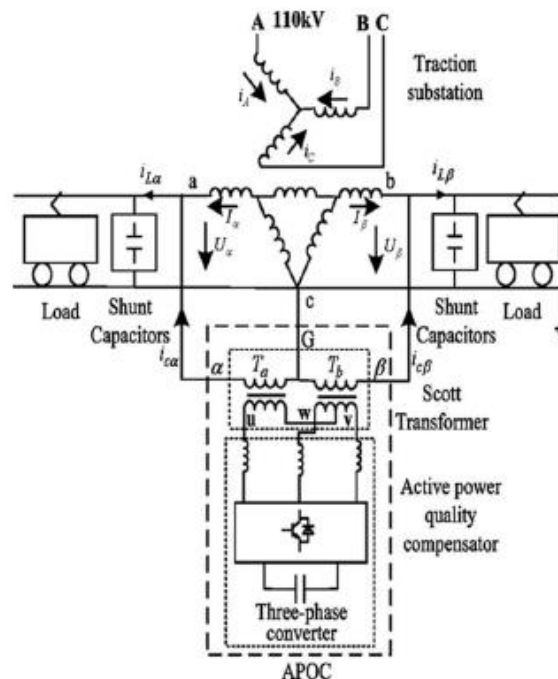
Εικόνα 1.7: Μετασχηματιστής Le Blanc ^[9]

Η επιλογή του κατάλληλου μετασχηματιστή για κάθε εγκατάσταση είναι ζήτημα τεchnικοοικονομικής εξέτασης. Μια συνηθισμένη επιλογή αποτελεί ο μετασχηματιστής ανοιχτού τριγώνου, καθώς αποτελεί μια απλή και φθηνή λύση σε σύγκριση με τους υπόλοιπους^[1].

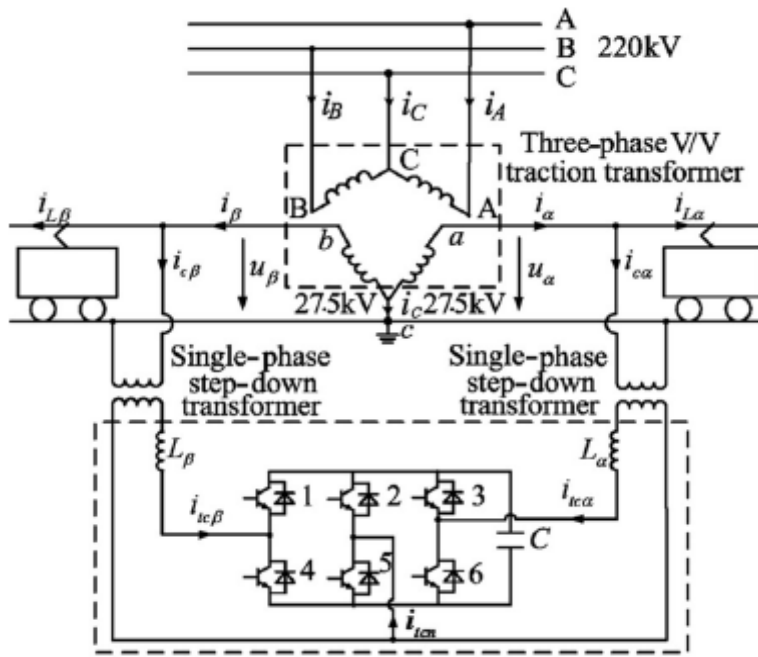
Η ζητούμενη αντιστάθμιση, επιτυγχάνεται από τις διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος, που συνδέονται στις εξόδους των γραμμών του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή, που τροφοδοτούν τα τρένα. Οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται ποικίλουν (SVC, APQC, HPQC, STATCOM, RPC κ.α.), και ως εκ τούτου, γεννιούνται διάφοροι συνδυασμοί μετασχηματιστών-μετατροπών. Μερικοί τέτοιοι συνδυασμοί φαίνονται παρακάτω, όπως και η συνδεσμολογία των διατάξεων.



Εικόνα 1.1: Τροφοδοσία μέσω μετασχηματιστή Scott με αντιστάθμιση από RPC^[10]



Εικόνα 1.3: Τροφοδοσία μέσω μετασχηματιστή τριγώνου-αστέρα με αντιστάθμιση από RPC^[10]



Εικόνα 1.2: Τροφοδοσία μέσω μετασχηματιστή ανοικτού τριγώνου με αντιστάθμιση από RPC [8]

1.3.2 Αρμονικές συνιστώσες ρεύματος

Οι κινητήρες των σημερινών τρένων οδηγούνται από PWM μετατροπείς (Pulse Width Modulation). Αυτό έχει θετική επίδραση σε ότι αφορά την έγχυση αέργου ισχύος καθώς μπορεί να μετατρέψει το φορτίο σε ωμικό. Ωστόσο έχει σαν αποτέλεσμα την ροή αρμονικών συνιστωσών ρεύματος στο τριφασικό δίκτυο, δημιουργώντας άλλο ένα πρόβλημα στην τροφοδοσία.

Το πρόβλημα συνήθως αντιμετωπίζεται με έλεγχο του μετατροπέα του τρένου. Επίσης ο μετασχηματιστής της διάταξης, δρα ως φίλτρο για την καταστολή των αρμονικών. Οι διάφορες συνδεσμολογίες μετασχηματιστών, έχουν άλλες χαρακτηριστικές καμπύλες ενίσχυσης-υποβιβασμού των διαφόρων τάξεων αρμονικών, εισάγοντας άλλη μια παράμετρο για την επιλογή μετασχηματιστή^[11]. Ο συνδυασμός κατάλληλων φίλτρων και χειρισμού του μετατροπέα είναι η βέλτιστη λύση.

1.4 Κίνδυνοι που απορρέουν από τα προβλήματα ποιότητας ισχύος

Οι κίνδυνοι που απορρέουν από τα παραπάνω προβλήματα, αφορούν τόσο το δίκτυο, όσο και την ίδια την αμαξοστοιχία.

Η ασύμμετρη φόρτιση καταπονεί το δίκτυο και μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα τάσης σε άλλα σημεία του. Επιπλέον, μπορεί να οδηγήσει σε δυσλειτουργία των προστατευτικών διατάξεων του εξοπλισμού^[1].

Ταυτόχρονα, οι αρμονικές μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στα συστήματα ελέγχου και τηλεπικοινωνιών του τρένου. Τα συστήματα αυτά είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν σε συχνότητες διαφορετικές από την τροφοδοσία του τρένου, αλλά οι αρμονικές μπορεί να προκαλέσουν επιπλοκές, οδηγώντας σε καταστροφικά αποτελέσματα^[12].

1.5 Μέθοδος προσέγγισης του προβλήματος

Η παρούσα εργασία, πραγματεύεται τη καταστολή της ασύμμετρης φόρτισης των φάσεων στο τριφασικό δίκτυο, για δύο συστήματα που τροφοδοτούνται από μετασχηματιστή ανοιχτού τριγώνου και αστέρα τριγώνου αντίστοιχα. Η σύγκριση γίνεται για αυτούς τους δύο μετασχηματιστές, καθώς είναι ευρέως διαδεδομένοι λόγω της απλότητας στη συνδεσμολογία και στην παραγωγή τους.

Οι αμαξοστοιχίες θεωρούνται επαγωγικά φορτία με συντελεστή ισχύος 0,8-1. Η ανταλλαγή ισχύος μεταξύ των φάσεων προσομοιώνεται με χρήση δύο μονοφασικών αντιστροφών, όχι συζευγμένων μεταξύ τους, που όμως υπόκεινται σε κατάλληλο έλεγχο.

Με την εξαγωγή κατάλληλων γραφημάτων από μεγέθη του κυκλώματος σε συγκεκριμένα σενάρια λειτουργίας, αλλά και με την εξέταση γραφημάτων που αφορούν τις διάφορες πιθανές συνθήκες φόρτισης, επιχειρείται να αντληθούν συμπεράσματα για τους δύο μετασχηματιστές. Το τελικό ερώτημα είναι ποιος από τους δύο, οδηγεί στην επιλογή αντιστροφέα μικρότερης ονομαστικής ισχύος (άρα και πιο φθηνού).

Το πρόβλημα των αρμονικών, άρα και τα φίλτρα και οι κατασταλτικές ιδιότητες των μετασχηματιστών δεν προσομοιώνονται για λόγους απλούστευσης του προβλήματος.

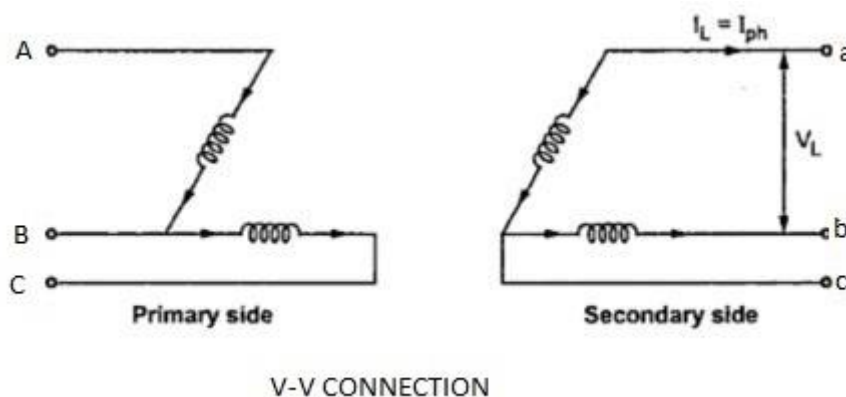
Οι μετασχηματιστές και όλα τα στοιχεία θεωρούνται ιδανικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Διατάξεις σε συστήματα τροφοδοσίας ηλεκτρικών αμαξοστοιχιών

2.1 Μετασχηματιστής Ανοιχτού τριγώνου (V-v)

Ο τριφασικός αυτός μετασχηματιστής, αποτελείται από δύο όμοια ζεύγη τυλιγμάτων. Στην ουσία δηλαδή αποτελείται από δύο μονοφασικούς μετασχηματιστές (με συντελεστή μετασχηματισμού K_v), με ένα κοινό άκρο, τόσο στο πρωτεύον όσο και στο δευτερεύον. Η συνδεσμολογία τους φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



Εικόνα 2.1: Τοπολογία μετασχηματιστή ανοιχτού τριγώνου

Γενικά στη χρήση του σαν τριφασικός μετασχηματιστής συμπεριφέρεται ως εξής: Με συμμετρική τριφασική τροφοδοσία στην είσοδο του rms τιμής $\tilde{V}_{prim}$ (φασική) αποδίδει στην έξοδο του συμμετρική τριφασική τάση με rms τιμή της φασικής τάσης: $\tilde{V}_{sec} = K_v * \tilde{V}_{prim}$. Δηλαδή στο πρωτεύον

$$\vec{V}_A = \tilde{V}_{prim} * e^{j0^\circ}$$

$$\vec{V}_B = \tilde{V}_{prim} * e^{j240^\circ} \quad (2.1)$$

$$\vec{V}_C = \tilde{V}_{prim} * e^{j120^\circ}$$

Και στο δευτερεύον έχουμε:

$$\vec{V}_a = \tilde{V}_{sec} * e^{j0^\circ}$$

$$\vec{V}_b = \tilde{V}_{sec} * e^{j120^\circ} \quad (2.2)$$

$$\vec{V}_c = \tilde{V}_{sec} * e^{j240^\circ}$$

Στη εργασία μας, θα τον χρησιμοποιήσουμε σαν μετασχηματιστή **3 φάσεων στο πρωτεύον και 2 στο δευτερεύον**, γειώνοντας το κοινό άκρο των τυλιγμάτων του δευτερεύοντος (άκρο c του παραπάνω σχήματος). Σε αυτήν την περίπτωση οι φάσορες του δευτερεύοντος είναι:

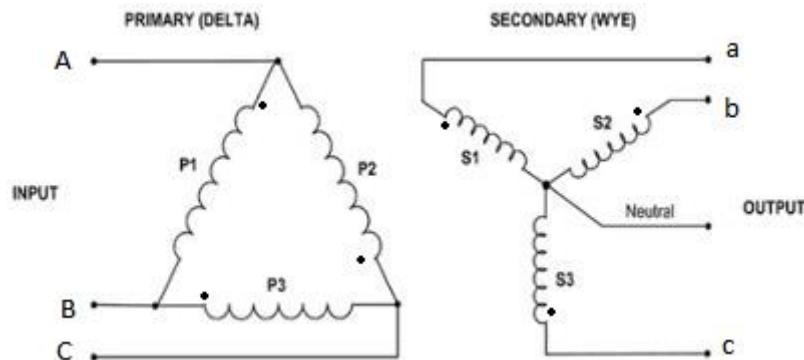
$$\vec{V}_a = \sqrt{3} * \tilde{V}_{sec} * e^{j30^\circ}$$

$$\vec{V}_b = \sqrt{3} * \tilde{V}_{sec} * e^{j90^\circ} \quad (2.3)$$

Όπως γίνεται αντιληπτό, καθώς η τάση ενός κλάδου ως προς τη γη στο δευτερεύον είναι συζευγμένη με μια πολική τάση του πρωτεύοντος, πλέον σαν φασική μετράται η τάση που προηγουμένως φαινόταν σαν πολική.

2.2 Μετασχηματιστής Τρίγωνο-Αστέρα (Δ-Υ)

Ο τριφασικός αυτός μετασχηματιστής, αποτελείται από τρία όμοια ζεύγη τυλιγμάτων. Στην ουσία δηλαδή αποτελείται από τρεις μονοφασικούς μετασχηματιστές (με συντελεστή μετασχηματισμού K_v). Στο πρωτεύον τα τυλίγματα των μετασχηματιστών είναι συνδεδεμένα σε τρίγωνο, ενώ στο δευτερεύον σε αστέρα. Η συνδεσμολογία τους φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 2.2: Τοπολογία Μετασχηματιστή Τριγώνου-Αστέρα

Επιλέχθηκε η σύνδεση Dy1 που σημαίνει ότι οι φασικές τάσεις του πρωτεύοντος προηγούνται των φασικών τάσεων του δευτερεύοντος κατά 30° .

Αν τροφοδοτήσουμε το πρωτεύον του μετασχηματιστή με μια συμμετρική τριφασική τάση ενεργού τιμής $\tilde{V}_s$ (πολική) θα έχουμε την εξής συμπεριφορά: Καταρχάς στο πρωτεύον θα έχουμε στα άκρα των τυλιγμάτων τις πολικές τάσεις τροφοδοσίας:

$$\vec{V}_{AB} = \tilde{V}_{prim} * e^{j30^\circ}$$

$$\vec{V}_{BC} = \tilde{V}_{prim} * e^{j270^\circ} \quad (2.4)$$

$$\vec{V}_{CA} = \tilde{V}_{prim} * e^{j150^\circ}$$

$$\text{Όπου } \tilde{V}_{prim} = \tilde{V}_s$$

Οπότε η τάση μετασχηματίζεται στο δευτερεύον ως εξής:

$$\vec{V}_a = \tilde{V}_{sec} * e^{j30^\circ}$$

$$\vec{V}_b = \tilde{V}_{sec} * e^{j270^\circ} \quad (2.5)$$

$$\vec{V}_c = \tilde{V}_{sec} * e^{j150^\circ}$$

$$\text{Όπου } \tilde{V}_{sec} = \tilde{V}_{prim} * K_v$$

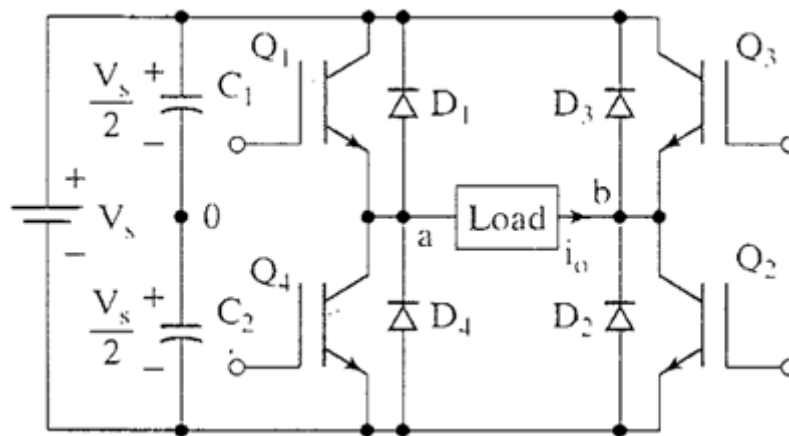
Στη εργασία, θα χρησιμοποιηθεί σαν μετασχηματιστής **3 φάσεων στο πρωτεύον και 2 στο δευτερεύον**, γειώνοντας το ένα άκρο του αστέρα στο δευτερεύον (πχ το άκρο c του παραπάνω σχήματος). Τότε, σαν φασική τάση στο δευτερεύον (δηλαδή τάση ανάμεσα στη φάση και τη γη) θα συμπεριφέρονται οι ac και bc. Ως εκ τούτου θα είναι:

$$\vec{V}_{ac} = \sqrt{3} * \tilde{V}_{sec} * e^{j60^\circ}$$

$$\vec{V}_{bc} = \sqrt{3} * \tilde{V}_{sec} * e^{j120^\circ} \quad (2.6)$$

2.3 Μονοφασικός αντιστροφέας

Ο αντιστροφέας είναι διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιείται για την μετατροπή μιας συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη. Αυτό επιτυγχάνεται με τον ελεγχόμενο άνοιγμα και κλείσιμο διακοπτικών συσκευών που στα άκρα τους έχουν την σταθερή τάση, μέσω κατάλληλης μεθόδου ελέγχου τους. Εν προκειμένω, θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation). Η διάταξη του αντιστροφέα φαίνεται παρακάτω. Οι δύο διόδοι που φαίνονται αντιπαράλληλα στα διακοπτικά στοιχεία παρέχουν τη δυνατότητα αντίστροφης ροής ρεύματος, δηλαδή προς την πλευρά συνεχούς τάσης.

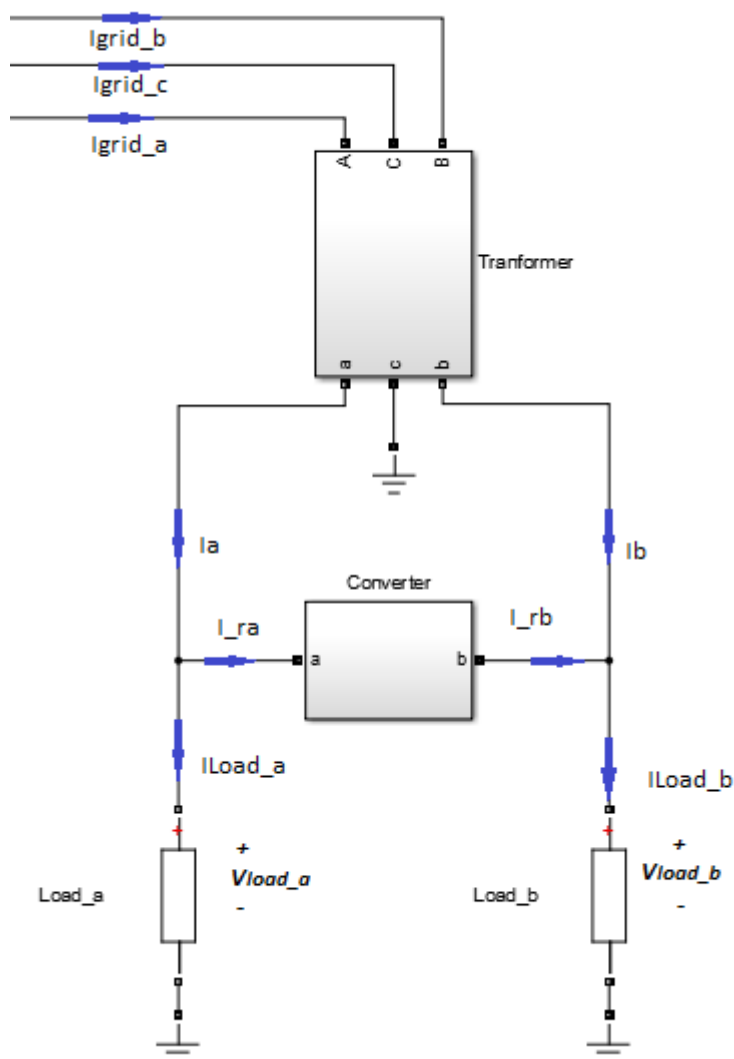


Εικόνα 2.3: Διάταξη αντιστροφέα^[1]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ανάλυση λειτουργίας υποσταθμού τροφοδοσίας με διάταξη αντιστάθμισης

Η διάταξή μας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 3.1: Διάταξη προσομοίωσης

Έχουμε:

- Τριφασική τροφοδοσία από το δίκτυο ($I_{grid_a}, I_{grid_b}, I_{grid_c}$ ή $I_{prim_a}, I_{prim_b}, I_{prim_c}$)
- Μετασχηματιστή υποβιβασμού τάσης (V-n ή Δ-Υ) με συντελεστή μετασχηματισμού K_v
- Μονοφασικό μετατροπέα αποτελούμενο από δυο αντιστροφείς συνδεδεμένους back to back
- Τα φορτία των δυο φάσεων του δευτερεύοντος $Load_a, Load_b$ ($\Sigma I=0,8-1$ επαγωγικό) που αναπαριστούν τα φορτία των δύο αμαξοστοιχιών

3.1 Τοπολογία μετασχηματιστή ανοιχτού τριγώνου

Αρχικά θεωρείται μοναδιαίος συντελεστής ισχύος στα φορτία. Στη συνέχεια γενικεύουμε τη μέθοδο και για άλλες γωνίες φορτίου, κοντά στις προδιαγραφές των αμαξοστοιχιών, αλλά και για τις συνθήκες αναγεννητικής πέδησης. Επίσης θεωρούμε ιδανικό μετασχηματιστή και μελετάμε το σύστημα σε μόνιμη (ημιτονοειδή) κατάσταση λειτουργίας.

3.1.1 Σύστημα χωρίς αντιστάθμιση.

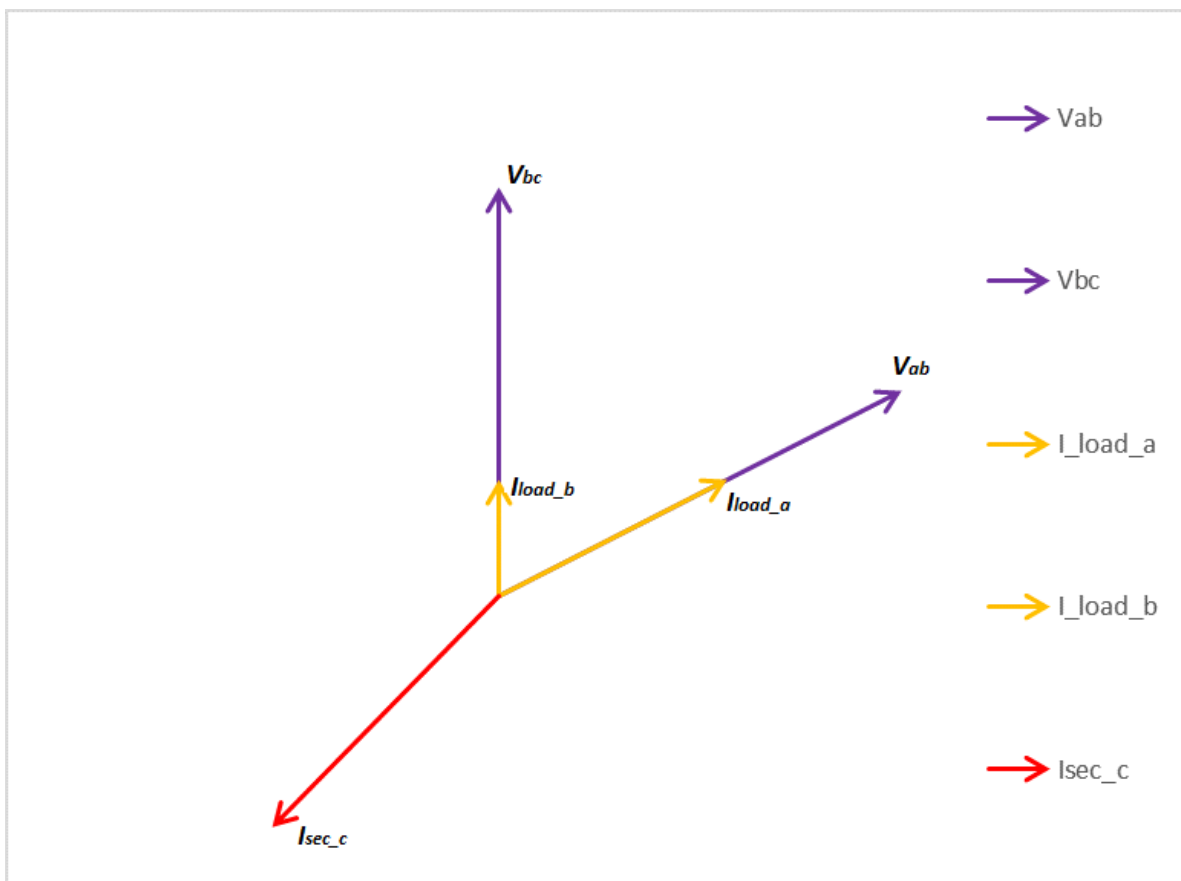
Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, η τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή άρα και στα άκρα των φορτίων είναι

$$\begin{aligned}\vec{V}_{Load_a} &= \vec{V}_{ab} = 1e^{j30^\circ} \\ \vec{V}_{Load_b} &= \vec{V}_{bc} = 1e^{j90^\circ} \quad (3.1)\end{aligned}$$

Επομένως τα ρεύματα των φορτίων (δηλαδή των φάσεων του δευτερεύοντος) είναι :

$$\begin{aligned}\vec{I}_{Load_a} &= \frac{1}{Z_{La}} e^{j30^\circ} \\ \vec{I}_{Load_b} &= \frac{1}{Z_{Lb}} e^{j90^\circ} \quad (3.2)\end{aligned}$$

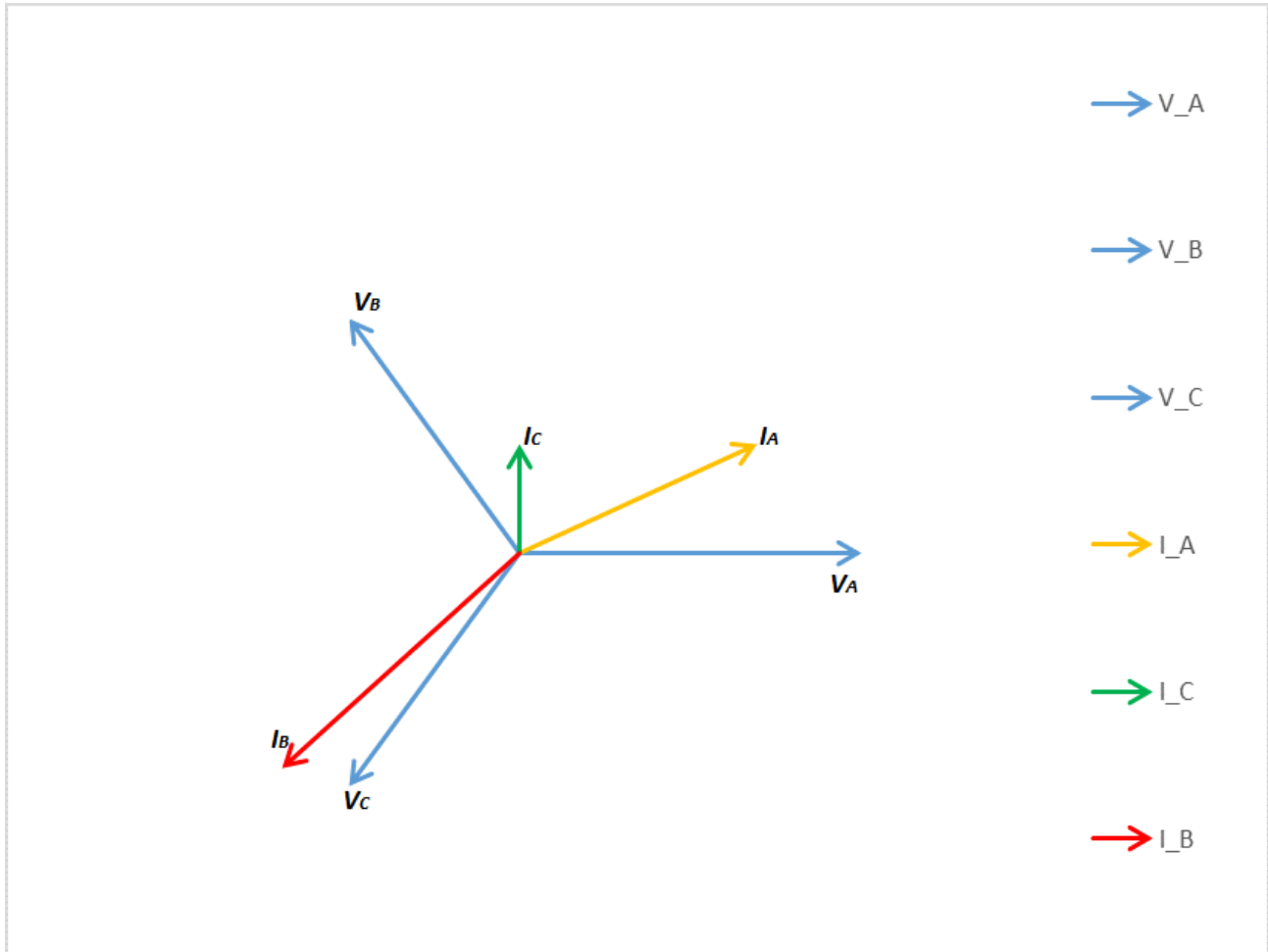
Το ρεύμα στον κλάδο c του δευτερεύοντος προκύπτει $\vec{I}_{sec_c} = -\vec{I}_{Load_b} - \vec{I}_{Load_a}$. Στο δευτερεύον δηλαδή του μετασχηματιστή έχουμε την εικόνα του παρακάτω διανυσματικού διαγράμματος:



Εικόνα 3.2:: Διανυσματικό διάγραμμα μεγεθών δευτερεύοντος του Μ/Σ χωρίς την λειτουργία του μετατροπέα για $I_{Load_a}=0,6$ α.μ. και $I_{Load_b}=0,25$ α.μ.

Τα ρεύματα του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή συνδέονται με τη σχέση $I_S = I_p * K_V$ επομένως τα ρεύματα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος θα έχουν την ίδια ανά μονάδα τιμή και την ίδια γωνία φάσης.

Τα μεγέθη του πρωτεύοντος που αναφέραμε φαίνονται στο παρακάτω διανυσματικό διάγραμμα, όπου γίνεται εμφανές το πρόβλημα της ασυμμετρίας.



Εικόνα 3.3: Διανυσματικό διάγραμμα μεγεθών πρωτεύοντος του Μ/Σ χωρίς την λειτουργία του μετατροπέα

Γίνεται κατανοητό από την ανάλυση του μετασχηματιστή που προηγήθηκε ότι για να αποκατασταθεί η συμμετρία στο πρωτεύον, πρέπει το ρεύμα που διαρρέει τις τρεις γραμμές του δευτερεύοντος (δηλαδή τα I_{load_a} , I_{load_b} και το I_{sec_c} που επιστρέφει μέσω της γείωσης) να είναι ίσα και με διαφορά φάσης μεταξύ τους 120° . Η ενεργός τιμή των ρευμάτων του συμμετρικού συστήματος, μπορεί να υπολογιστεί από το ενεργειακό ισοζύγιο στο πρωτεύον και το δευτερεύον του μετασχηματιστή.

$$P_p = P_s = P_{Load} = P_{Load_a} + P_{Load_b} \Rightarrow 3 * \tilde{V}_{prim} * \tilde{I}_{prim} = \sqrt{3} * \tilde{V}_{sec} * \tilde{I}_{load_a} + \sqrt{3} * \tilde{V}_{sec} * \tilde{I}_{load_b} \Rightarrow$$

$$\frac{\tilde{V}_{prim}}{\tilde{V}_{sec}} * \tilde{I}_{prim} = \frac{1}{\sqrt{3}} (\tilde{I}_{load_a} + \tilde{I}_{load_b}) \Rightarrow$$

$$\tilde{I}_{sec} = \frac{1}{\sqrt{3}} (\tilde{I}_{load_a} + \tilde{I}_{load_b}) \quad (3.3)$$

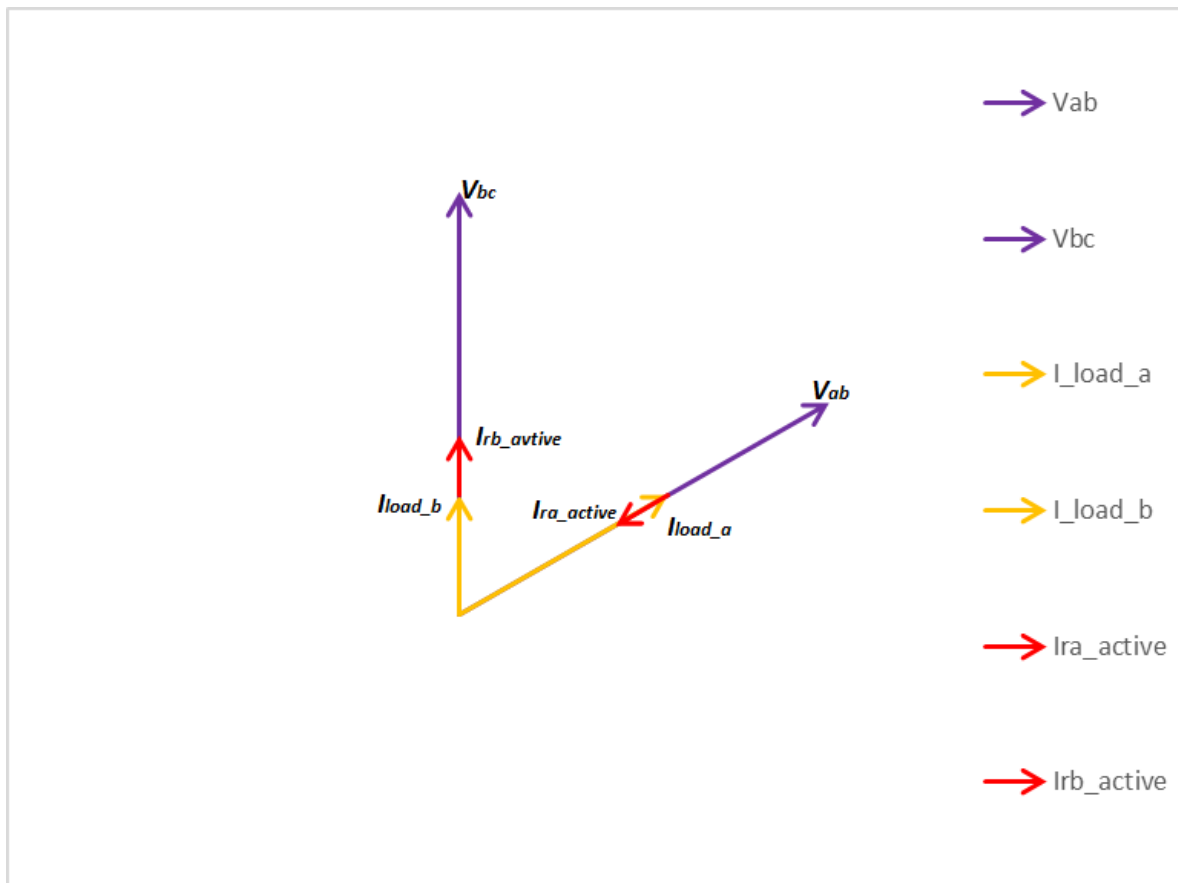
3.1.2 Απαιτήσεις λειτουργίας μετατροπέα

Η λειτουργία του μετατροπέα αντιμετωπίζει το πρόβλημα ως εξής: κάνει το φορτίο να φαίνεται συμμετρικό στο δίκτυο και δεχόμενος μια συμμετρική ισχύ, την κατανέμει κατάλληλα στο κάθε φορτίο. Πιο

συγκεκριμένα για να αποκατασταθεί η συμμετρία, πρέπει να περιστραφούν κατάλληλα τα ρεύματα του δευτερεύοντος, αλλά και να αλλάξει το μέτρο του καθενός (με βάση την 3.3). Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας συνιστώσας ενεργού, και μιας συνιστώσας αέργου ρεύματος.

3.1.2.1 Συνιστώσα ενεργού ρεύματος

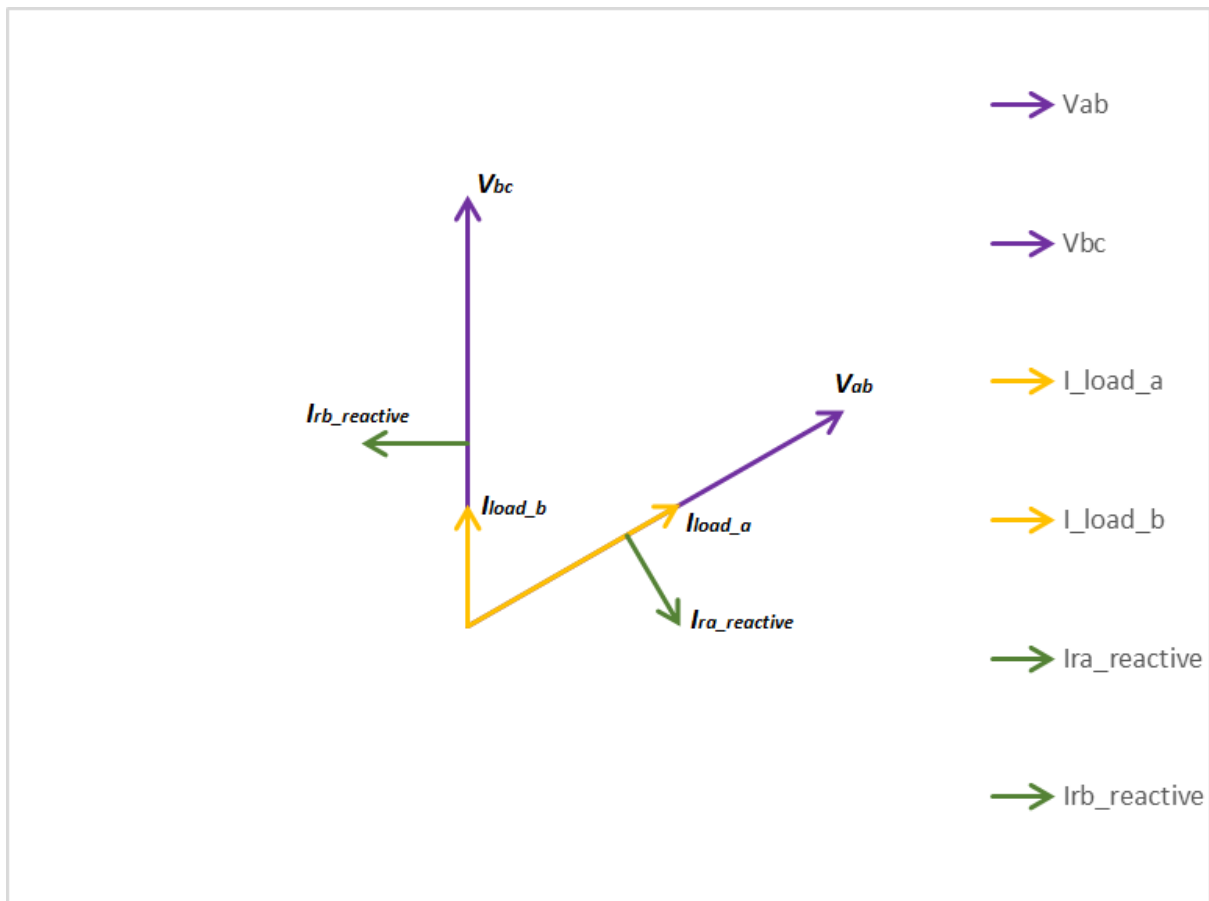
Η συνιστώσα αυτή εξισώνει τα μέτρα των ρευμάτων των δύο φάσεων στο ημιάθροισμα τους. Έχει δηλαδή rms τιμή $\tilde{I}_{active} = \frac{1}{2}(\tilde{I}_{load_a} - \tilde{I}_{load_b})$ ούτως ώστε $\tilde{I}'_a = \tilde{I}_{load_a} - \tilde{I}_{active} = \tilde{I}'_b = \tilde{I}_{load_b} + \tilde{I}_{active}$. Η γωνία των ενεργών ρευμάτων είναι ίδια ή παραπληρωματική με των ρευμάτων των φάσεων.



Εικόνα 3.4: Ενεργά ρεύματα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή

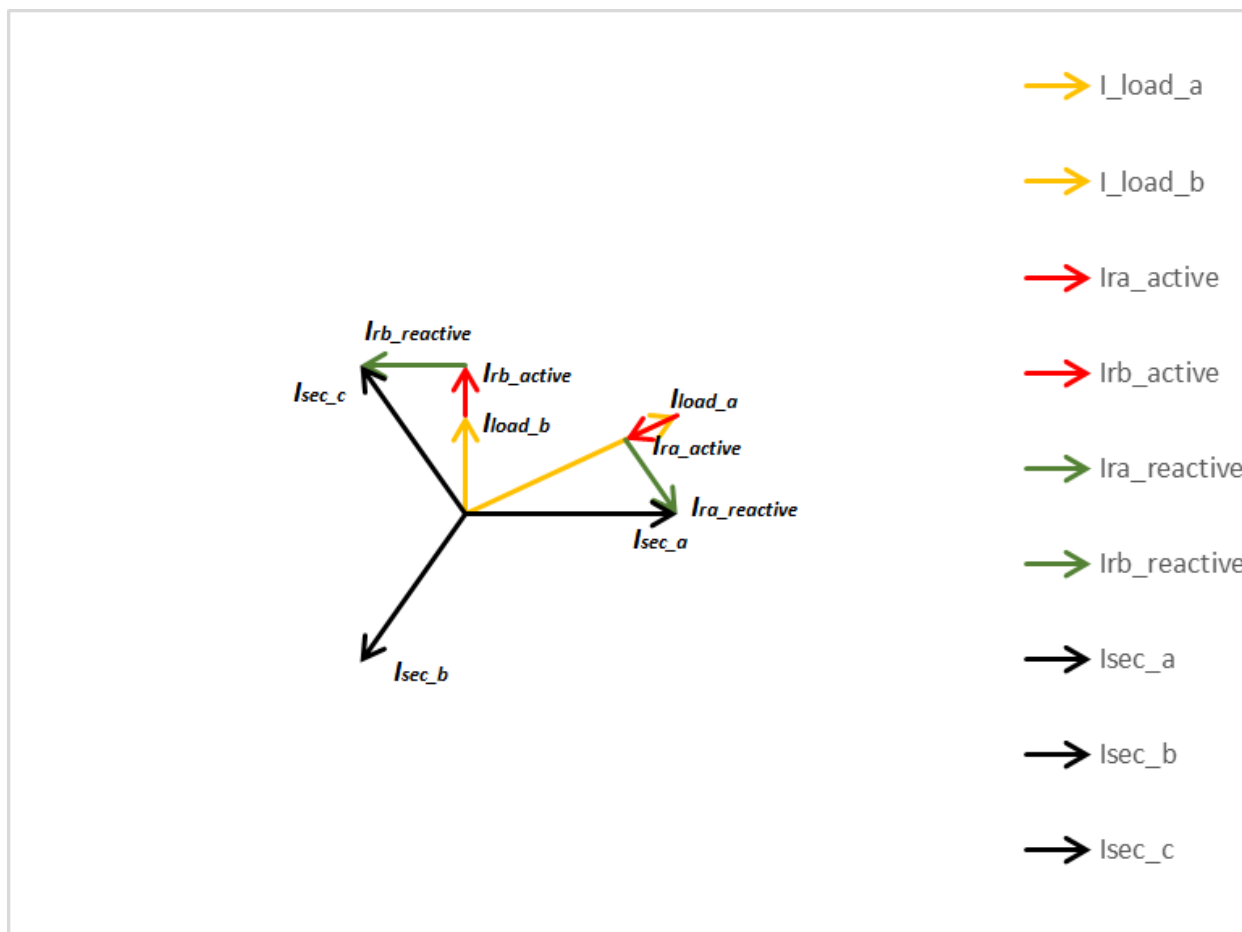
3.1.2.2 Συνιστώσα αέργου ρεύματος

Η συνιστώσα αυτή στρέφει τα ρεύματα που προέκυψαν από την προηγούμενη διαδικασία κατά 30° ώστε να γίνουν συμφασικά με τις τάσεις των φάσεων του πρωτεύοντος. Είναι κάθετη στα I'_a και I'_b αντίστοιχα και στις αντίστοιχες τάσεις. Η rms τιμή της είναι όπως προκύπτει από τη γεωμετρία του διανυσματικού διαγράμματος $\tilde{I}_{reactive} = \frac{1}{2}(\tilde{I}_{load_a} + \tilde{I}_{load_b}) * \tan 30^\circ$ (χωρητική για το ένα ρεύμα, επαγωγική για το άλλο). Παρακάτω φαίνεται το αντίστοιχο διανυσματικό διάγραμμα.



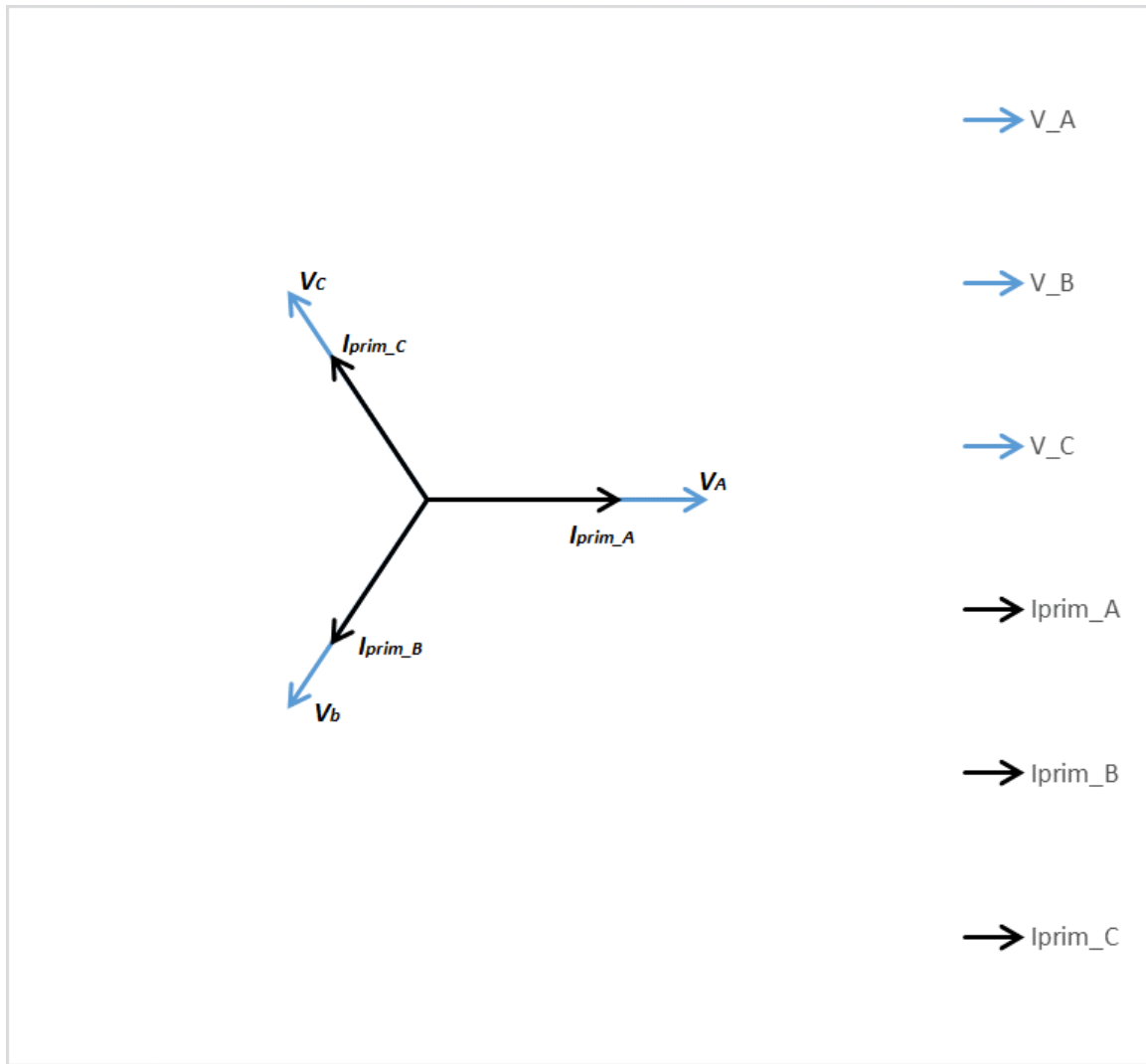
Εικόνα 3.5: Άεργα ρεύματα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή

Στην παρακάτω εικόνα, απεικονίζεται η συνολική επίδραση των εν λόγω ρευμάτων στα ρεύματα του μετασχηματιστή και κατ' επέκταση στα ρεύματα γραμμών.



Εικόνα 3.6: Ρεύματα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή

Εφόσον, ο Μ/Σ ανοιχτού τριγώνου, δεν εισάγει στροφή στους φάσορες των ρευμάτων, τα ρεύματα του πρωτεύοντος θα έχουν το ίδιο όρισμα με τα I_{sec_a} , I_{sec_b} , I_{sec_c} . Το πρωτεύον θα είναι λοιπόν φορτισμένο όπως δείχνει η Εικόνα 3.7.



Εικόνα3.7: Φόρτιση πρωτεύοντος μετά τη λειτουργία του μετατροπέα

Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η επιθυμητή συμμετρική φόρτιση του δικτύου.

Οι γραμμές a,b του δευτερεύοντος διαρρέονται από ρεύμα :

$$\begin{aligned} \vec{I}_{sec_a} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\tilde{I}_{load_a} + \tilde{I}_{load_b}) \\ \vec{I}_{sec_b} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\tilde{I}_{load_a} + \tilde{I}_{load_b})e^{j120^\circ} \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\text{Και λόγω του ότι } \vec{I}_{sec_c} = -\vec{I}_{sec_a} - \vec{I}_{sec_b} \Rightarrow \vec{I}_{sec_c} = \frac{1}{\sqrt{3}}(\tilde{I}_{load_a} + \tilde{I}_{load_b})e^{j240^\circ} \quad (3.5)$$

Άρα κοιτάζοντας στο δευτερεύον θα πρέπει να ισχύει $\vec{I}_{sec_a} = \vec{I}_{r_a} + \vec{I}_{load_a}$ και $\vec{I}_{sec_b} = \vec{I}_{r_b} + \vec{I}_{load_b} \Rightarrow$

$$\begin{aligned} \vec{I}_{r_a} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\tilde{I}_{load_a} + \tilde{I}_{load_b}) - \tilde{I}_{load_a}e^{j30^\circ} \\ \vec{I}_{r_b} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\tilde{I}_{load_a} + \tilde{I}_{load_b})e^{j120^\circ} - \tilde{I}_{load_b}e^{j90^\circ} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Οι σχέσεις αυτές μας δίνουν τα ρεύματα του μετατροπέα. Διαπιστώνουμε ότι:

$$\vec{I}_{r_a} = \frac{1}{\sqrt{3}}(\tilde{I}_{load_a} + \tilde{I}_{load_b}) - \tilde{I}_{load_a} * (\cos 30 + j \sin 30^\circ) \Rightarrow \vec{I}_{r_a} = \frac{1}{\sqrt{3}}(\tilde{I}_{load_a} + \tilde{I}_{load_b}) + \tilde{I}_{load_a} \frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2} \Rightarrow$$

$$\vec{I}_{r_a} = \tilde{I}_r e^{j \tan^{-1} \left(\sqrt{3} \frac{\tilde{I}_{Load_a}}{\tilde{I}_{Load_a} - 2\tilde{I}_{Load_b}} \right) - 180^\circ} \quad (3.7)$$

ομοίως

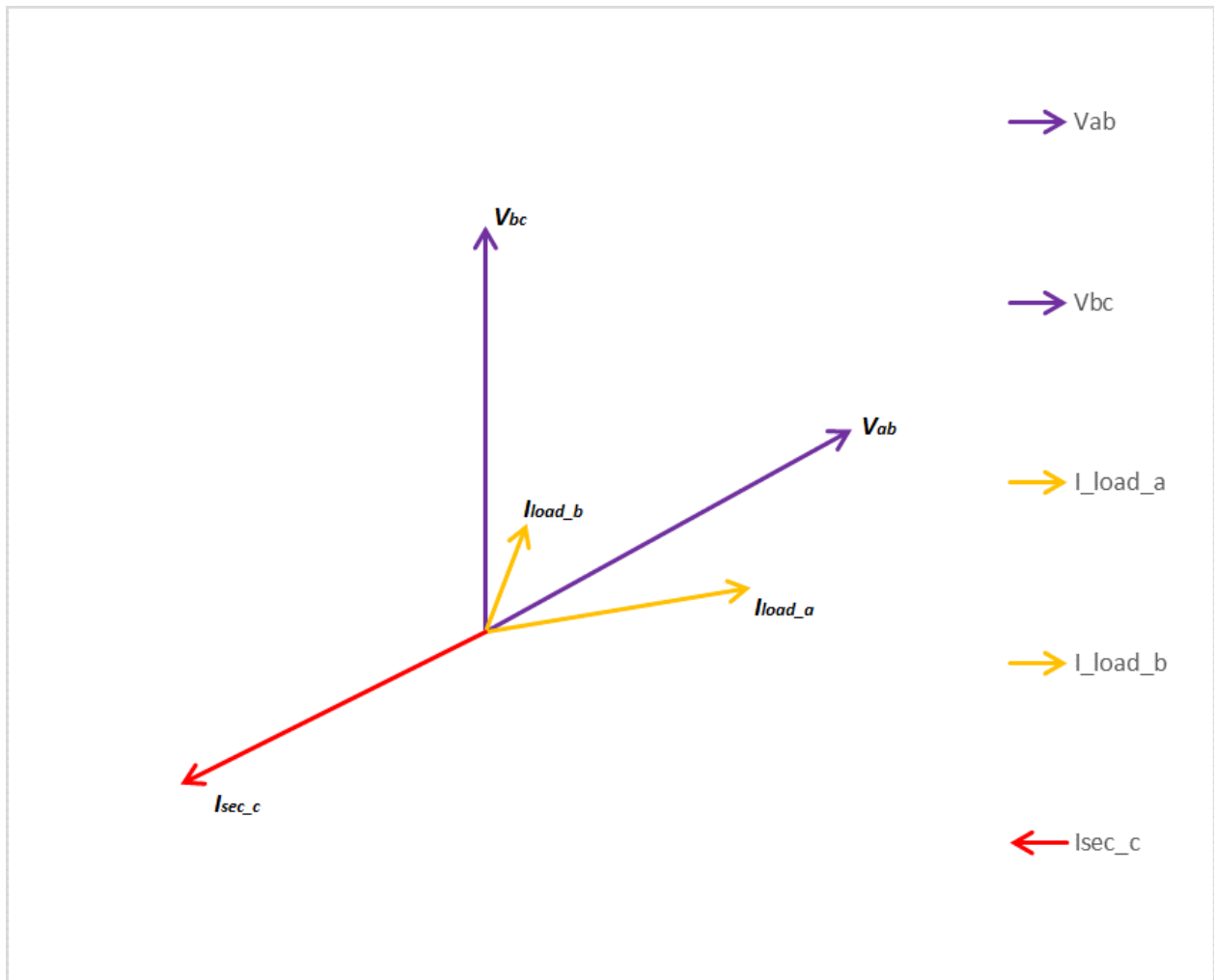
$$\vec{I}_{r_b} = \tilde{I}_r e^{j 180^\circ - \tan^{-1} \left(\sqrt{3} \frac{\tilde{I}_{Load_a} - \tilde{I}_{Load_b}}{\tilde{I}_{Load_a} + \tilde{I}_{Load_b}} \right)} \quad (3.8)$$

Όπου

$$\tilde{I}_r = \left(\frac{1}{3} \tilde{I}_{Load_a}^2 - \frac{1}{3} \tilde{I}_{Load_a} \tilde{I}_{Load_b} + \frac{1}{3} \tilde{I}_r^2 r_{Load_b} \right) \quad (3.9)$$

3.1.3 Γενίκευση μεθόδου για εύρος Συντελεστή Ισχύος φορτίου: 0,8-1 επαγωγικό ($\phi_{Load}=0-36,9$)

Θα θεωρήσουμε, ότι τα δύο φορτία, έχουν τον ίδιο συντελεστή ισχύος. Η τάση στα άκρα του φορτίου θα είναι όπως πριν συμφασική με την πολική του δικτύου ενώ το ρεύμα του θα έπεται κατά γωνία ϕ_{Load} όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 3.8: Φόρτιση στο δευτερεύον με συντελεστή ισχύος φορτίου διάφορο του 1.

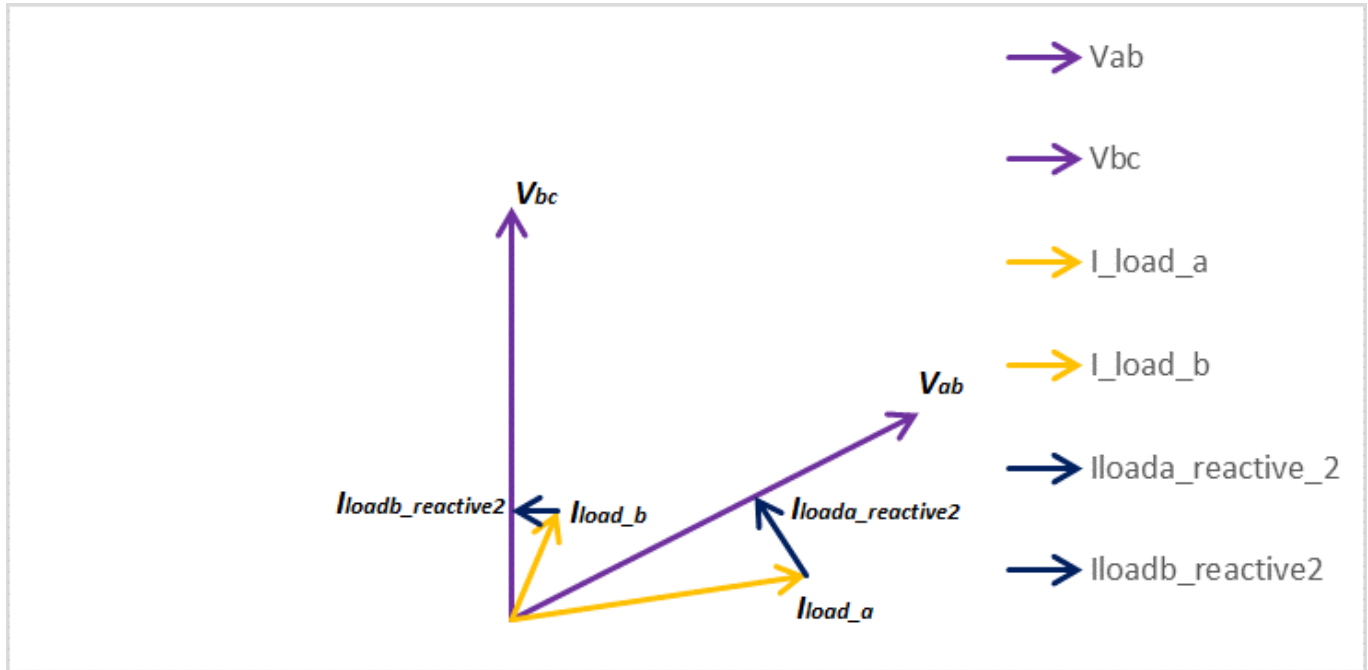
Όπως και προηγουμένως προκύπτει ασυμμετρία στη φόρτιση του πρωτεύοντος.

Για την αποκατάσταση της συμμετρίας, θα αξιοποιήσουμε την προηγούμενη μέθοδο, αφού πρώτα στρέψουμε τα δύο ρεύματα φορτίου, ώστε να συμπέσουν με τις τάσεις τους. Για το λόγο αυτό, θα εισάγουμε άλλο ένα άεργο (δηλαδή κάθετο στις αντίστοιχες τάσεις) ρεύμα στην κάθε πλευρά του

μετατροπέα (I_{load_react2} , I_{loadb_react2}) το οποίο θα προβάλλει το ρεύμα του φορτίου στην αντίστοιχη γωνία τάσης (30° και 90°). Το νέο αυτό άεργο ρεύμα θα είναι συνάρτηση του συντελεστή ισχύος. Από τη γεωμετρία του διανυσματικού διαγράμματος διαπιστώνουμε ότι η ενεργός τιμή αυτού του ρεύματος είναι:

$$\begin{aligned}\tilde{I}_{load_a_react2} &= \tilde{I}_{load_a} * \sin \varphi_{load} \\ \tilde{I}_{load_a_react2} &= \tilde{I}_{load_b} * \sin \varphi_{load} \quad (3.10)\end{aligned}$$

Τα ρεύματα αυτά φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα



Διάγραμμα 8: Επιπρόσθετα άεργα ρεύματα για Σ.Ι διάφορο του 0

Στη συνέχεια για αυτές τις προκύπτουσες προβολές θα εφαρμόσουμε την μέθοδο που αναπτύχθηκε για συντελεστή ισχύος 0. Στο τελικό αποτέλεσμα που θα δώσουν θα προσθέσουμε τα ρεύματα $I_{load_a_react2}$ και I_{loadb_react2}

Η τελική παράσταση των ρευμάτων του μετατροπέα θα είναι:

$$\begin{aligned}\vec{I}_{r_a} &= \vec{I}_{r_a30_active} + \vec{I}_{r_a30_reactive} + \vec{I}_{Load_a_reactive2} \\ \vec{I}_{r_b} &= \vec{I}_{r_b90_active} + \vec{I}_{r_b90_reactive} + \vec{I}_{Load_b_reactive2} \quad (3.11)\end{aligned}$$

Όπου $\vec{I}_{r_a30_active}$, $\vec{I}_{r_a30_reactive}$, $\vec{I}_{r_b90_active}$, $\vec{I}_{r_b90_reactive}$ είναι τα ενεργά και άεργα ρεύματα που προκύπτουν από τη μέθοδο για μηδενικό συντελεστή ισχύος, αλλά για τις αντίστοιχες προβολές των ρευμάτων φορτίου.

Όπως και στην περίπτωση που ο συντελεστής ισχύος ήταν 0 θα διαπιστώσουμε ότι

$$\begin{aligned}\vec{I}_{sec_a} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\tilde{I}_{Load_a} + \tilde{I}_{Load_b}) \\ \vec{I}_{sec_b} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\tilde{I}_{Load_a} + \tilde{I}_{Load_b})e^{j120^\circ} \quad (3.12)\end{aligned}$$

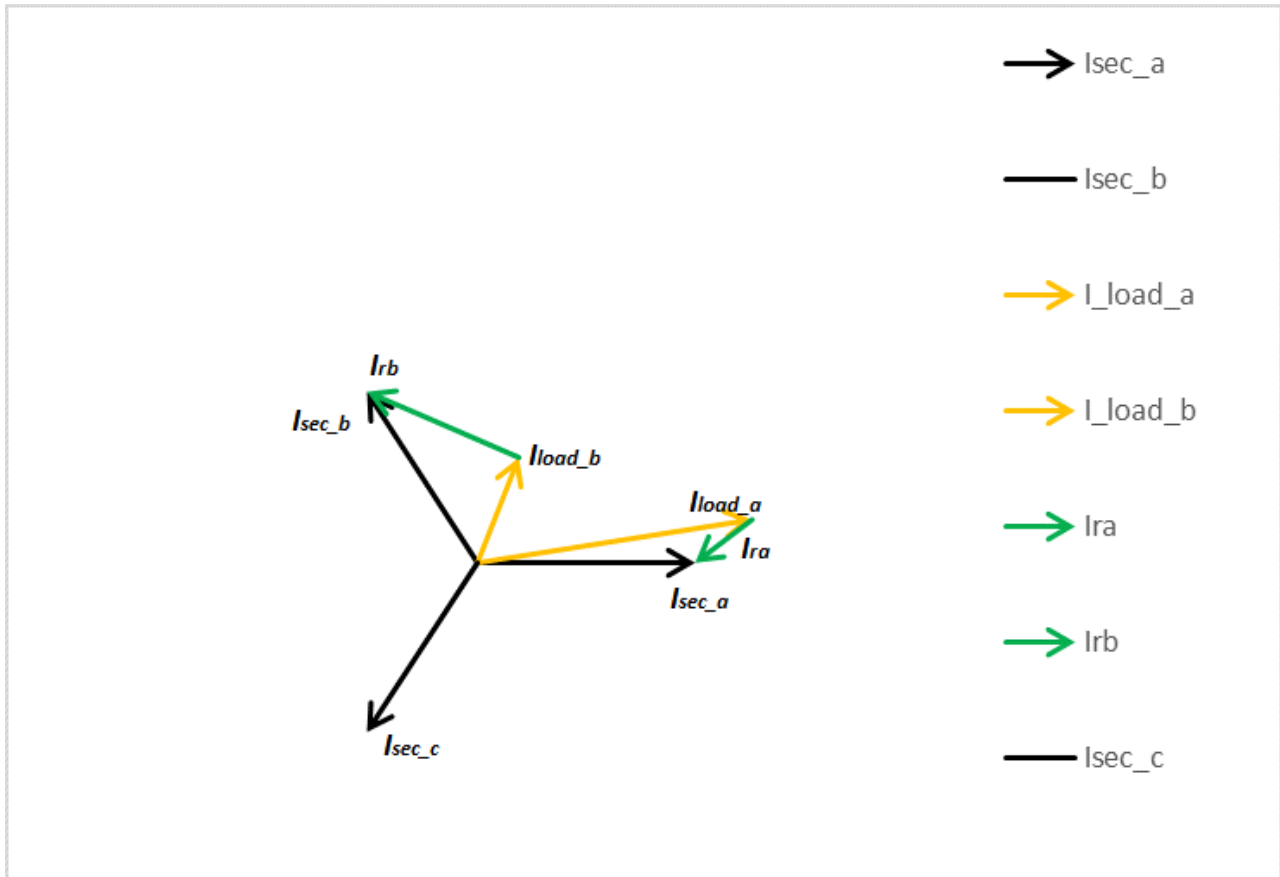
Επομένως παίρνουμε τους τύπους (3.6), (3.7) αυτή τη φορά για τις προβολές των ρευμάτων στις 30° και τις 90° αντίστοιχα και προσθέτουμε το επιπλέον άεργο ρεύμα:

$$\vec{I}_{r_a} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{\tilde{I}_{Load_a}}{\cos \varphi_{Load}} + \frac{\tilde{I}_{Load_b}}{\cos \varphi_{Load}} \right) - \frac{\tilde{I}_{Load_a}}{\cos \varphi_{Load}} e^{j30^\circ} + \tilde{I}_{Load_a} * \sin(\varphi_{Load}) * e^{j120^\circ} \quad (3.13)$$

$$\vec{I}_{r_b} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{\tilde{I}_{Load_a}}{\cos \varphi_{Load}} + \frac{\tilde{I}_{Load_b}}{\cos \varphi_{Load}} \right) - \frac{\tilde{I}_{Load_b}}{\cos \varphi_{Load}} e^{j120^\circ} + \tilde{I}_{Load_b} * \sin(\varphi_{Load}) * e^{j180^\circ} \quad (3.14)$$

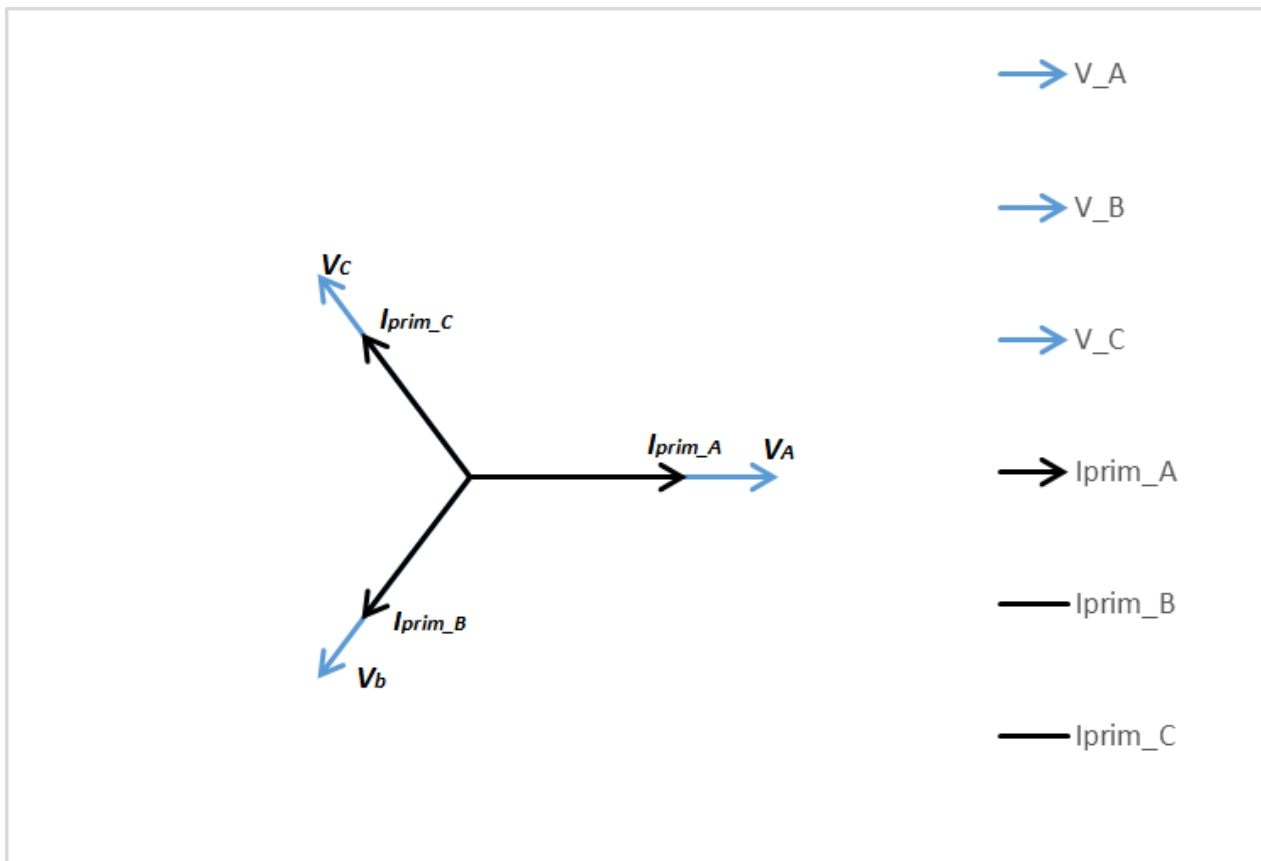
Για $\varphi_{Load}=0^\circ$ παρατηρούμε ότι σχηματίζονται οι τύποι (3.7) και (3.8)

Το διανυσματικό διάγραμμα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή σε αυτήν την περίπτωση φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 3.10: Φόρτιση στο δευτερεύον με συντελεστή ισχύος φορτίου διάφορο του 1, μετά την λειτουργία του μετατροπέα

Εφόσον, ο Μ/Σ ανοιχτού τριγώνου, δεν εισάγει στροφή στους φάσορες των ρευμάτων, τα ρεύματα του πρωτεύοντος θα έχουν το ίδιο όρισμα με τα I_{sec_a} , I_{sec_b} , I_{sec_c} . Έχει επιτευχθεί συνεπώς, η ζητούμενη συμμετρική φόρτιση στο πρωτεύον, όπως δείχνει και η Εικόνα 3.11.



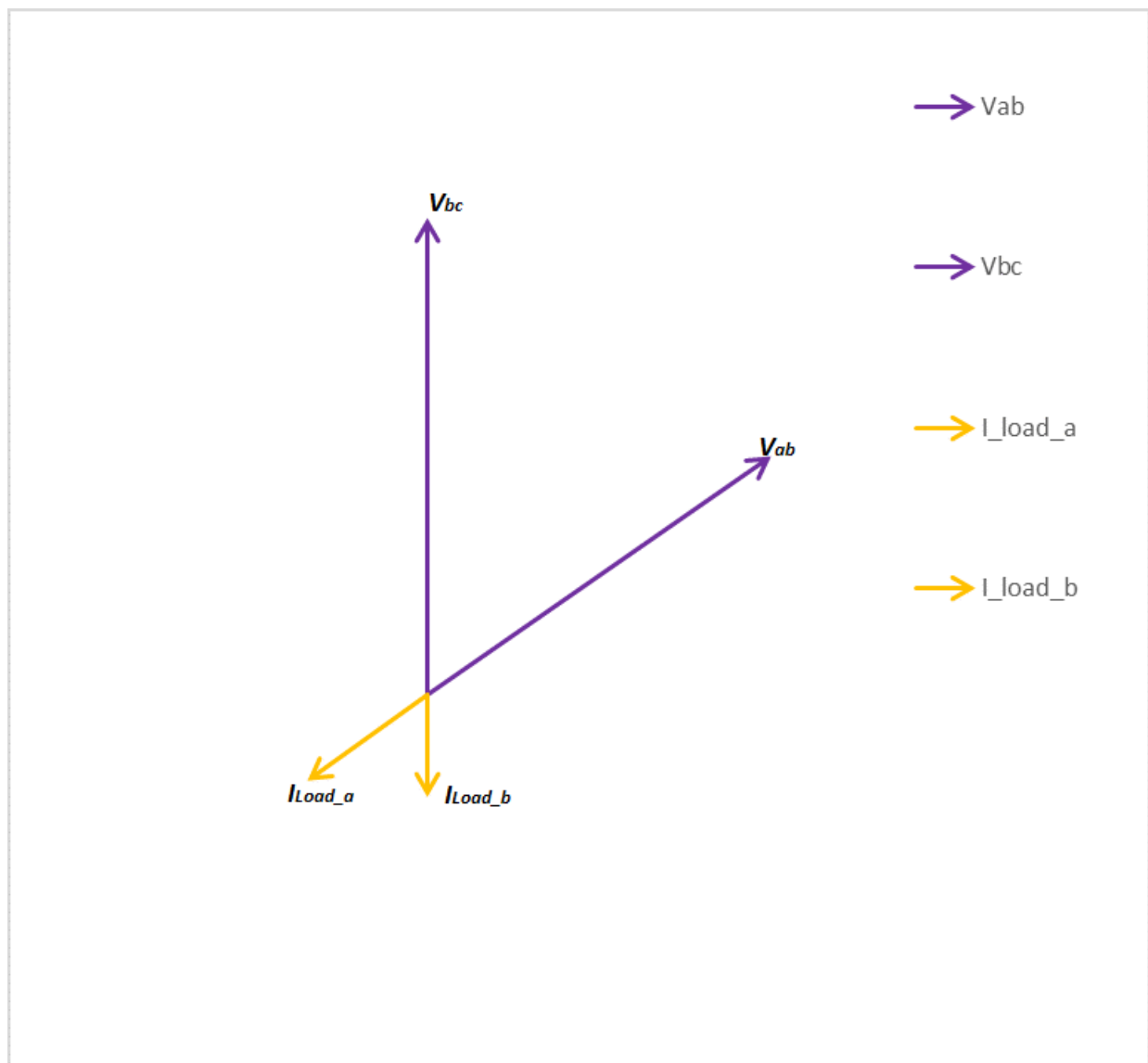
Εικόνα 3.11: Φόρτιση στο πρωτεύον με συντελεστή ισχύος φορτίου διάφορο του 1, μετά την λειτουργία του μετατροπέα

3.1.4 Επιστροφή ισχύος στο δίκτυο

Το ενδεχόμενο αυτό υπάρχει κατά την πέδηση ενός ή και των δύο αμαξοστοιχιών που εξυπηρετούνται από έναν υποσταθμό. Τότε αναπτύσσεται ρεύμα πέδης, του οποίου η φάση είναι παραπληρωματική σε σχέση με τη φάση του ρεύματος του αντίστοιχου φορτίου στην επιτάχυνση της αμαξοστοιχίας.

Έστω ότι και οι δύο αμαξοστοιχίες επιβραδύνουν ταυτόχρονα. Στην περίπτωση αυτή επιδίωξη μας είναι τα ρεύματα του δευτερεύοντος, άρα και του πρωτεύοντος, να είναι συμμετρικά και αντίθετα προς τις τάσεις, ούτως ώστε να επιτευχθεί η επιστροφή ισχύος από τη διάταξη μας στο δίκτυο. Θεωρούμε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος των φορτίων, και ότι το ρεύμα πέδησης δεν ξεπερνάει το 0.5 του ονομαστικού του φορτίου.

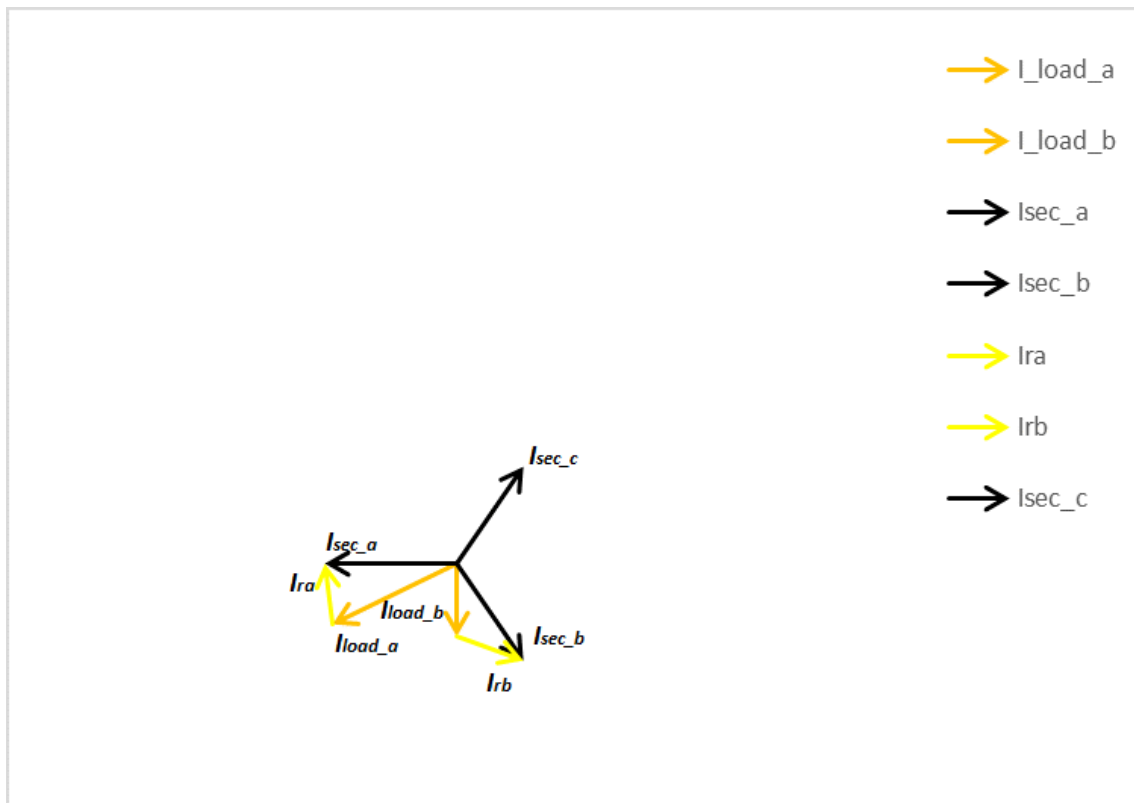
Βλέπουμε παρακάτω τι συμβαίνει στα φορτία:



Εικόνα3.12: Τάσεις και ρεύματα φορτίων κατά την πέδηση για $I_{Load_a}=-0,3\alpha.\mu.$ και $I_{Load_b}=-0,4\alpha.\mu.$

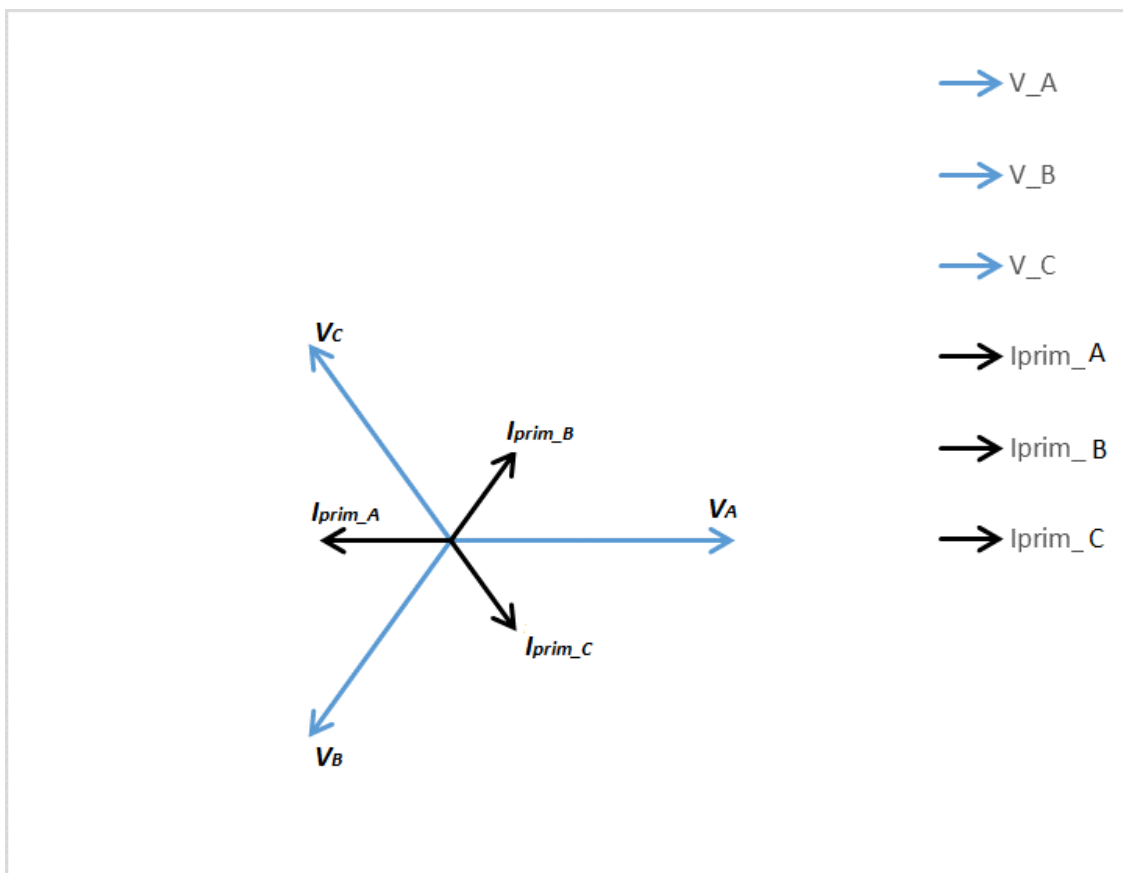
Εφαρμόζοντας την παραπάνω μέθοδο για την προβολή των ρευμάτων στους άξονες του συμμετρικού τριφασικού συστήματος τάσεων, προκύπτουν επίσης συμμετρικά ρεύματα στο πρωτεύον. Καταλαβαίνουμε ότι αυτή τη φορά τα τελικά ρεύματα που θα προκύψουν στο πρωτεύον του Μ/Σ θα έχουν ίδια διεύθυνση με τις τάσεις του δικτύου αλλά αντίθετη φορά. Θα έχουμε ως εκ τούτου επιστροφή ισχύος στο δίκτυο.

Η εικόνα του δευτερεύοντος του Μ/Σ με την επίδραση των ρευμάτων αντιστάθμισης φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 3.13: Ρεύματα αντιστάθμισης και ρεύματα δευτερεύοντος

Εφόσον, ο Μ/Σ ανοιχτού τριγώνου, δεν εισάγει στροφή στους φάσορες των ρευμάτων, τα ρεύματα του πρωτεύοντος θα έχουν το ίδιο όρισμα με τα I_{sec_a} , I_{sec_b} , I_{sec_c} . Η επιτευχθείσα φόρτιση φαίνεται στο παρακάτω διανυσματικό διάγραμμα.



Εικόνα 3.14: Φόρτιση στο πρωτεύον, στην περίπτωση επιστροφής ισχύος στο δίκτυο μετά την λειτουργία του μετατροπέα

Παρατηρούμε ότι λόγω γεωμετρικής συμμετρίας, τα ρεύματα του μετατροπέα είναι ακριβώς αντίθετα από ότι προηγουμένως.

Για τους αναλυτικούς τους τύπους ισχύουν οι σχέσεις (3.13) και (3.14). Οι τύποι αυτοί είναι ευαίσθητοι ως προς το πρόσημο, συνεπώς μπορούμε να βάλουμε αρνητική την rms τιμή των ρευμάτων που είναι αντίθετα από τις τάσεις των φορτίων.

3.2 Τοπολογία μετασχηματιστή Αστέρα-Τρίγωνο (Δ-Υ)

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, αρχικά θεωρούμε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος στα φορτία. Στη συνέχεια η μέθοδος γενικεύεται, και για άλλες γωνίες φορτίου, κοντά στις προδιαγραφές των αμαξοστοιχιών καθώς και για τις συνθήκες αναγεννητικής πέδησης. Επίσης θεωρούμε ιδανικό μετασχηματιστή.

3.2.1 Σύστημα χωρίς αντιστάθμιση

Όπως προκύπτει από την ανάλυση στο κομμάτι 2.2, η τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή άρα και στα άκρα των φορτίων είναι

$$\begin{aligned}\vec{V}_{Load_a} &= \sqrt{3} * \tilde{V}_{sec} e^{j60^\circ} \\ \vec{V}_{Load_b} &= \sqrt{3} * \tilde{V}_{sec} e^{j120^\circ}\end{aligned}\quad (3.15)$$

Επομένως τα ρεύματα των φορτίων (δηλαδή των φάσεων του δευτερεύοντος, άρα των τυλιγμάτων του αστέρα) είναι :

$$\begin{aligned}\vec{I}_{Load_a} &= \frac{\sqrt{3} * \tilde{V}_{sec}}{Z_{La}} e^{j60^\circ} \\ \vec{I}_{Load_b} &= \frac{\sqrt{3} * \tilde{V}_{sec}}{Z_{Lb}} e^{j120^\circ}\end{aligned}\quad (3.16)$$

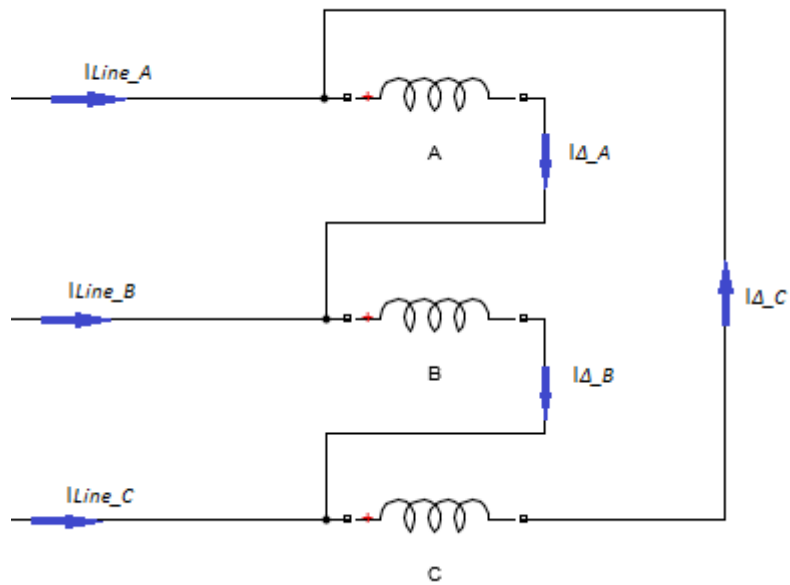
Το ρεύμα δευτερεύοντος προκύπτει $\vec{I}_{sec} = -\vec{I}_{Load_a} - \vec{I}_{Load_b}$.

Επομένως τα ρεύματα αυτά στα τυλίγματα του αστέρα στο δευτερεύον, προκαλούν στο πρωτεύον αντίστοιχα ρεύματα στα τυλίγματα του τριγώνου. Είναι δηλαδή $\dot{I}_{\Delta_A} = \frac{\dot{I}_{Load_a}}{K_v}$, $\dot{I}_{\Delta_B} = \frac{\dot{I}_{Load_b}}{K_v}$, $\dot{I}_{\Delta_C} = \frac{\dot{I}_{sec_c}}{K_v}$.

Άρα για τα ρεύματα γραμμής του πρωτεύοντος, που στην ουσία είναι η τροφοδοσία από το δίκτυο ισχύει:

$$\begin{aligned}\vec{I}_{Line_A} &= -\vec{I}_{\Delta_C} - \vec{I}_{\Delta_A} \\ \vec{I}_{Line_B} &= -\vec{I}_{\Delta_A} - \vec{I}_{\Delta_B} \\ \vec{I}_{Line_C} &= -\vec{I}_{\Delta_B} - \vec{I}_{\Delta_B}\end{aligned}\quad (3.17)$$

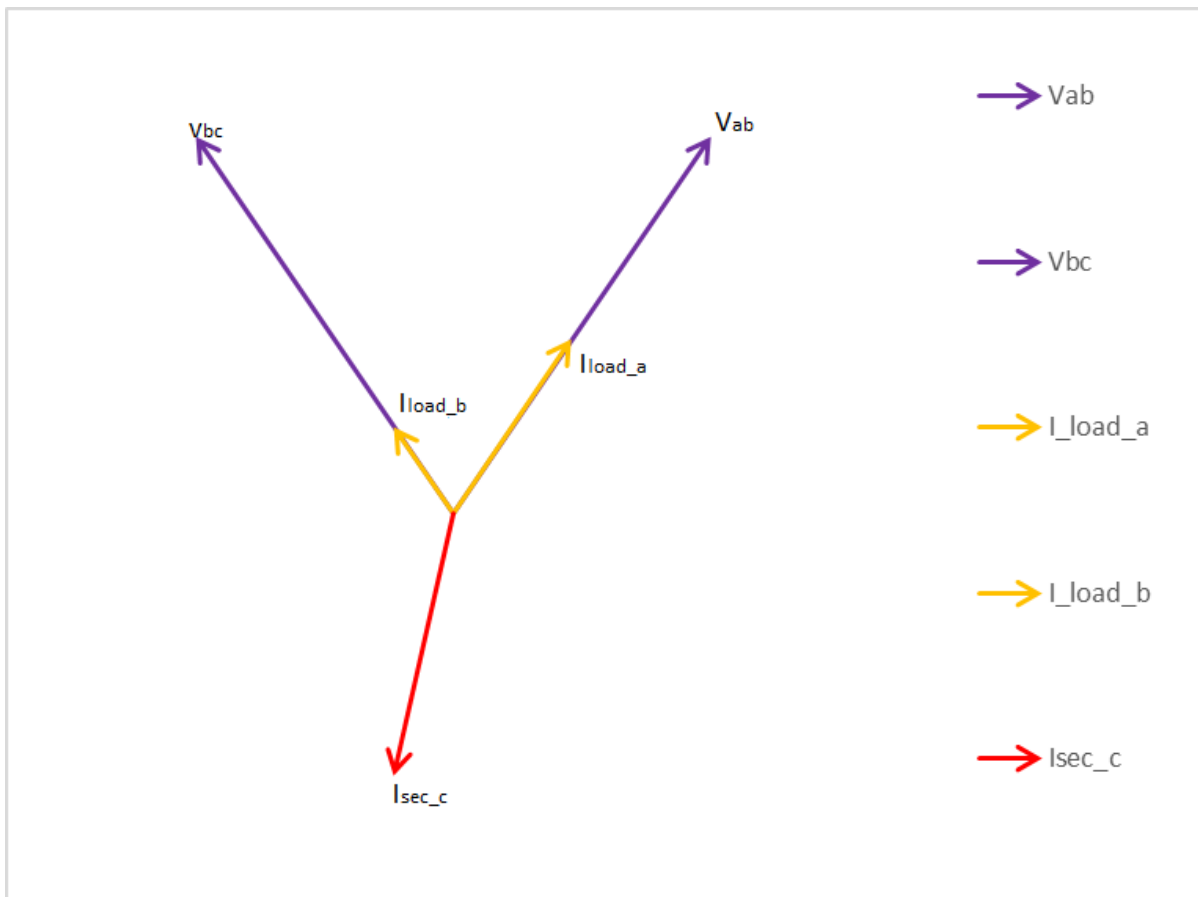
Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 3.15: Ρεύματα γραμμής δικτύου και πρωτεύοντος μετασχηματιστή

Επομένως καταλαβαίνουμε ότι αν δεν υπάρχει τριφασική συμμετρία στο δευτερεύον, δεν θα υπάρχει ούτε στο τρίγωνο του πρωτεύοντος, ούτε στα ρεύματα γραμμής του δικτύου.

Το παρακάτω διανυσματικό διάγραμμα μας δίνει την εικόνα της ασυμμετρίας στο δευτερεύον, όταν δεν γίνεται χρήση του μετατροπέα.



Εικόνα 3.16: Φόρτιση στο δευτερεύον, χωρίς τη χρήση του μετατροπέα για $I_{load_a}=0,4\text{ α.μ.}$, $I_{load_b}=0,2\text{ α.μ.}$

Για να αντιμετωπιστεί η ασυμμετρία πρέπει, όπως καταλαβαίνουμε τα ρεύματα των τυλιγμάτων του δευτερεύοντος να είναι ίσα κατά μέτρο, με διαφορά φάσης 120° μεταξύ τους και στραμμένα κατά 30° σε σχέση με τις τάσεις του δικτύου, να ικανοποιούν δηλαδή την αλληλουχία $30^\circ, 150^\circ, 270^\circ$. Το κοινό τους μέτρο προκύπτει πάλι από το ενεργειακό ισοζύγιο.

$$P_p = P_s = P_{Load} = P_{Load_a} + P_{Load_b} \Rightarrow 3 * \frac{\tilde{V}_{sec}}{\sqrt{3}} * \tilde{I}_{Line} = \sqrt{3} * \tilde{V}_{sec} * \tilde{I}_{Load_a} + \sqrt{3} * \tilde{V}_{sec} * \tilde{I}_{Load_b} \Rightarrow$$

$$3 * \frac{\tilde{V}_{prim}}{\sqrt{3}} * \tilde{I}_\Delta * \sqrt{3} = \sqrt{3} * \tilde{V}_{sec} * (\tilde{I}_{Load_a} + \tilde{I}_{Load_b}) \Rightarrow \frac{\tilde{V}_{prim}}{\tilde{V}_{sec}} * \tilde{I}_\Delta = \frac{\sqrt{3}}{3} * (\tilde{I}_{Load_a} + \tilde{I}_{Load_b}) \Rightarrow$$

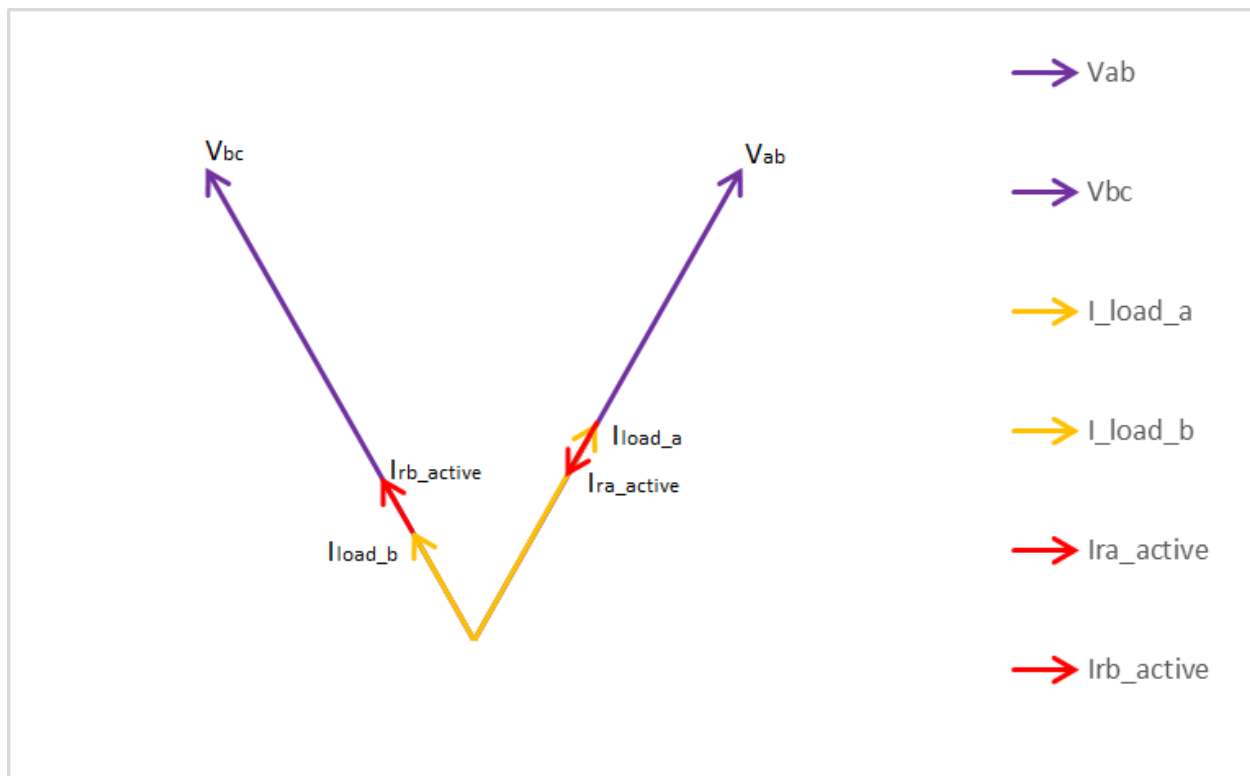
$$\tilde{I}_{sec} = \frac{1}{\sqrt{3}} (\tilde{I}_{Load_a} + \tilde{I}_{Load_b}) \quad (3.18)$$

3.2.2 Απαιτήσεις λειτουργίας του μετατροπέα.

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση του μετασχηματιστή ανοιχτού τριγώνου έτσι κι εδώ, με τη χρήση του μετατροπέα, θα κάνουμε το φορτίο να φαίνεται συμμετρικό. Η παρεχόμενη συμμετρική τριφασική ισχύς θα κατανέμεται κατάλληλα από τον μετατροπέα στα φορτία. Πιο συγκεκριμένα για να αποκαταστήσουμε την ασυμμετρία θα περιστρέψουμε τα ρεύματα των φορτίων και θα αλλάξουμε το μέτρο τους κατάλληλα. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας συνιστώσας ενεργού, και μιας συνιστώσας αέργου ρεύματος.

3.2.2.1 Συνιστώσα ενεργού ρεύματος

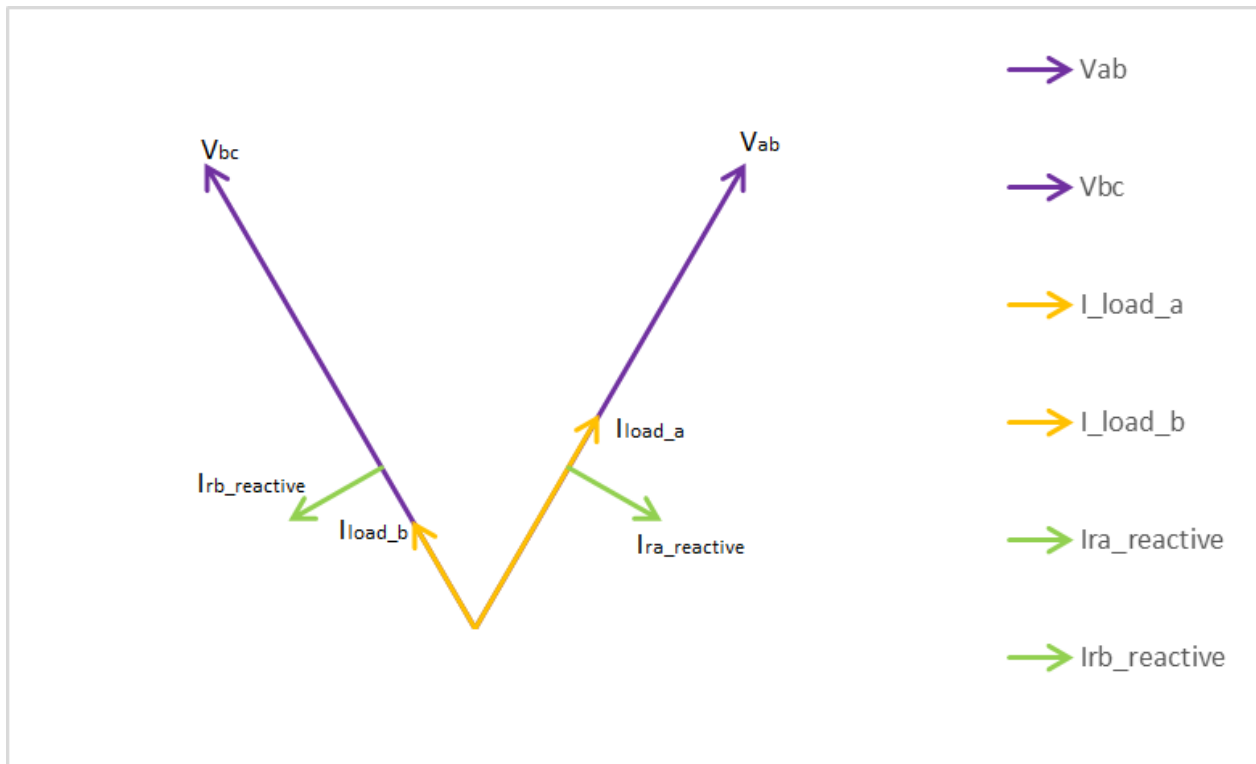
Η συνιστώσα αυτή εξισώνει τα μέτρα των ρευμάτων των δύο φάσεων στο ημίθροισμα τους. Έχει δηλαδή rms τιμή $\tilde{I}_{active} = \frac{1}{2} (\tilde{I}_{Load_a} - \tilde{I}_{Load_b})$ ούτως ώστε $\tilde{I}_{Load_a}' = \tilde{I}_{Load_a} - \tilde{I}_{active} = \tilde{I}_{Load_a}' = \tilde{I}_b + \tilde{I}_{active}$. Η γωνία των ενεργών ρευμάτων είναι ίδια ή παραπληρωματική με αυτή των ρευμάτων των φάσεων.



Εικόνα 3.17: Ενεργά ρεύματα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή

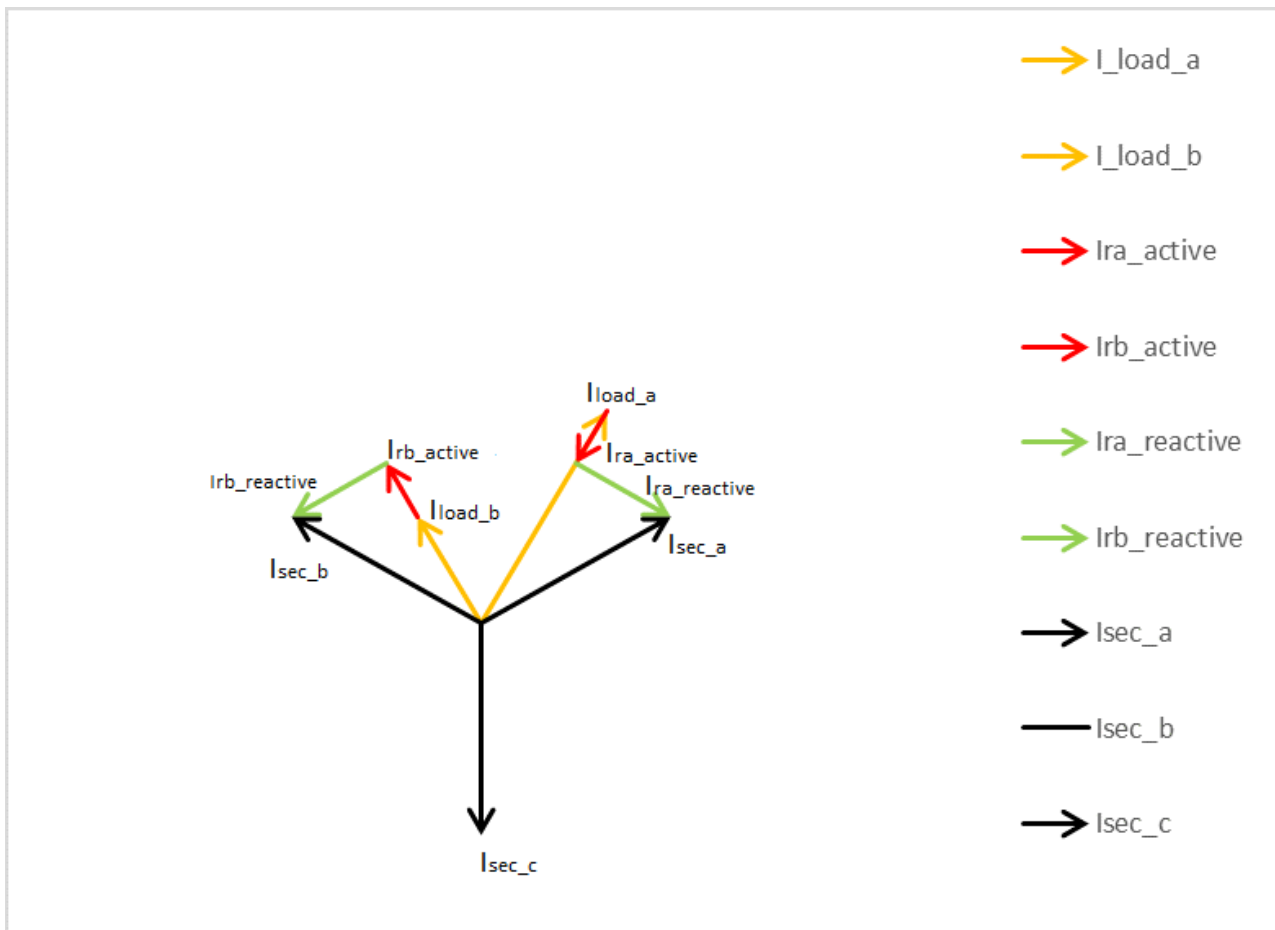
3.2.2.2 Συνιστώσα άεργου ρεύματος

Η συνιστώσα αυτή πάλι στρέφει τα ρεύματα που προέκυψαν από την προηγούμενη διαδικασία κατά 30° ώστε να έρθουν στις κατάλληλες γωνίες 30 και 150° . Είναι κάθετη στα I_a' και I_b' αντίστοιχα και στις αντίστοιχες τάσεις. Η rms τιμή της είναι όπως προκύπτει από τη γεωμετρία του διανυσματικού διαγράμματος $\tilde{I}_{active} = \frac{1}{2} (\tilde{I}_{load_a} + \tilde{I}_{load_b}) * \tan 30^\circ$



Εικόνα 3.18: Άεργα ρεύματα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή

Παρακάτω απεικονίζεται η συνολική επίδραση των εν λόγω ρευμάτων στα ρεύματα του μετασχηματιστή.

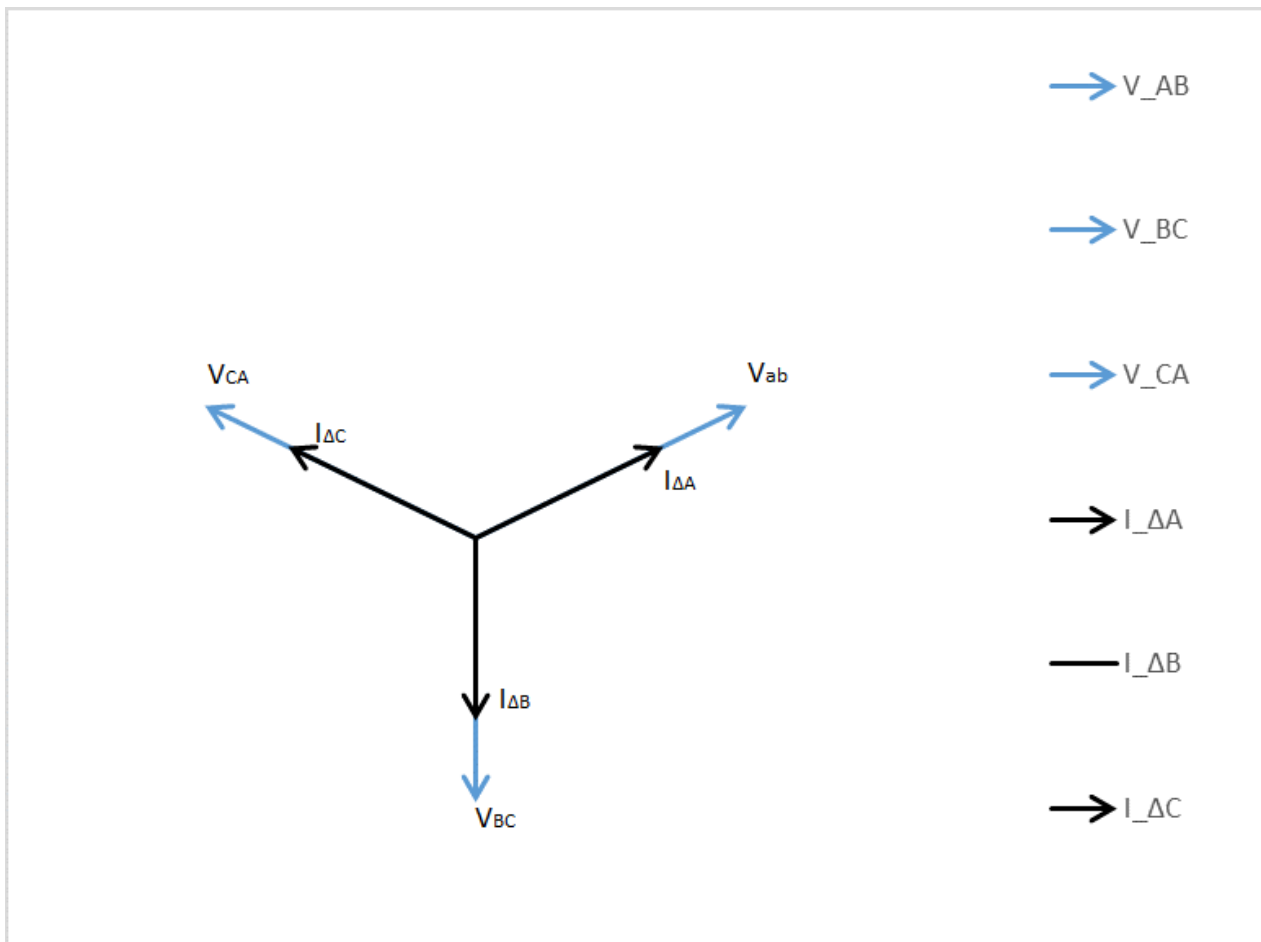


Εικόνα 3.19: Φόρτιση στο δευτερεύον με συντελεστή ισχύος φορτίου 0, μετά την λειτουργία του μετατροπέα

Από το νόμο ρευμάτων του Kirchhoff $\vec{I}_{sec_a} = \vec{I}_{r_a} + \vec{I}_{Load_a}$ και $\vec{I}_{sec_b} = \vec{I}_{r_b} + \vec{I}_{Load_b}$ προκύπτουν τα ρεύματα του μετατροπέα:

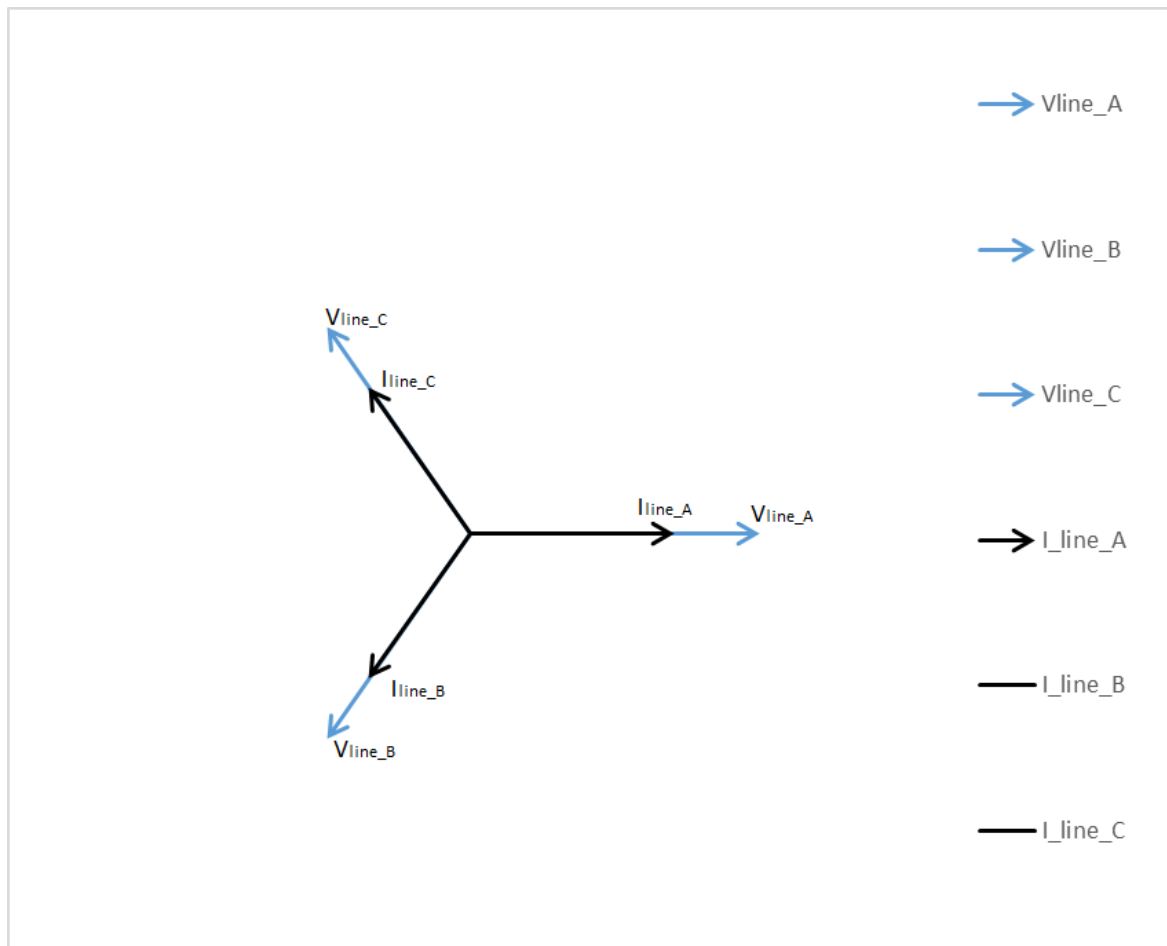
$$\begin{aligned} \vec{I}_{r_a} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\tilde{I}_{Load_a} + \tilde{I}_{Load_b}) e^{j30^\circ} - \tilde{I}_{Load_a} e^{j60^\circ} \\ \vec{I}_{r_a} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\tilde{I}_{Load_a} + \tilde{I}_{Load_b}) e^{j150^\circ} - \tilde{I}_{Load_b} e^{j120^\circ} \quad (3.19) \end{aligned}$$

Ως εκ τούτου, η φόρτιση στο τρίγωνο του πρωτεύοντος είναι πλέον συμμετρική τριφασική όπως φαίνεται στο παρακάτω διανυσματικό διάγραμμα:



Εικόνα 3.20: Φόρτιση στο τρίγωνο του πρωτεύοντος με συντελεστή ισχύος φορτίου 0, μετά την λειτουργία του μετατροπέα

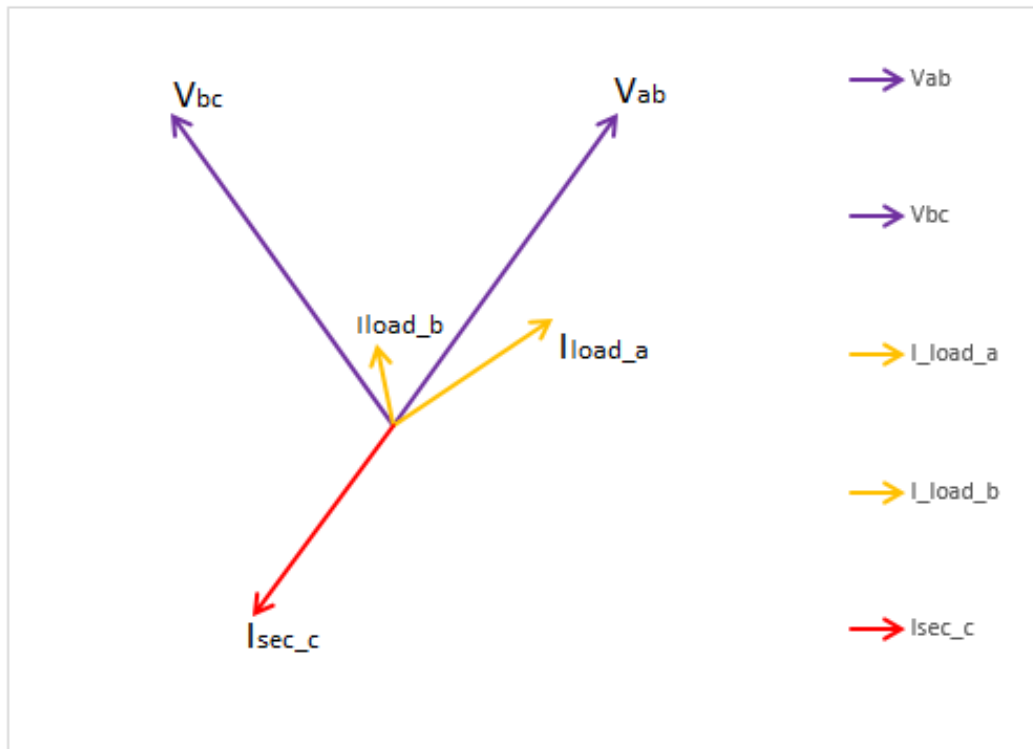
Αυτή η φόρτιση στο τρίγωνο του πρωτεύοντος, μεταφράζεται σε συμμετρική φόρτιση στα ρεύματα γραμμής του δικτύου όπως βλέπουμε παρακάτω:



Εικόνα 3.21: Ρεύματα και τάσεις γραμμής του δικτύου, με συντελεστή ισχύος φορτίου 0, μετά την λειτουργία του μετατροπέα

3.2.3 Γενίκευση μεθόδου για εύρος Συντελεστή Ισχύος φορτίου: 0,8-1 επαγωγικό ($\phi_{Load}=0-36,9$)

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, η μέθοδος γενικεύεται με την εισαγωγή ενός ακόμα άεργου ρεύματος, που προβάλλει το ρεύμα του φορτίου στη γωνία της τάσης στα άκρα του, καθώς αυτό θα υπολείπεται από την τάση κατά ϕ_{Load} . Τα ρεύματα και οι τάσεις των φορτίων φαίνονται παρακάτω (υποθέτουμε ίδιο συντελεστή ισχύος για τις δύο αμαξοστοιχίες που εξυπηρετεί ο υποσταθμός).



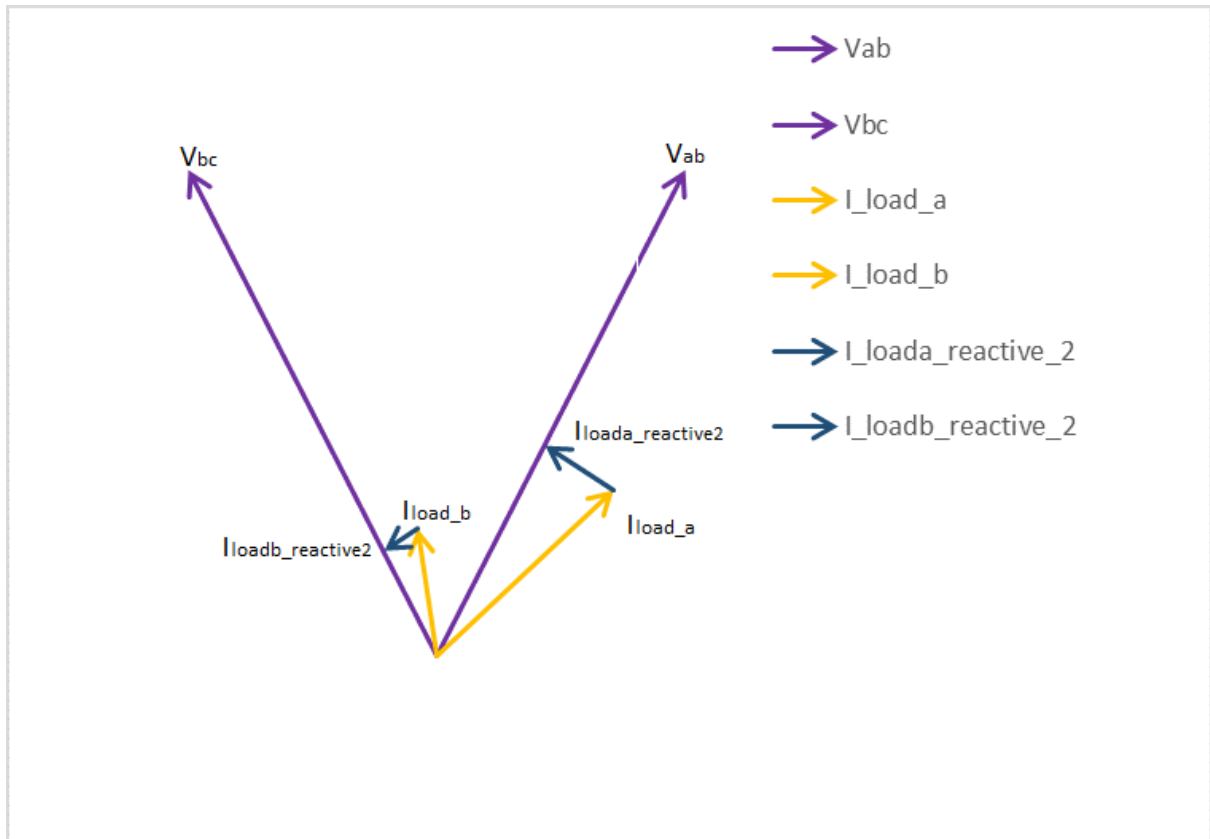
Εικόνα 3.22: Ρεύματα και τάσεις στο δευτερεύον, με συντελεστή ισχύος φορτίου διάφορο του 0, χωρίς τη λειτουργία του μετατροπέα

Όπως και πριν στην περίπτωση του μετασχηματιστή ανοιχτού τριγώνου, υπολογίζουμε τη δεύτερη συνιστώσα άεργου ρεύματος, και θεωρούμε τις ενεργές προβολές των ρευμάτων του φορτίου στην τάση του ($I_{load_a_60}$, $I_{load_b_120}$)

$$\tilde{I}_{Load_a_react2} = \tilde{I}_{Load_a} * \sin \varphi_{load}$$

$$\tilde{I}_{Load_b_react2} = \tilde{I}_{Load_b} * \sin \varphi_{load} \quad (3.20)$$

Η δεύτερη αυτή συνιστώσα του άεργου ρεύματος του μετατροπέα φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα



Εικόνα 3.23: Δεύτερη συνιστώσα άεργου ρεύματος μετατροπέα για Σ.Ι. διάφορο του 1

Στη συνέχεια για αυτές τις προβολές (I_{loada_60} , I_{loadb_120}) θα εφαρμόσουμε την μέθοδο που αναπτύξαμε για συντελεστή ισχύος 0. Στο τελικό αποτέλεσμα που θα δώσουν θα προσθέσουμε τα ρεύματα $I_{loada_reactive2}$ και $I_{loadb_reactive2}$

Η τελική παράσταση των ρευμάτων του μετατροπέα θα είναι:

$$\begin{aligned}\vec{I}_{r_a} &= \vec{I}_{Load_a60_active} + \vec{I}_{Load_a60_reactive} + \vec{I}_{Load_a_rect2} \\ \vec{I}_{r_b} &= \vec{I}_{Load_b150_active} + \vec{I}_{Load_b150_reactive} + \vec{I}_{Load_b150_rect2} \quad (3.21)\end{aligned}$$

Όπως και στην περίπτωση που ο συντελεστής ισχύος ήταν 0 θα διαπιστώσουμε ότι

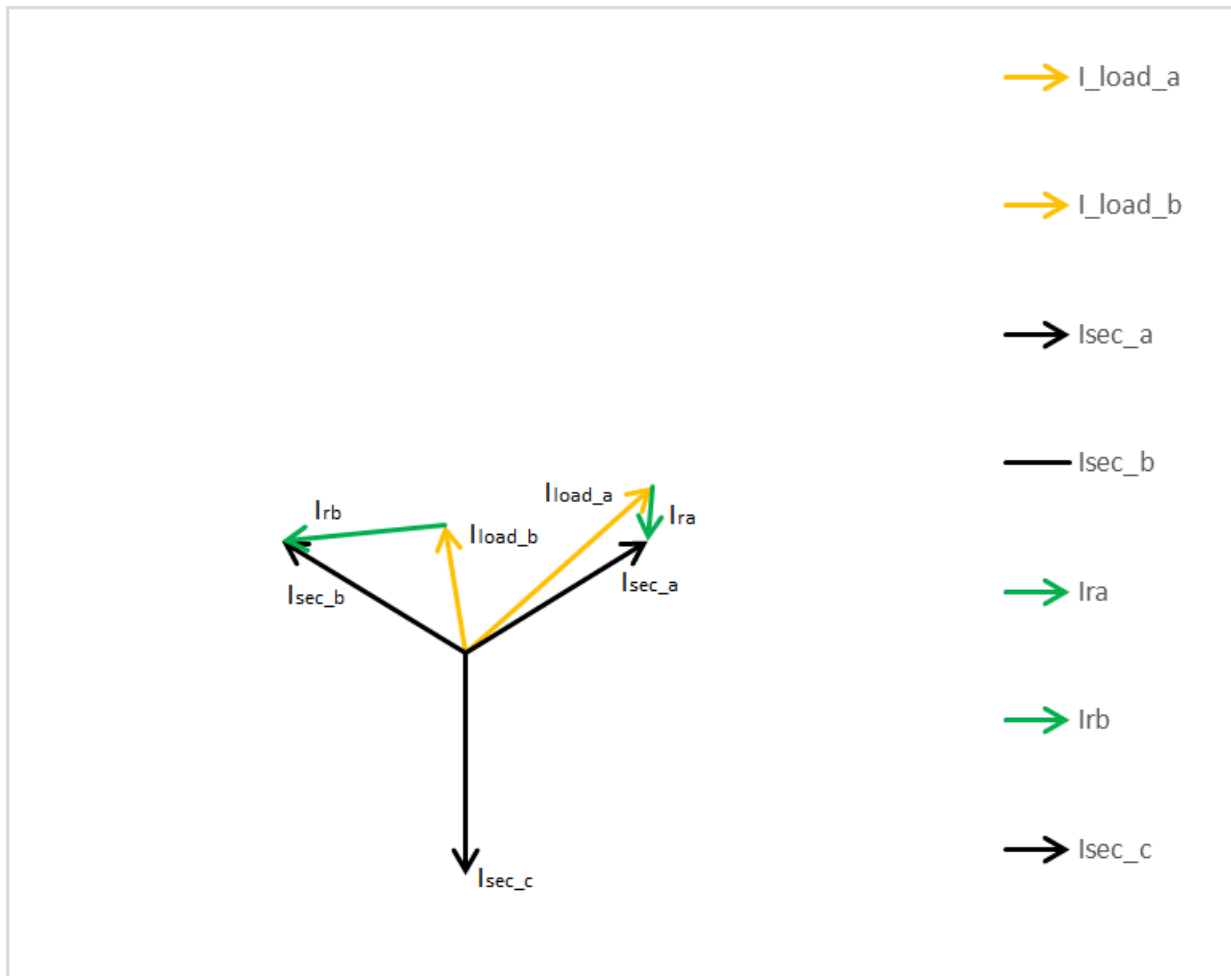
$$\begin{aligned}\vec{I}_{sec_a} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\tilde{I}_{Load_a} + \tilde{I}_{Load_b}) e^{j30^\circ} \\ \vec{I}_{sec_b} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\tilde{I}_{Load_a} + \tilde{I}_{Load_b}) e^{j150^\circ} \quad (3.22)\end{aligned}$$

Οι τύποι (3.19) γενικεύονται ως εξής:

$$\begin{aligned}\vec{I}_{r_a} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{\tilde{I}_{Load_a}}{\cos \varphi_{Load}} + \frac{\tilde{I}_{Load_b}}{\cos \varphi_{Load}} \right) e^{j30^\circ} - \frac{\tilde{I}_{Load_a}}{\cos \varphi_{Load}} e^{j60^\circ} + \tilde{I}_{Load_a} * \sin(\varphi_{Load}) * e^{j150^\circ} \\ \vec{I}_{r_b} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{\tilde{I}_{Load_a}}{\cos \varphi_{Load}} + \frac{\tilde{I}_{Load_b}}{\cos \varphi_{Load}} \right) e^{j150^\circ} - \frac{\tilde{I}_{Load_b}}{\cos \varphi_{Load}} e^{j120^\circ} + \tilde{I}_{Load_b} * \sin(\varphi_{Load}) * e^{j270^\circ} \quad (3.22)\end{aligned}$$

Παρατηρούμε ότι για $\varphi_{Load}=0^\circ$ προκύπτουν οι τύποι (3.19)

Παρακάτω φαίνεται η συνολική επίδραση των άεργων και του ενεργού ρεύματος του μετατροπέα, και τα επιτευχθέντα ρεύματα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή.



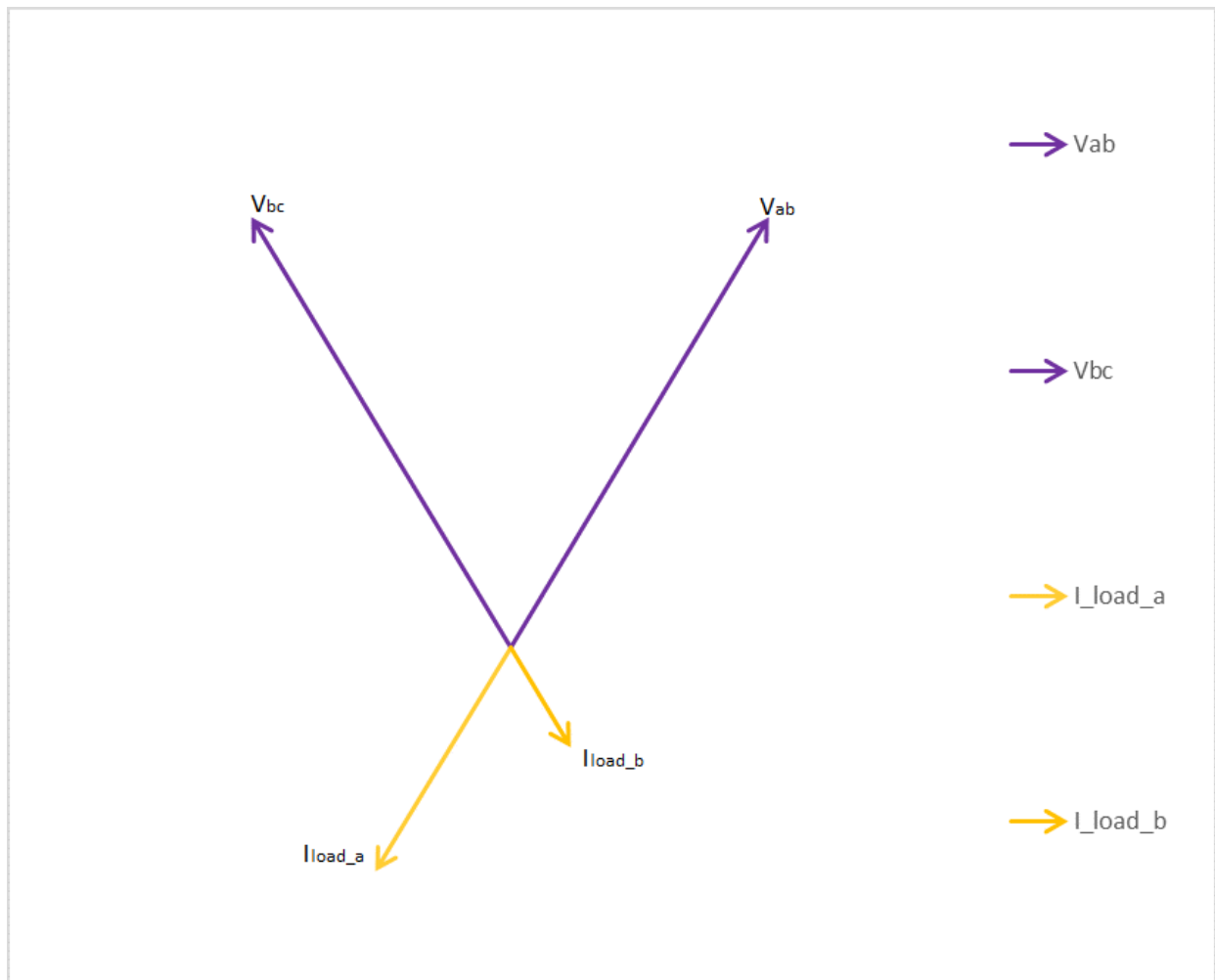
Εικόνα 3.24: Ρεύματα στην πλευρά του δευτερεύοντος του Μ/Σ, για Σ.Ι. διάφορο του 1.

Επετεύχθη συνεπώς η συμμετρική τριφασική φόρτιση μετατοπισμένη κατά 30° στον αστέρα του δευτερεύοντος. Συνεπώς, κατά τα προηγούμενα έχουμε τη ζητούμενη συμμετρική τριφασική φόρτιση στο πρωτεύον και στο δίκτυο.

3.2.4 Επιστροφή ισχύος στο δίκτυο

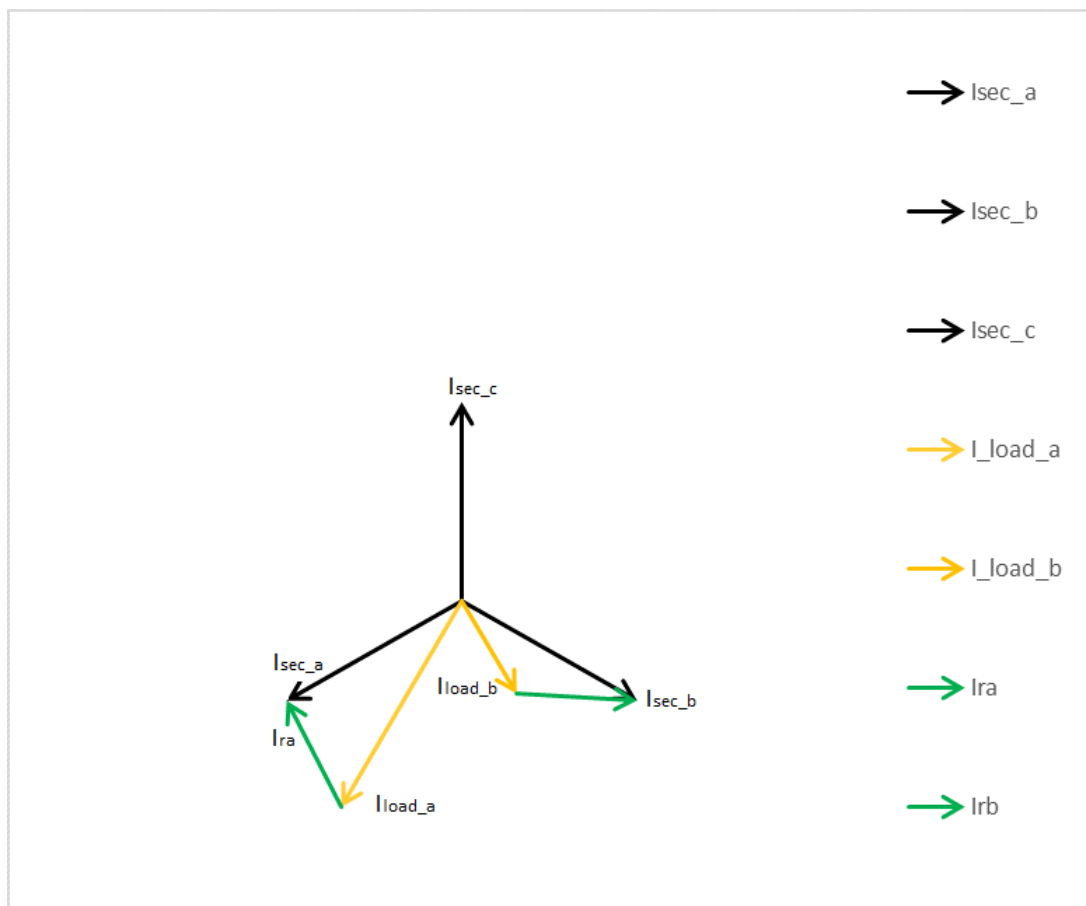
Εξετάζουμε πάλι το ενδεχόμενο, μια από τις δύο ή και οι δύο αμαξιστοίχιες, να επιστρέφουν ισχύ στο δίκτυο μέσω του ρεύματος πέδησης.

Στην περίπτωση που και οι δύο αμαξοστοιχίες επιβραδύνουν ταυτόχρονα, η εικόνα των ρευμάτων και των τάσεων των φορτίων φαίνεται παρακάτω (για μηδενικό Σ.Ι.):



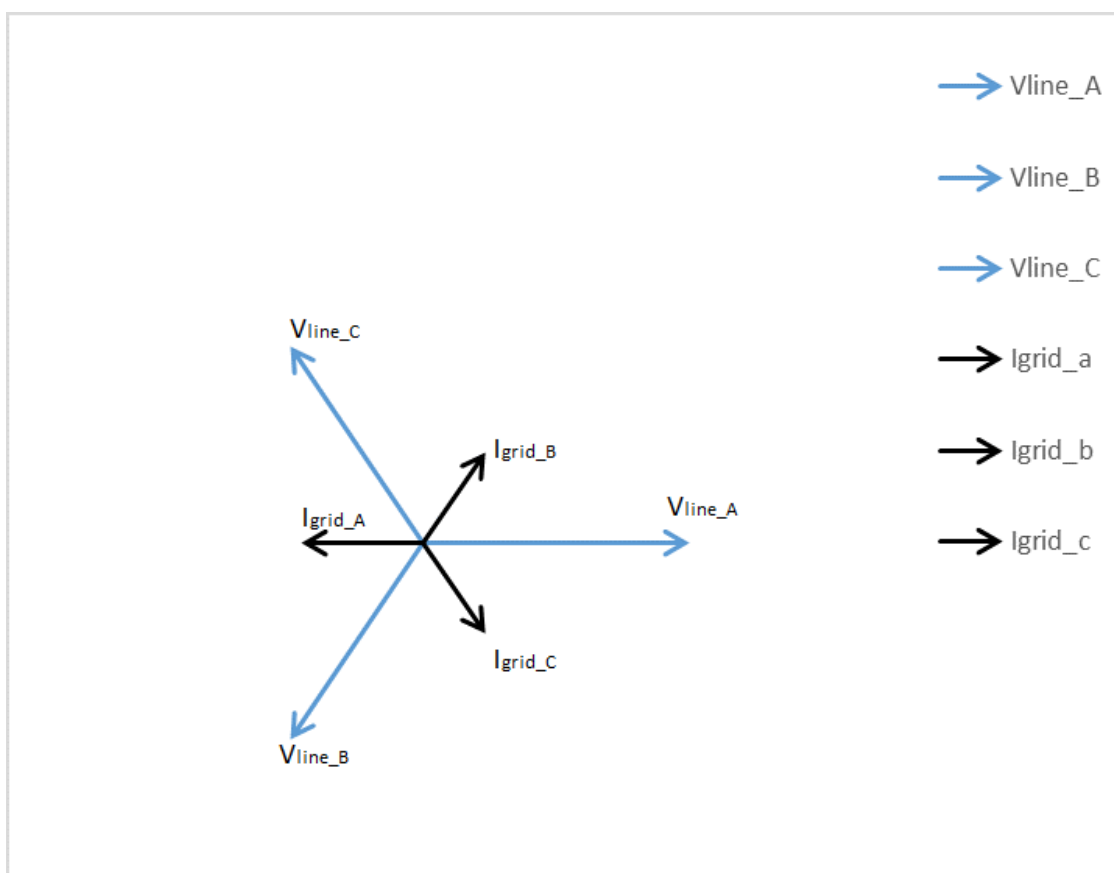
Εικόνα 3.25: Ρεύματα και τάσεις φορτίων για ρεύματα φορτίων $I_{load_a} = -0,5 \text{ α.μ.}$, $I_{load_b} = -0,2 \text{ α.μ.}$

Όπως καταλαβαίνουμε εν προκειμένω, επιζητάμε για το δευτερεύον του Μ/Σ, μια συμμετρική, τριφασική φόρτιση αλληλουχίας $(-150, -30, 90)$. Η στροφή 30° προς τα αριστερά στα ρεύματα γραμμής, που μας δίνει η μετάβαση από το δευτερεύον στο πρωτεύον, θα μας δώσει αλληλουχία $(-180, -60, 60)$ που είναι συμμετρική και αντίθετη με την αλληλουχία $(0, -120, 120)$ του δικτύου. Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει τη ζητούμενη φόρτιση στην περίπτωση μας.



Εικόνα 3.26: Ρεύματα στην πλευρά του δευτερεύοντος του Μ/Σ

Η φόρτιση αυτή στο δευτερεύον μεταφράζεται στο πρωτεύον όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 3.27: Ρεύματα και τάσεις γραμμής του δικτύου

Η φόρτιση αυτή υποδεικνύει την επιστροφή ισχύος στο δίκτυο. Ο υπολογισμός των ζητούμενων ρευμάτων αντιστάθμισης, γίνεται με τους υπάρχοντες τύπους (3.22), χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα πρόσημα για τις ενεργές τιμές των ρευμάτων φορτίων.

Προσομοίωση του συστήματος σε περιβάλλον Simulink

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, αρχικά προσομοιώνεται το πρόβλημα για τις δύο διαφορετικές περιπτώσεις μετασχηματιστών. Σκοπός, είναι να επαληθεύσουμε τις διάφορες καταστάσεις λειτουργίας, όπως περιεγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η προσομοίωση, δέχεται σαν εισόδους τα ρεύματα των φορτίων (ενεργές τιμές και συντελεστή φορτίου), και υπολογίζει τα μεγέθη του κυκλώματος ελέγχου του αντιστροφέα (m_a και τη διαφορά φάσης του ζητούμενου ρεύματος).

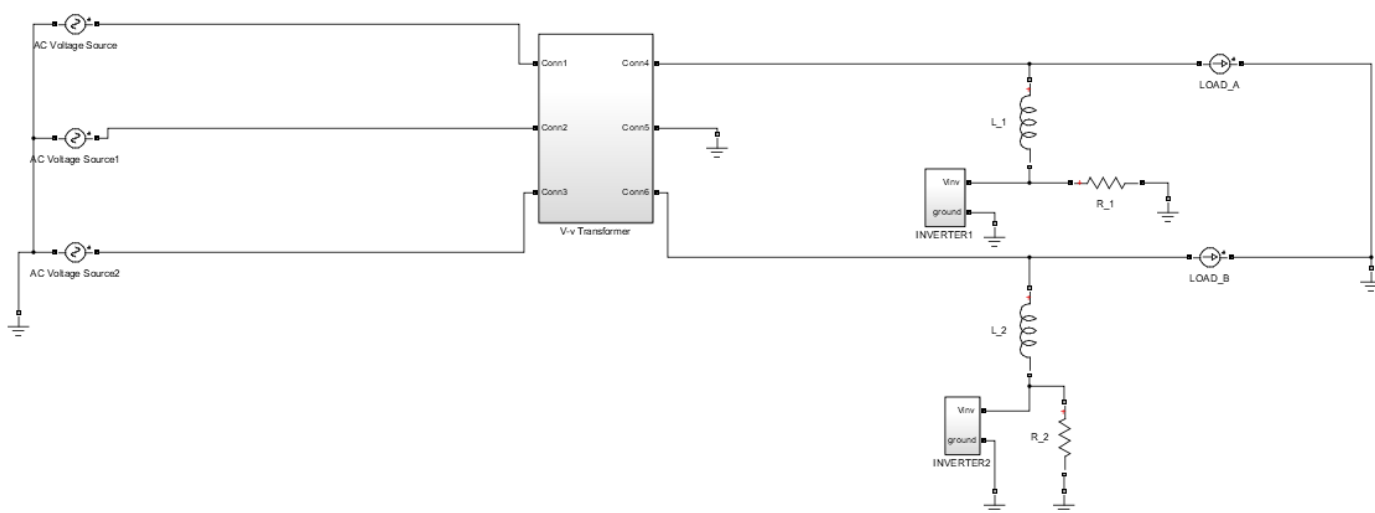
Παρουσιάζονται αποτελέσματα και γραφικές παραστάσεις για τα διάφορα μεγέθη του κυκλώματος, για σημειακή λειτουργία στις διάφορες περιοχές λειτουργίας του. Τέλος παρουσιάζονται γραφικές παραστάσεις μεγεθών σε όλες τις περιοχές λειτουργίας, για να μελετηθεί το πώς διαμορφώνονται, και ποιες είναι οι μέγιστες τιμές τους.

Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο Matlab-Simulink. Οι μετασχηματιστές και οι διακοπτικές συσκευές θεωρήθηκαν ιδανικές. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε, στο ανά μονάδα σύστημα, με βασικά μεγέθη στο δευτερεύον $V_B = 25 \text{ kV}$, $S_B = 20 \text{ MW}$ σαν ενδεικτικά αυτής της κατηγορίας φορτίων. Να σημειωθεί ότι οι τιμές των μεγεθών του πρωτεύοντος, δεν ανταποκρίνονται στο ανά μονάδα σύστημα. Τα μεγέθη του πρωτεύοντος δεν παρουσιάζονται ως προς κάποια βασικά μεγέθη του πρωτεύοντος, αλλά ως με βάση τα ανά μονάδα μεγέθη του δευτερεύοντος, καθώς δεν μας ενδιαφέρει να δούμε τη σχέση αυτών των μεγεθών με τα υπόλοιπα φορτία του υποσταθμού, παρά μόνο τη μεταξύ τους σχέση και συμμετρία. Ως

4.2 Προσομοίωση για το μετασχηματιστή ανοιχτού τριγώνου

4.2.1 Κύκλωμα προσομοίωσης

Το κύκλωμα προσομοίωσης φαίνεται στην Εικόνα 4.2.1.



Εικόνα 4.2.1 Κύκλωμα προσομοίωσης για τον μετασχηματιστή ανοιχτού τριγώνου

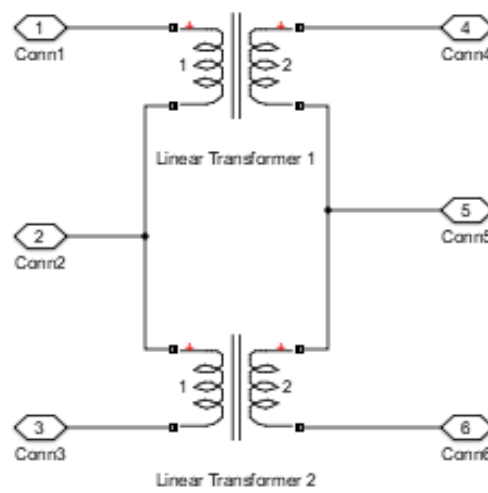
Το δίκτυο αντιπροσωπεύεται από τρεις ιδανικές πηγές εναλλασσόμενης τάσης που συνδέονται στα άκρα του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή.

Οι αμαξοστοιχίες προσομοιώνονται με τις ιδανικές πηγές εναλλασσόμενου ρεύματος Load_a, Load_b στα δεξιά. Η αναπαράσταση αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση, καθώς αναφέρεται στην ΗΜΚ, αγνοώντας τα όποια μεταβατικά φαινόμενα υπάρχουν στο σύστημα και φυσικά αγνοεί και τις αρμονικές που προκαλούν

στο σύστημα οι διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος, τόσο στον υποσταθμό, όσο και στο εσωτερικό των αμαξοστοιχιών (1^ο Κεφάλαιο), ενώ μας δίνει τη δυνατότητα, να συμπεριλάβουμε τη γωνία του φορτίου σαν διαφορά φάσης της ιδανικής πηγής με την τάση στα άκρα της.

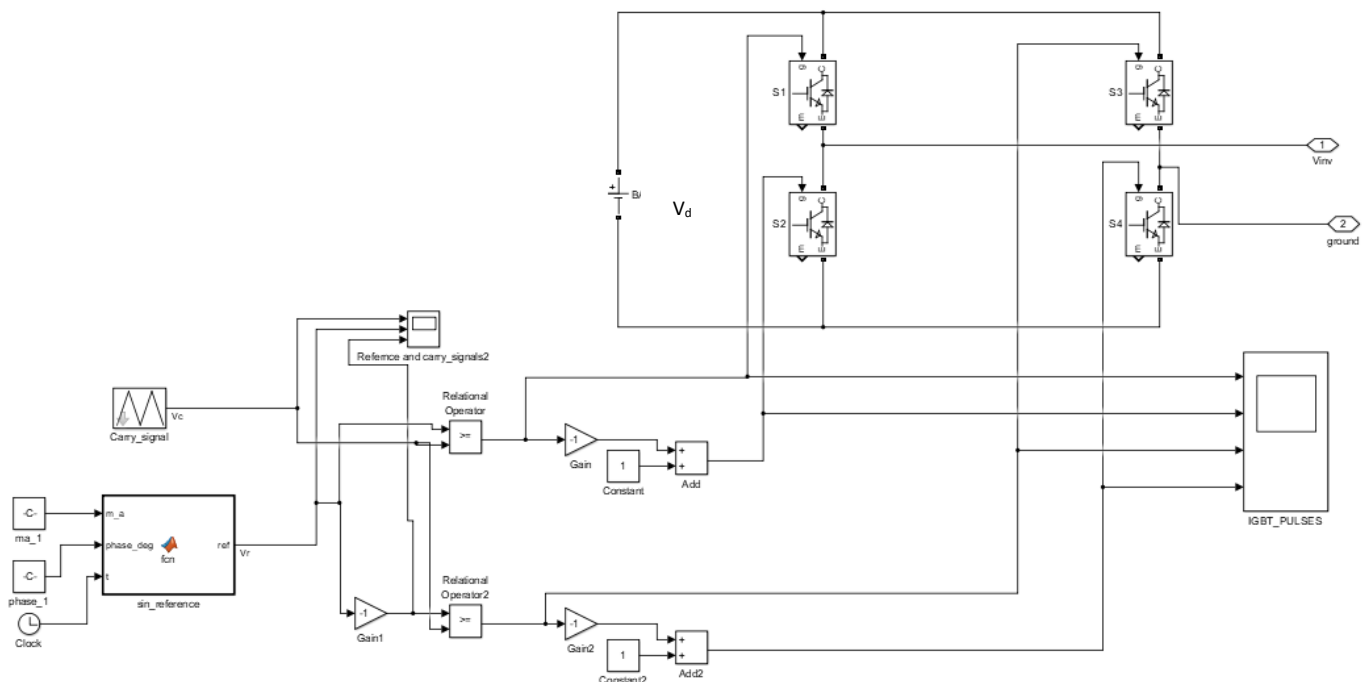
Οι αντιστροφείς, συνδέονται στο σύστημα μέσω επαγωγών $X_1=X_2=0.05$ α.μ. Οι αντιστάσεις που φαίνονται συνδεδεμένες παράλληλα με τους αντιστροφείς (R_1 και R_2) εξυπηρετούν την αρχικοποίηση του ρεύματος των πηνίων. Έχουν πολύ μεγάλη τιμή (1000 α.μ.) οπότε δεν καταναλώνουν ισχύ που να μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα μας.

Το υποσύστημα του μετασχηματιστή φαίνεται παρακάτω. Αποτελείται από δύο ιδανικούς μονοφασικούς μετασχηματιστές συνδεδεμένους σε ανοιχτό τρίγωνο.



Εικόνα 4.2.2: Μετασχηματιστής ανοιχτού τριγώνου

Το υποσύστημα του αντιστροφέα, μαζί με το κύκλωμα ελέγχου του φαίνονται παρακάτω. Ο έλεγχος πραγματοποιείται με την τεχνική SPWM.



Εικόνα 4.2.3: Αντιστροφέας

Οι αναφορές των αντιστροφών, παράγονται με βάση τις εξισώσεις που περιεγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για λόγους απλότητας, οι αντιστροφείς δεν είναι συνδεδεμένοι στην πλευρά συνεχούς, ωστόσο τροφοδοτούνται από ίδιες πηγές συνεχούς τάσης και όπως θα φανεί, επαληθεύεται το ισοζύγιο ενεργούς ισχύος μεταξύ τους. Επίσης για λόγους απλότητας έχουν παραλειφθεί οι μετασχηματιστές διασύνδεσης των αντιστροφών στο σύστημα, ενώ η τάση δικτύου θεωρείται σταθερή και η γωνία γνωστή.

4.2.2 Παραδείγματα

4.2.2.1 Παράμετροι προσομοίωσης

Για τον υπολογισμό των τιμών αναφοράς των μεγεθών της προσομοίωσης χρησιμοποιείται κώδικας στο Matlab (Παράρτημα). Ο κώδικας εκτός από τις εν λόγω παραμέτρους, υπολογίζει όλα τα μεγέθη της διάταξης, rms τιμές και γωνίες τάσεων και ρευμάτων, ισχείς και δίνει μια συνολική εικόνα του συστήματος.

Οι τιμές των παραμέτρων που θα χρησιμοποιήσουμε φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Η συχνότητα του σήματος αναφοράς του αντιστροφέα όπως είναι λογικό είναι η συχνότητα του δικτύου (50Hz).

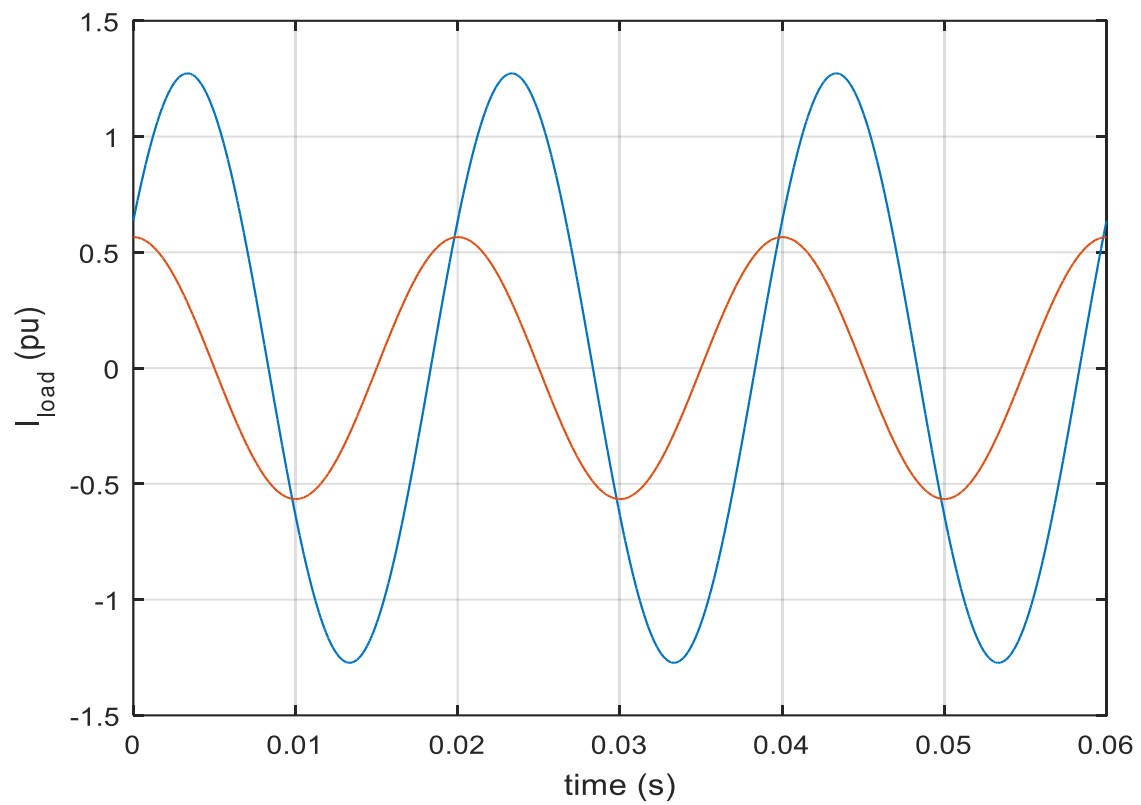
$\tilde{V}_{prim}$	1 α.μ.
L	0.05
R	1000 α.μ.
ϕ_{Load}	0
ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ	
K_v	0.5774
ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ	
A_c	1 V
f_c	1950 Hz
f_a	50 Hz
V_d	1.6 αμ

Πίνακας 4.2.1:Παράμετροι προσομοίωσης

4.2.2.2 Προσομοίωση μόνιμης κατάστασης λειτουργίας των δύο αμαξοστοιχιών.

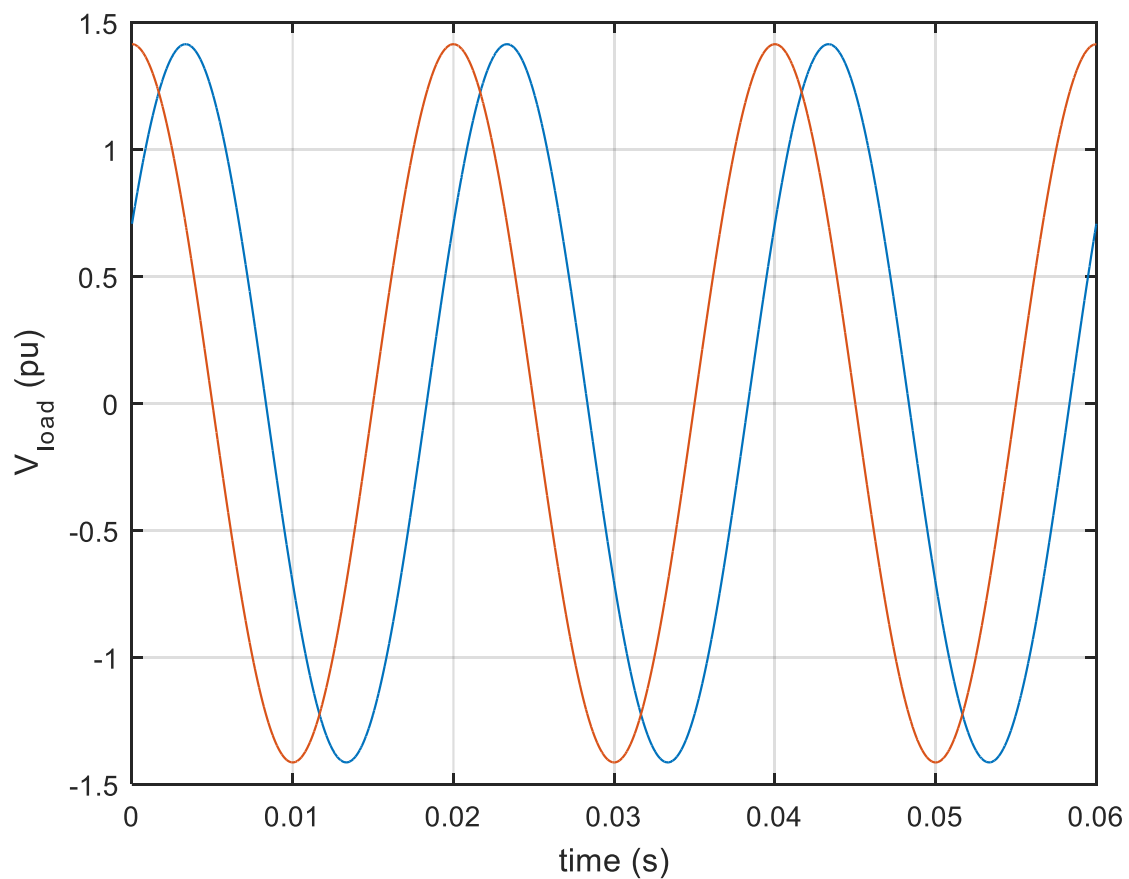
Θα μελετήσουμε ενδεικτικά την περίπτωση, όπου $\tilde{I}_{Load_a}=0.9$ α.μ. και $\tilde{I}_{Load_a}=0.4$ α.μ.

Οι κυματομορφές των ρευμάτων των φορτίων φαίνονται παρακάτω.



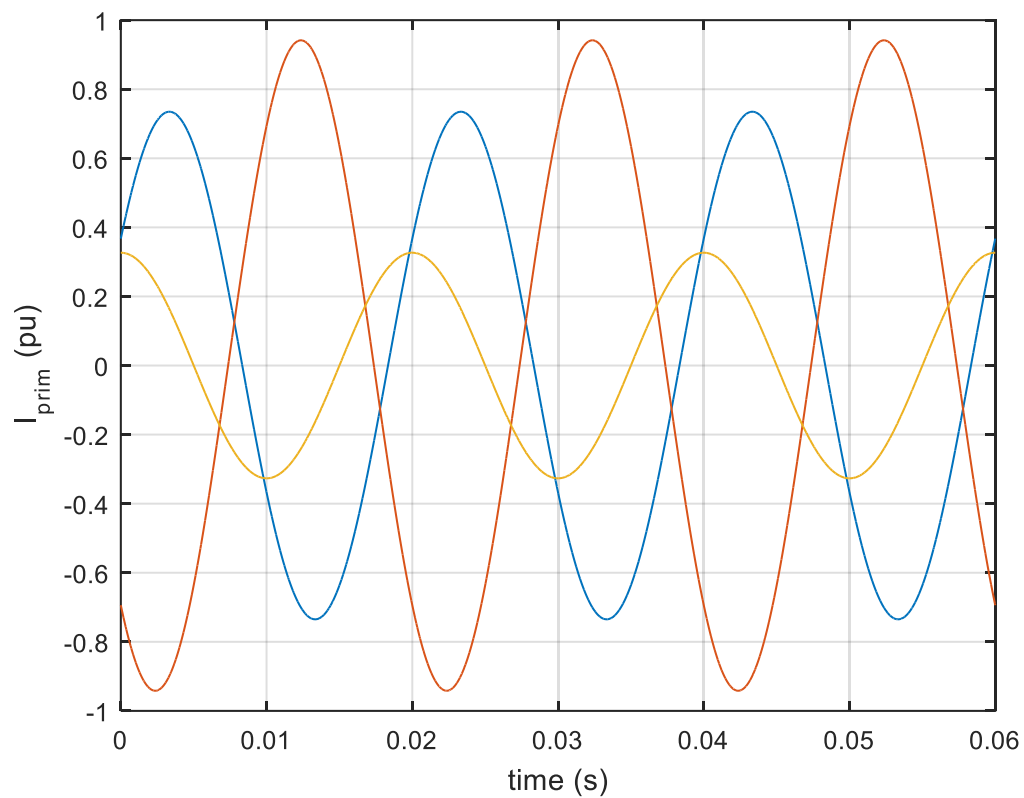
Εικόνα 4.2.1: Ρεύματα φορτίων προσομοίωσης

Όπως είναι λογικό, λόγω του μηδενικού συντελεστή ισχύος είναι συμφασικά με τις τάσεις στα άκρα των φορτίων που φαίνονται παρακάτω και είναι και τάσεις του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή.



Εικόνα 4.2.5: Τάσεις φορτίων, τάσεις στο δευτερεύον του μετασχηματιστή

Αρχικά βλέπουμε την λειτουργία του συστήματος χωρίς τη χρήση της αντιστάθμισης και την έντονη ασυμμετρία που υπάρχει στο πρωτεύον του μετασχηματιστή.



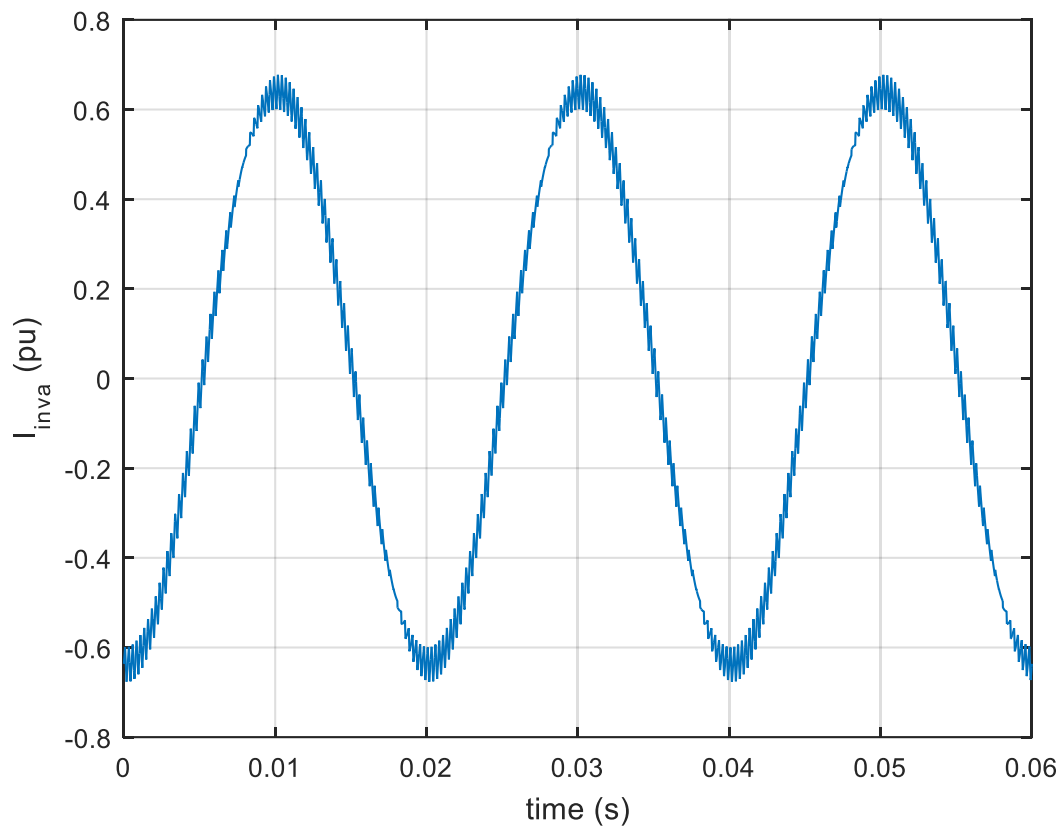
Εικόνα 4.2.6: Ρεύματα πρωτεύοντος χωρίς την εφαρμογή της μεθόδου αντιστάθμισης

Κάνοντας χρήση των εξισώσεων (3.7), (3.8) για την αντιστάθμιση, υπολογίζουμε τις εξής τιμές για τα ρεύματα και τις θεμελιώδεις συνιστώσες των τάσεων των αντιστροφένων.

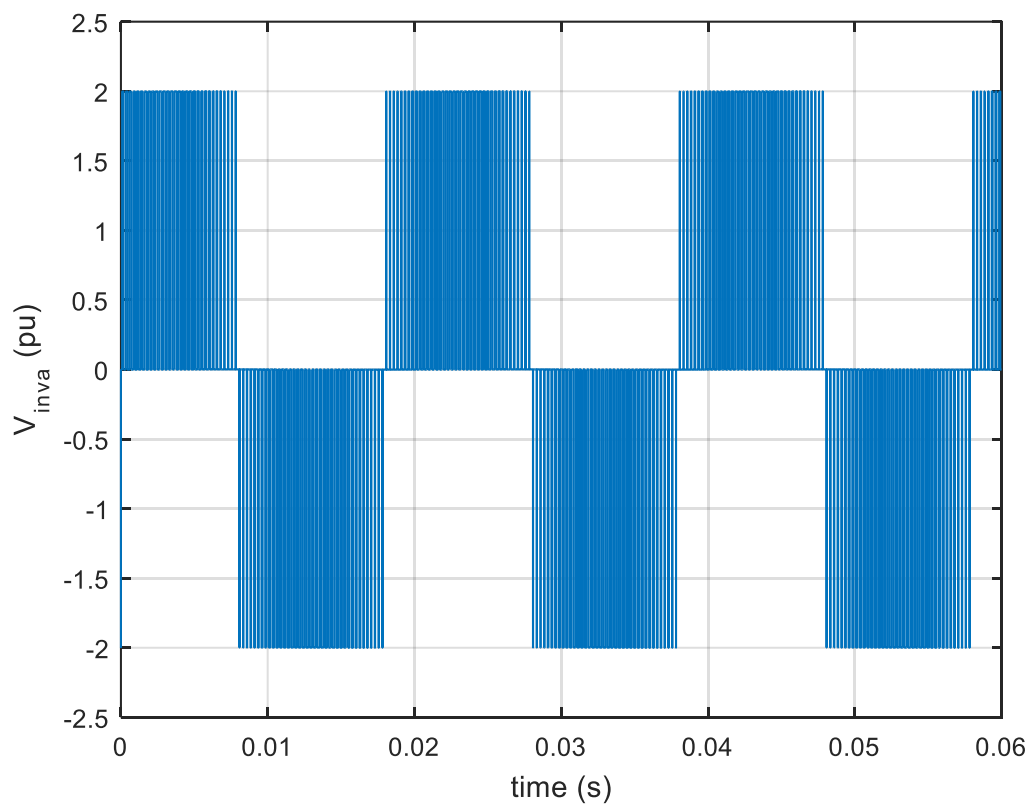
$\dot{I}_{r_a}$	$0.45e^{-j93.7^{\circ}}$
$\dot{I}_{r_b}$	$0.45e^{j146.3^{\circ}}$
$\dot{V}_{inv_a}$	$0.822e^{j38.7^{\circ}}$
$\dot{V}_{inv_b}$	$1.19e^{j83.9^{\circ}}$

Πίνακας 4.2.2: Τιμές ρευμάτων αντιστάθμισης και επιθυμητών τάσεων στην έξοδο των αντιστροφένων

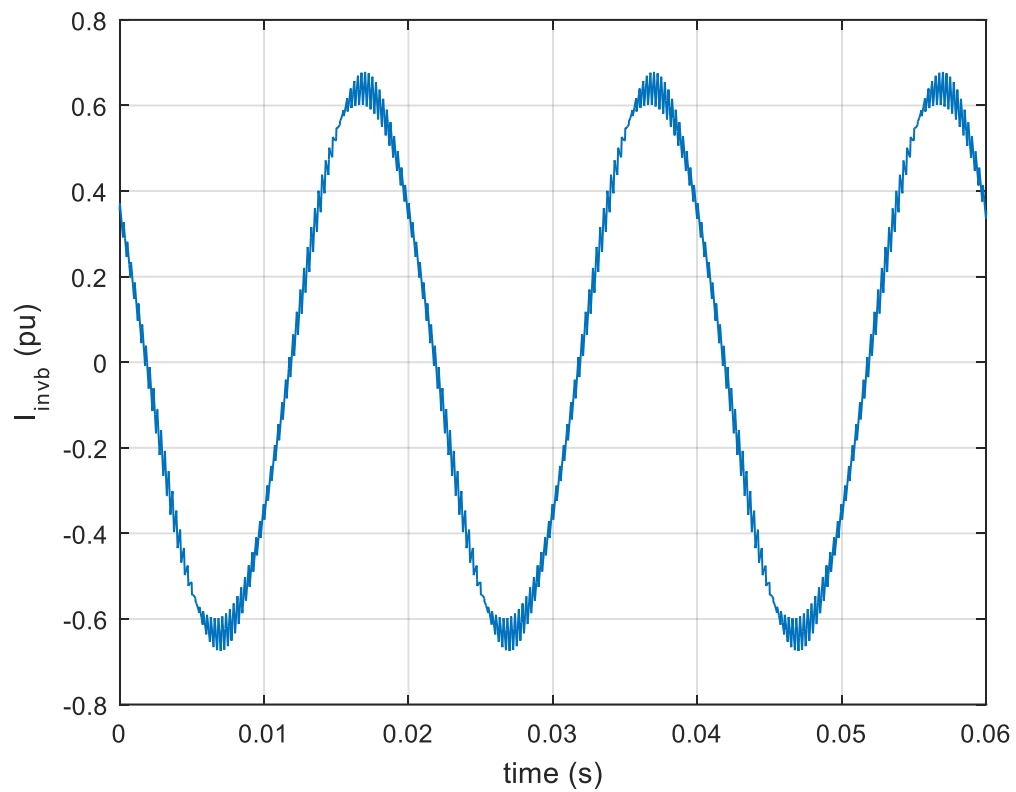
Οι κυματομορφές τους φαίνονται παρακάτω.



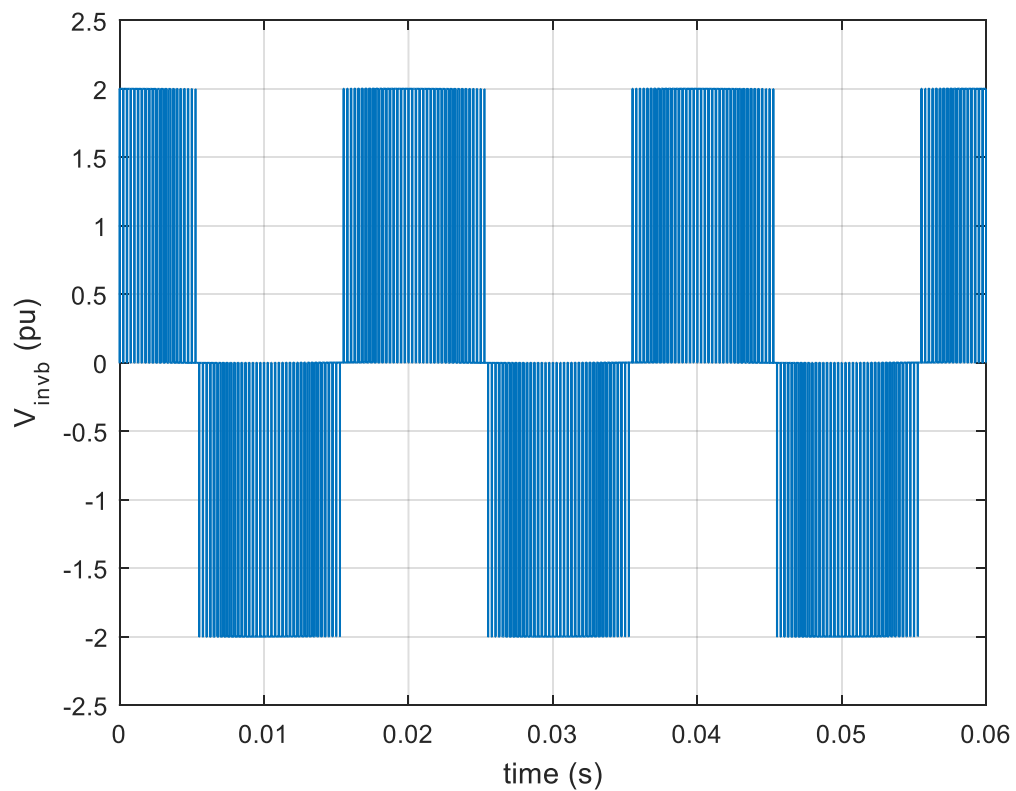
Εικόνα 4.2.7: Ρεύμα που εισέρχεται στον αντιστροφέα Inv_a



Εικόνα 4.2.8: Τάση εξόδου αντιστροφέα Inv_a

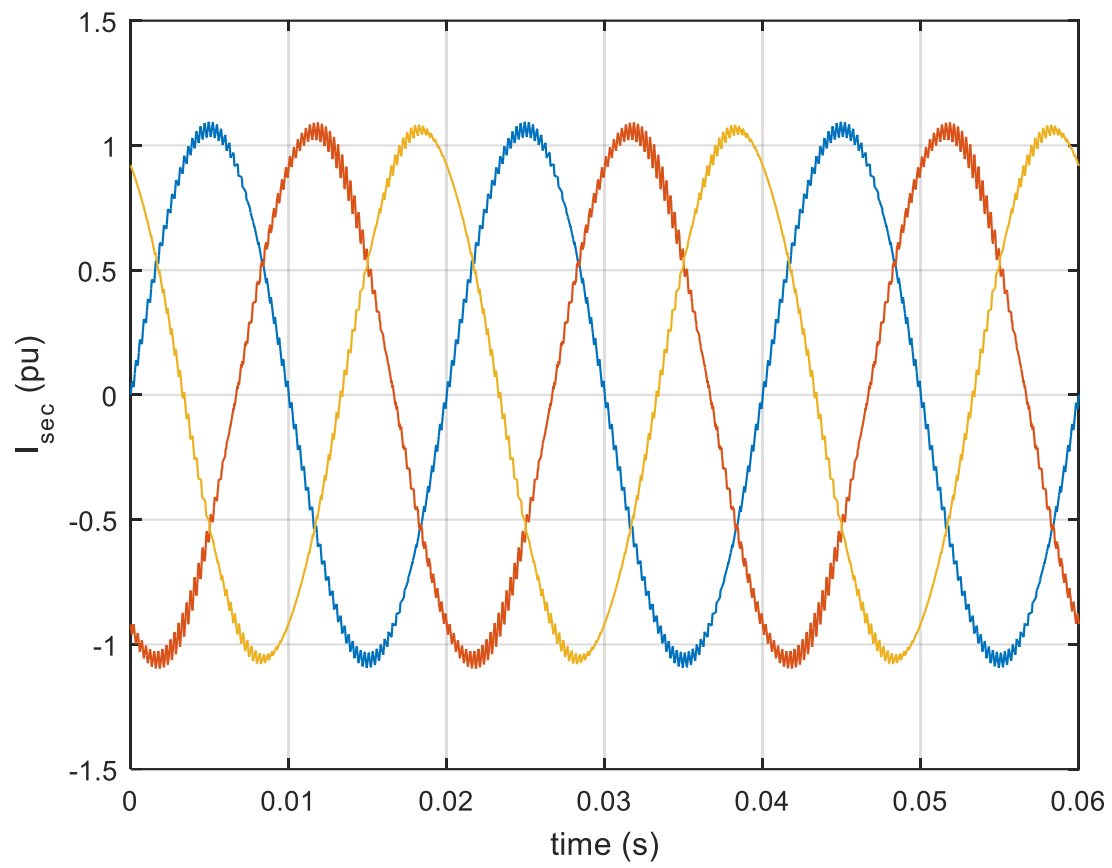


Εικόνα 4.2.9: Ρεύμα που εισέρχεται στον αντιστροφέα Inv_b

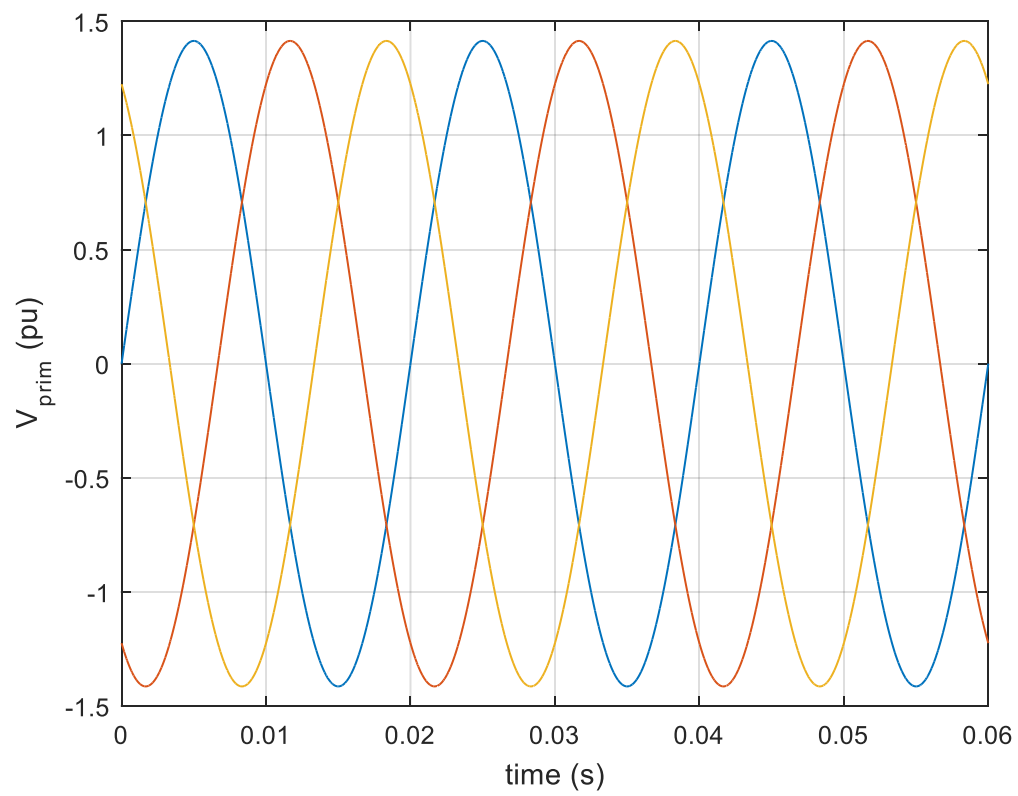


Εικόνα 4.2.10: Τάση εξόδου αντιστροφέα Inv_b

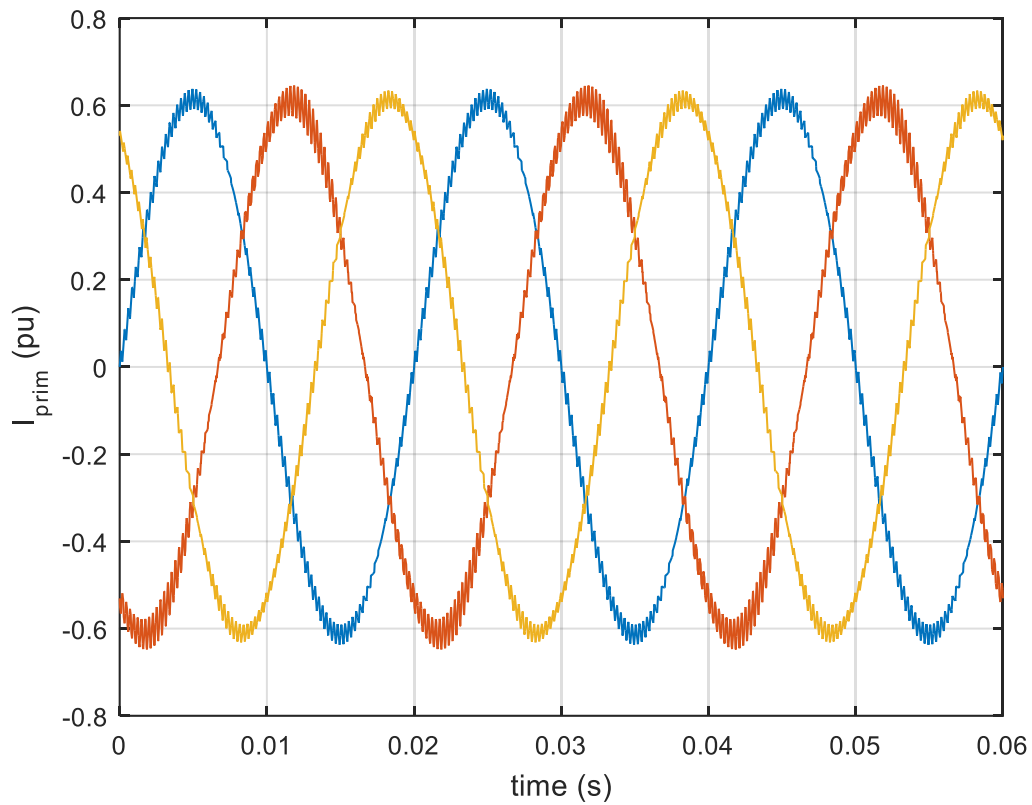
Τα ρεύματα που προκύπτουν στο δευτερεύον του μετασχηματιστή φαίνονται παρακάτω (Εικόνα 4.2.11), καθώς και η επιτευχθείσα συμμετρική φόρτιση στο πρωτεύον του μετασχηματιστή (Εικόνα (4.2.13)).



Εικόνα 4.2.11: Ρεύματα του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή



Εικόνα 4.2.12: Τάσεις πρωτεύοντος του μετασχηματιστή



Εικόνα 4.2.13: Ρεύματα του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή

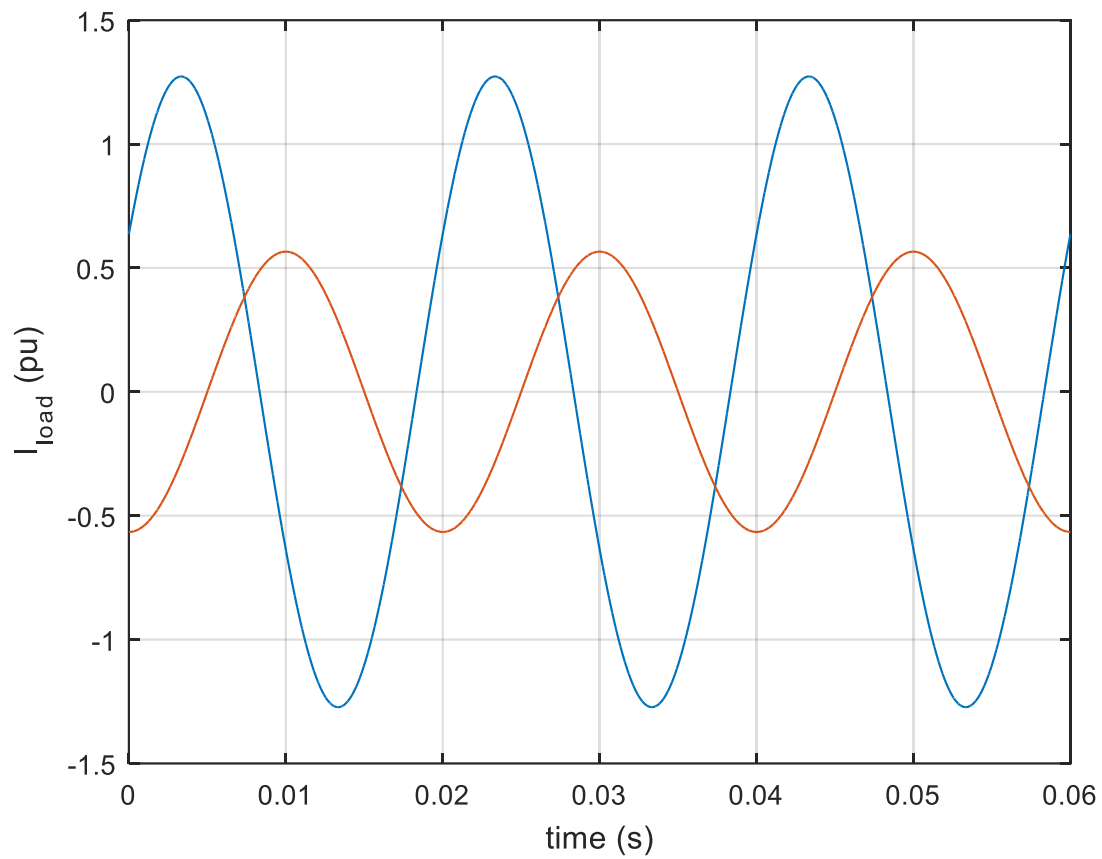
Παρακάτω παρουσιάζεται και το ισοζύγιο ισχύος που υπολογίσαμε για λόγους πληρότητας και επαλήθευσης της προσομοίωσης.

$P_{prim} (3\phi)$	0.42 α.μ.
P_{sec_a}	0.65 α.μ.
P_{sec_b}	0.65 α.μ.
P_{inv_a}	0.25 α.μ.
P_{inv_b}	0.25 α.μ.
P_{Load_a}	0.9 α.μ.
P_{Load_b}	0.4 α.μ.

Πίνακας 4.2.3: Ισοζύγιο ενεργού ισχύος

4.2.2.3 Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας σε αναγεννητική πέδηση.

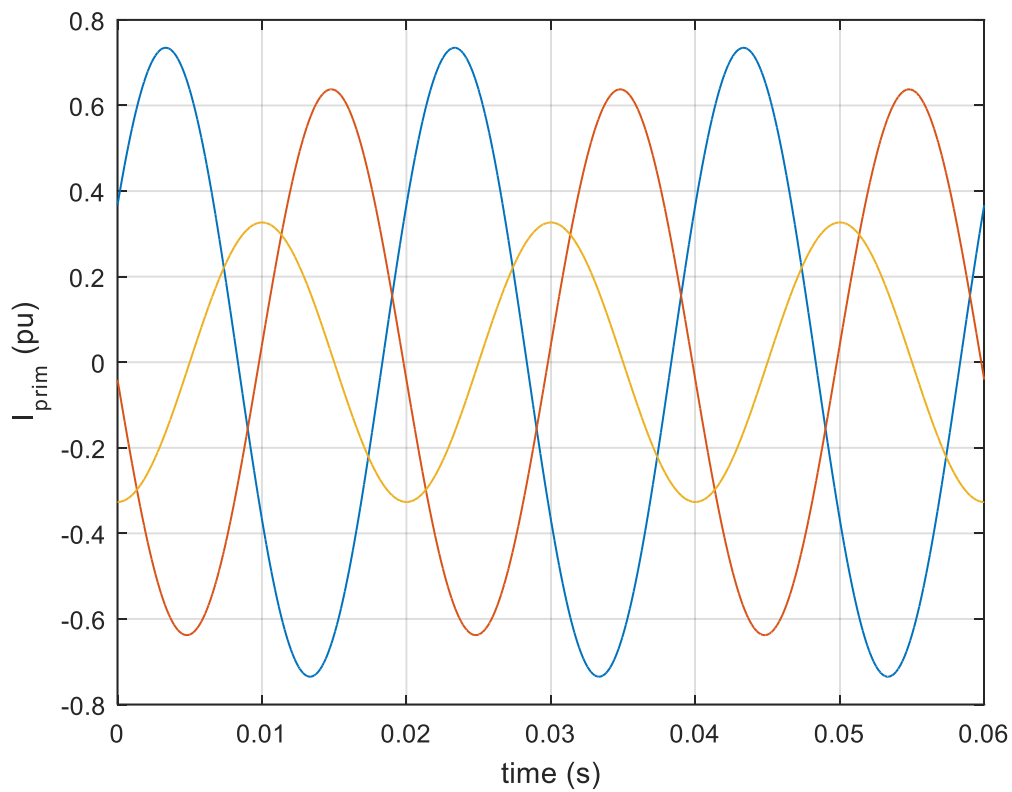
Έστω ότι $\tilde{I}_{Load_a}=0.9$ α.μ. και $\tilde{I}_{Load_b}=-0.4$ α.μ.. Δηλαδή η αμαξοστοιχία της γραμμής b επιβραδύνει.



Εικόνα 4.2.14: Ρεύματα φορτίων προσομοίωσης

Οι τάσεις των φορτίων, δηλαδή οι τάσεις του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή παραμένουν ίδιες με πριν (Εικόνα 4.2.5).

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 4.2.15) διαπιστώνουμε την ασυμμετρία που θα είχαμε στα ρεύματα δικτύου, χωρίς την αντιστάθμιση.



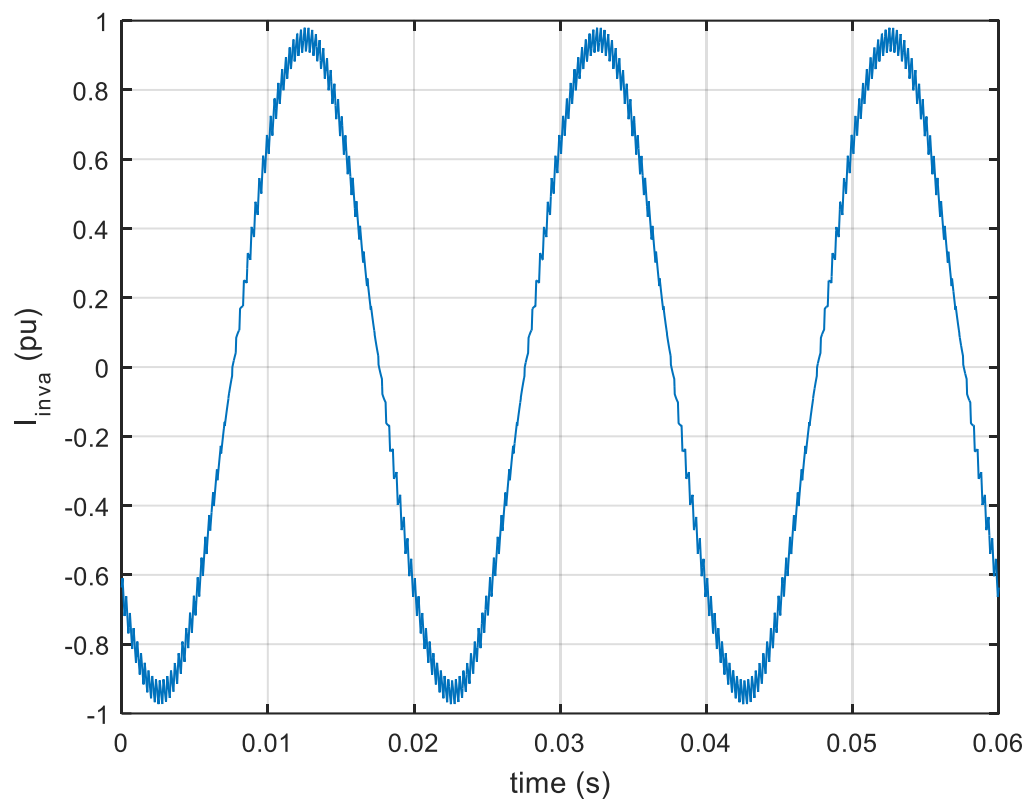
Εικόνα 4.2.15: Ρεύματα δικτύου χωρίς την αντιστάθμιση

Με βάση της εξισώσεις (3.13), (3.14) υπολογίζονται οι εξής τιμές για τα ρεύματα και τις θεμελιώδεις συνιστώσες των τάσεων των αντιστροφών.

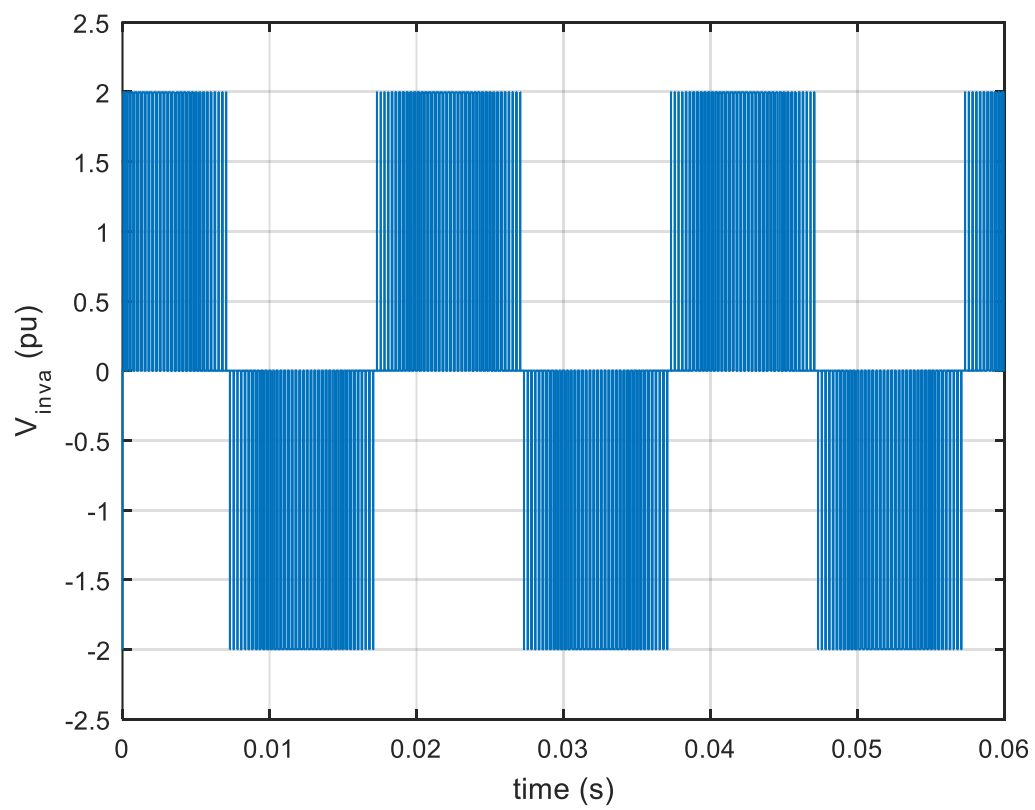
$\vec{I}_{r\ a}$	$0.67e^{-j137.5^\circ}$
$\vec{I}_{r\ b}$	$0.67e^{j102.5^\circ}$
$\vec{V}_{inv\ a}$	$0.86e^{j53.3^\circ}$
$\vec{V}_{inv\ b}$	$0.99e^{j70.9^\circ}$

Πίνακας 4.2.3: Τιμές ρευμάτων αντιστάθμισης και επιθυμητών τάσεων στην έξοδο των αντιστροφών

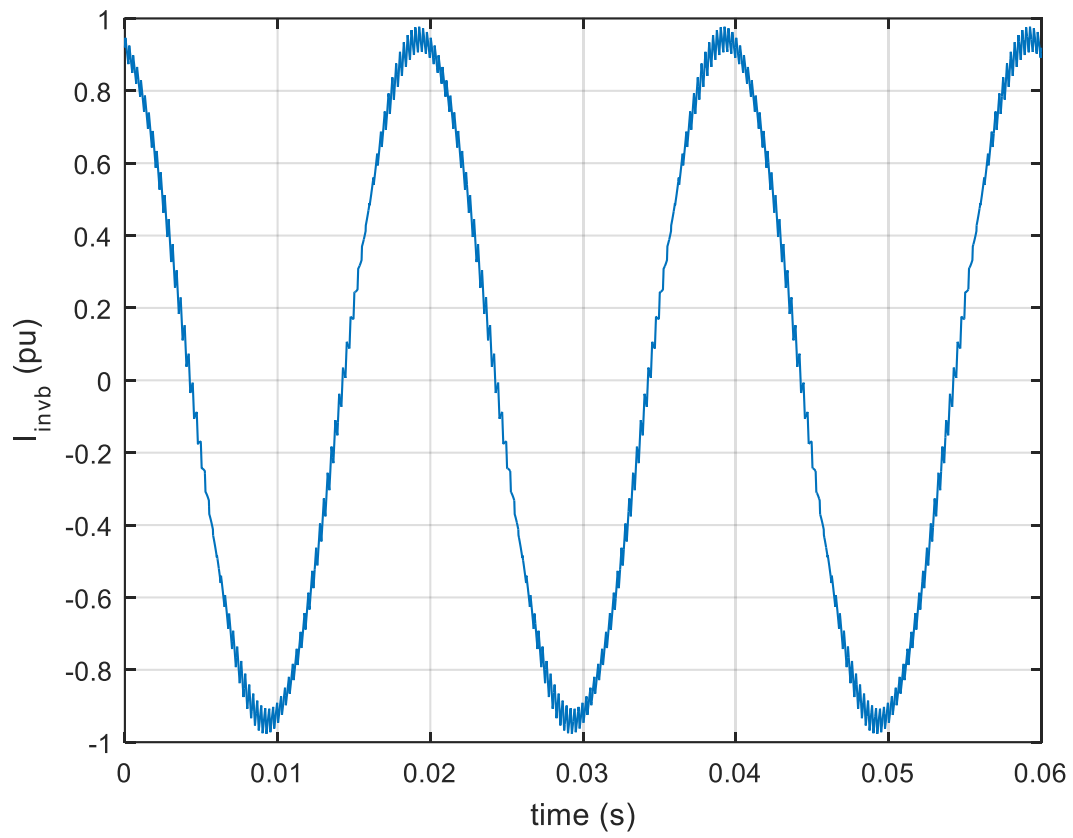
Ακολουθούν οι σχετικές κυματομορφές



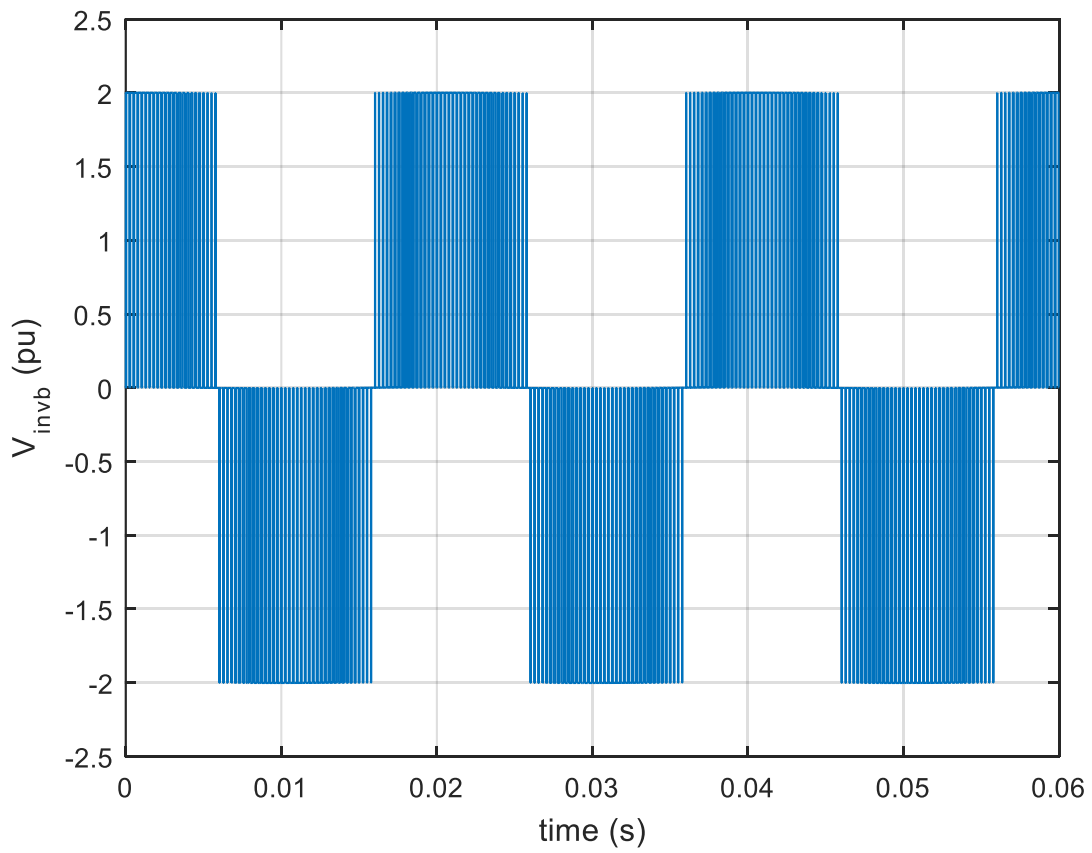
Εικόνα 4.2.16: Ρεύμα που εισέρχεται στον αντιστροφέα Inv_a



Εικόνα 4.2.17: Τάση εξόδου του αντιστροφέα Inv_a

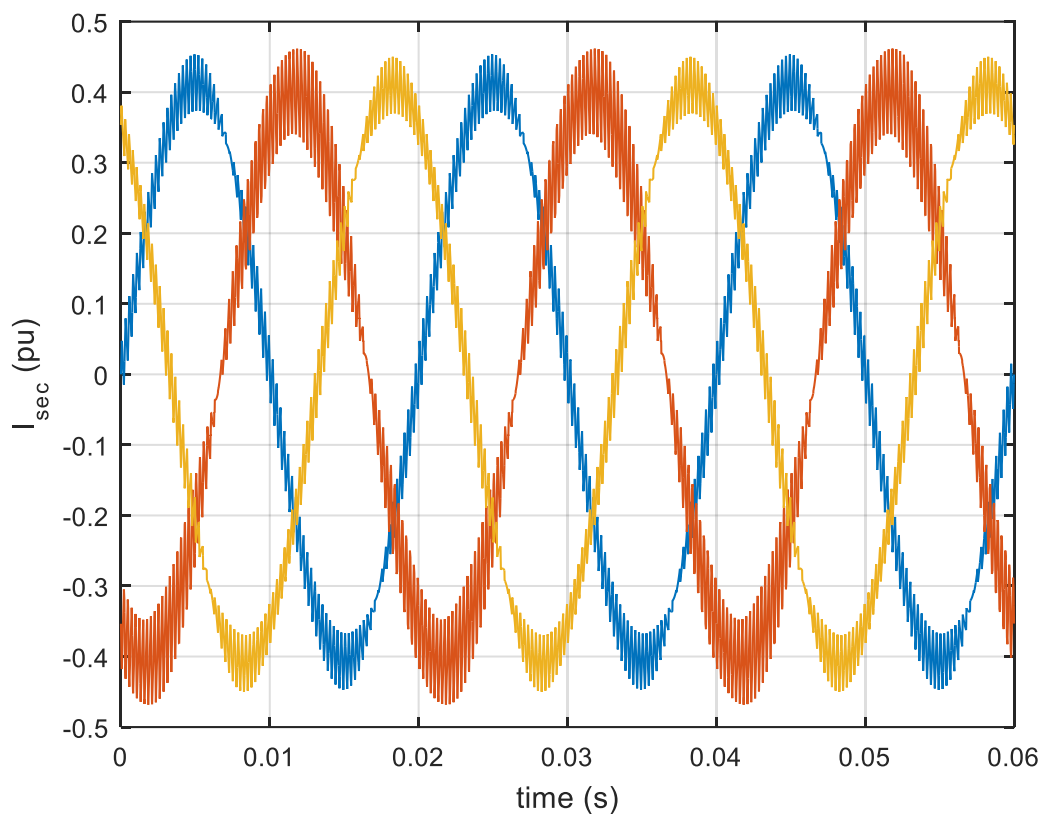


Εικόνα 4.2.18: Ρεύμα που εισέρχεται στον αντιστροφέα Inv_b

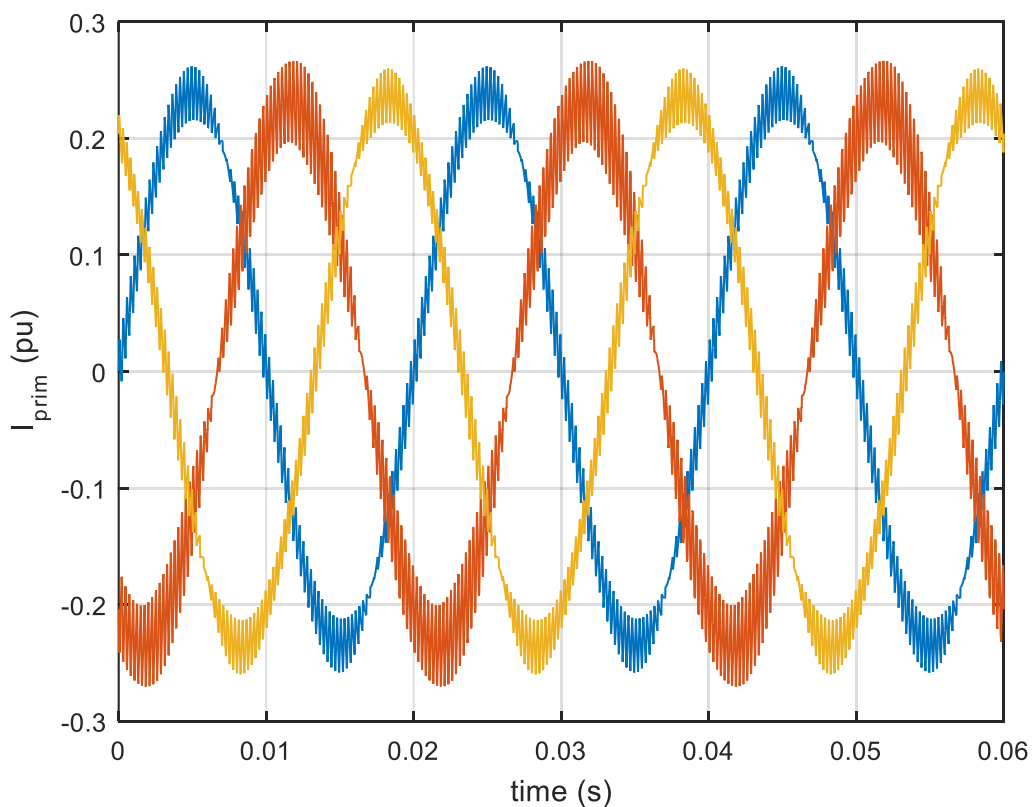


Εικόνα 4.2.19: Τάση εξόδου του αντιστροφέα Inv_b

Τα ρεύματα του δευτερεύοντος φαίνονται παρακάτω (Εικόνα 4.2.20), καθώς και η συμμετρική φόρτιση στο πρωτεύον (Εικόνα 4.2.21). Προφανώς οι τάσεις του πρωτεύοντος είναι όπως πριν (Εικόνα 4.2.12), αφού είναι η τάση του δικτύου.



Εικόνα 4.2.20:Ρεύματα δευτερεύοντος του μετασχηματιστή



Εικόνα 4.2.21:Ρεύματα πρωτεύοντος του μετασχηματιστή

Παρατηρούμε ότι τώρα η διάταξη μας «τραβάει» πολύ λιγότερο ρεύμα από το δίκτυο, καθώς ένα κομμάτι της ισχύος που απαιτεί, της το παρέχει η αντίστροφη ροή ισχύος. Παρακάτω φαίνεται και το ισοζύγιο ισχύος της διάταξης.

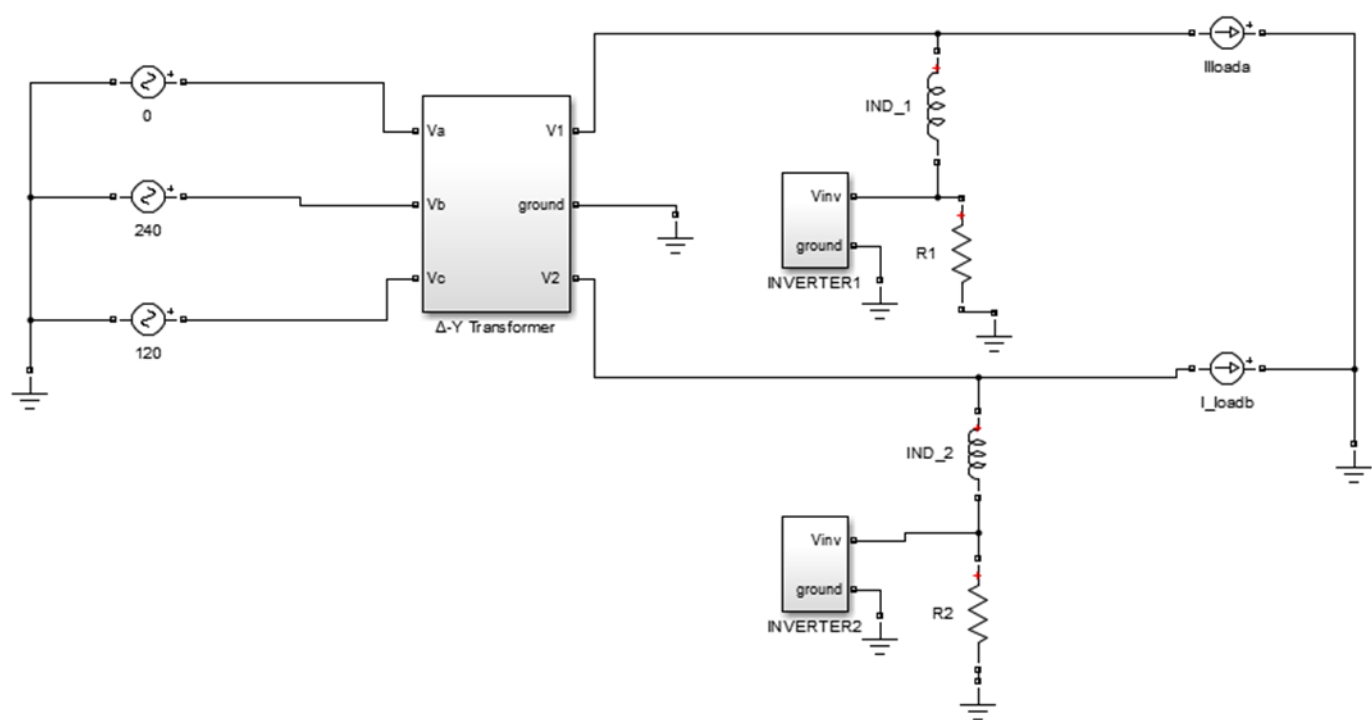
$P_{prim} \text{ (3}\phi\text{)}$	0.17 α.μ.
P_{sec_a}	0.25 α.μ.
P_{sec_b}	0.25 α.μ.
P_{inv_a}	0.65 α.μ.
P_{inv_b}	0.65 α.μ.
P_{Load_a}	0.9 α.μ.
P_{Load_b}	0.4 α.μ.

Πίνακας 4.2.4: Ισοζύγιο Ενεργού Ισχύος

4.3 Προσομοίωση για το μετασχηματιστή αστέρα-τρίγωνο

4.3.1 Κύκλωμα προσομοίωσης

Το κύκλωμα προσομοίωσης φαίνεται στην Εικόνα 4.3.1



Εικόνα 4.3.1: Κύκλωμα προσομοίωσης για τον μετασχηματιστή τρίγωνο-αστέρα

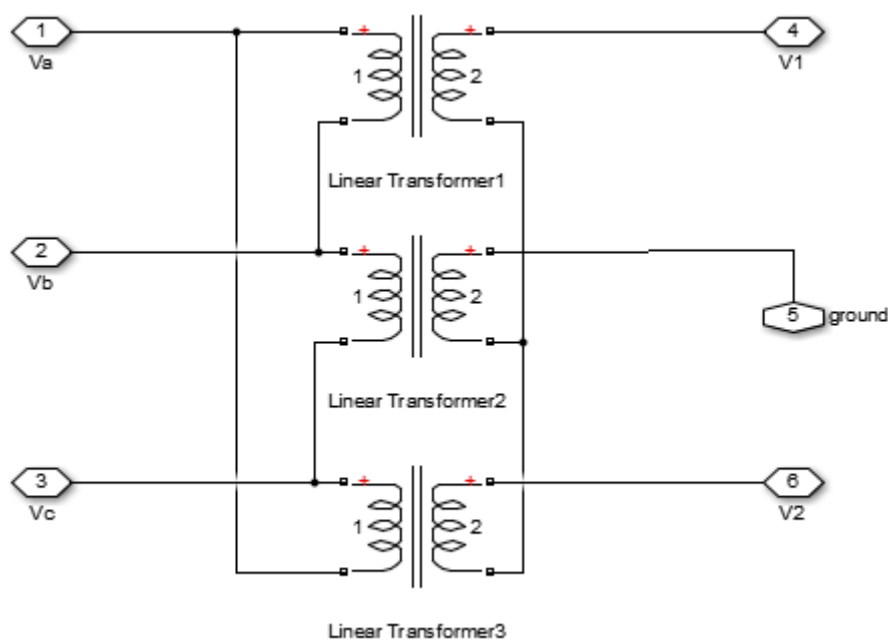
Όπως και στην περίπτωση του μετασχηματιστή ανοιχτού τριγώνου, το δίκτυο προσομοιώνεται με τις τρεις ιδανικές πηγές τάσης, συνδεδεμένες στο πρωτεύον του μετασχηματιστή, που παρέχουν συμμετρική τριφασική τάση.

Οι αμαξοστοιχίες προσομοιώνονται με τις ιδανικές πηγές εναλλασσόμενου ρεύματος Load_a, Load_b στα δεξιά. Η αναπαράσταση αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση, καθώς αναφέρεται στην ΗΜΚ, αγνοώντας τα όποια μεταβατικά φαινόμενα υπάρχουν στο σύστημα και φυσικά αγνοεί και τις αρμονικές που προκαλούν στο σύστημα οι διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος, τόσο στον υποσταθμό, όσο και στο εσωτερικό των

αμαξοστοιχιών (1^ο Κεφάλαιο), ενώ μας δίνει τη δυνατότητα, να συμπεριλάβουμε τη γωνία του φορτίου σαν διαφορά φάσης της ιδανικής πηγής με την τάση στα άκρα της.

Οι αντιστροφείς, συνδέονται στο σύστημα μέσω επαγωγών $X_1=X_2=0.05$ α.μ. ($L_1=L_2=0.00159$ H). Το υποσύστημα του αντιστροφέα είναι το ίδιο με πριν προφανώς (Εικόνα 4.2.3). Οι αντιστάσεις που φαίνονται συνδεδεμένες παράλληλα με τους αντιστροφείς (R_1 και R_2) εξυπηρετούν την αρχικοποίηση του ρεύματος των πηνίων. Έχουν πολύ μεγάλη τιμή (1000 α.μ.) οπότε δεν τραβάνε ρεύμα που μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα μας.

Το υποσύστημα του μετασχηματιστή φαίνεται παρακάτω. Αποτελείται από τρεις ιδανικούς μονοφασικούς μετασχηματιστές συνδεδεμένους σε τρίγωνο στο πρωτεύον και αστέρα στο δευτερεύον.



Εικόνα 4.3.2: Μετασχηματιστής τρίγωνο-αστέρας

4.3.2 Παραδείγματα

4.3.2.1 Προσομοίωση μόνιμης κατάστασης λειτουργίας

Για τον υπολογισμό των τιμών αναφοράς των μεγεθών της προσομοίωσης χρησιμοποιείται κώδικας στο Matlab (Παράρτημα). Ο κώδικας εκτός από τις εν λόγω παραμέτρους, υπολογίζει όλα τα μεγέθη της διάταξης, rms τιμές και γωνίες τάσεων και ρευμάτων, ισχείς και δίνει μια συνολική εικόνα του συστήματος.

Οι τιμές των παραμέτρων που θα χρησιμοποιήσουμε φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Η συχνότητα του σήματος αναφοράς του αντιστροφέα όπως είναι λογικό είναι η συχνότητα του δικτύου (50Hz).

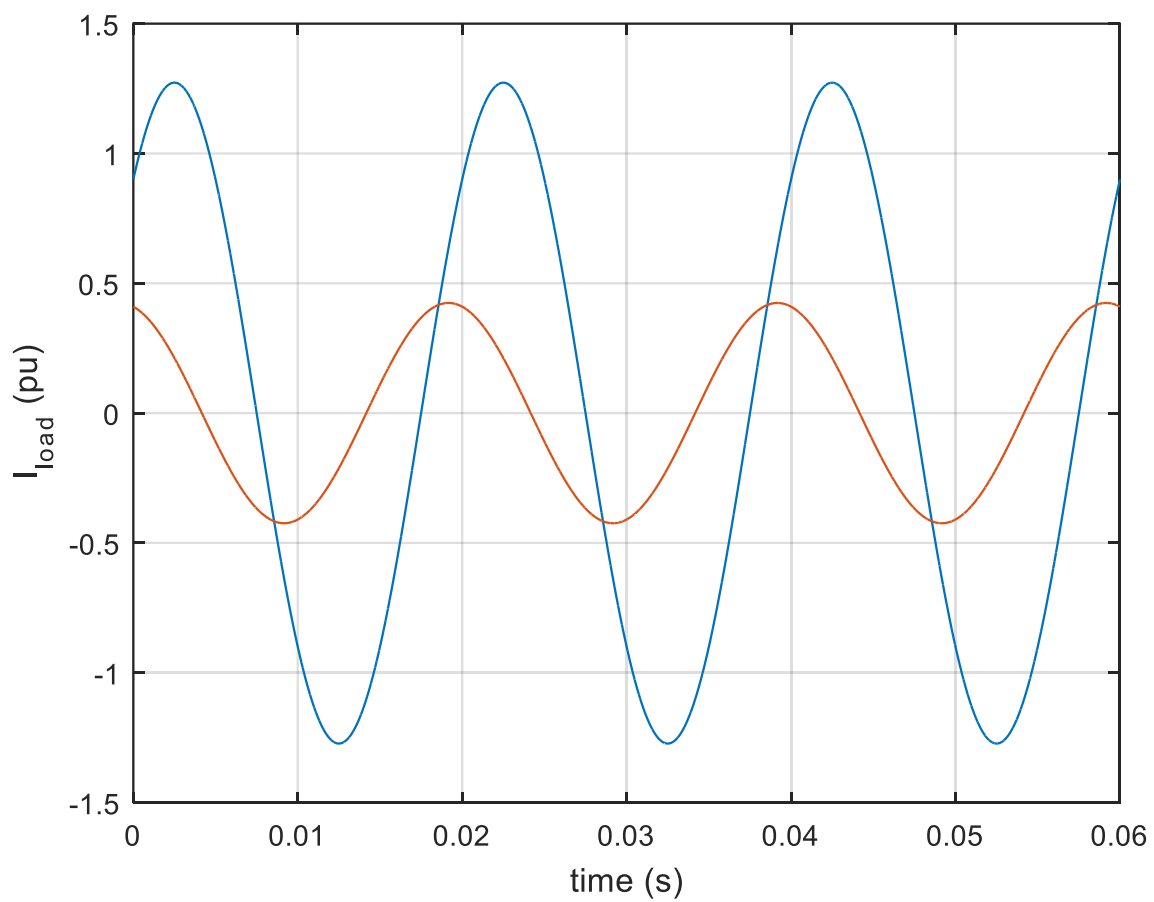
$\tilde{V}_{prim}$	1 α.μ.
L	0.05 αμ
R	1000 α.μ.
ϕ_{Load}	15
ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ	
K_v	0.333

ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ	
A_c	1 V
f_c	1950 Hz
f_a	50 Hz
V_d	2 α.μ.

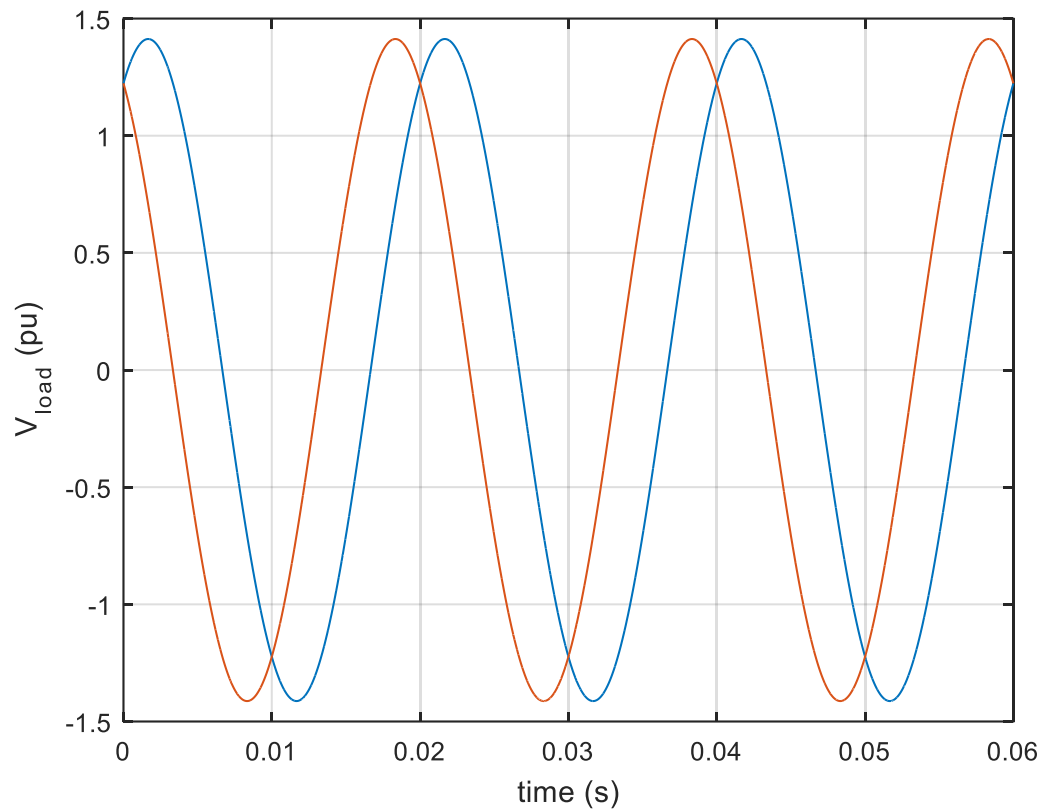
Πίνακας 4.3.1: Παράμετροι προσομοίωσης

4.3.2.2 Κανονική λειτουργία και των δύο τρένων

Θα μελετήσουμε ενδεικτικά την περίπτωση, όπου $\tilde{I}_{Load_a}=0.9$ α.μ. και $\tilde{I}_{Load_b}=0.3$ α.μ. Τα ρεύματα των τρένων φαίνονται παρακάτω, καθώς και οι τάσεις στα άκρα τους.

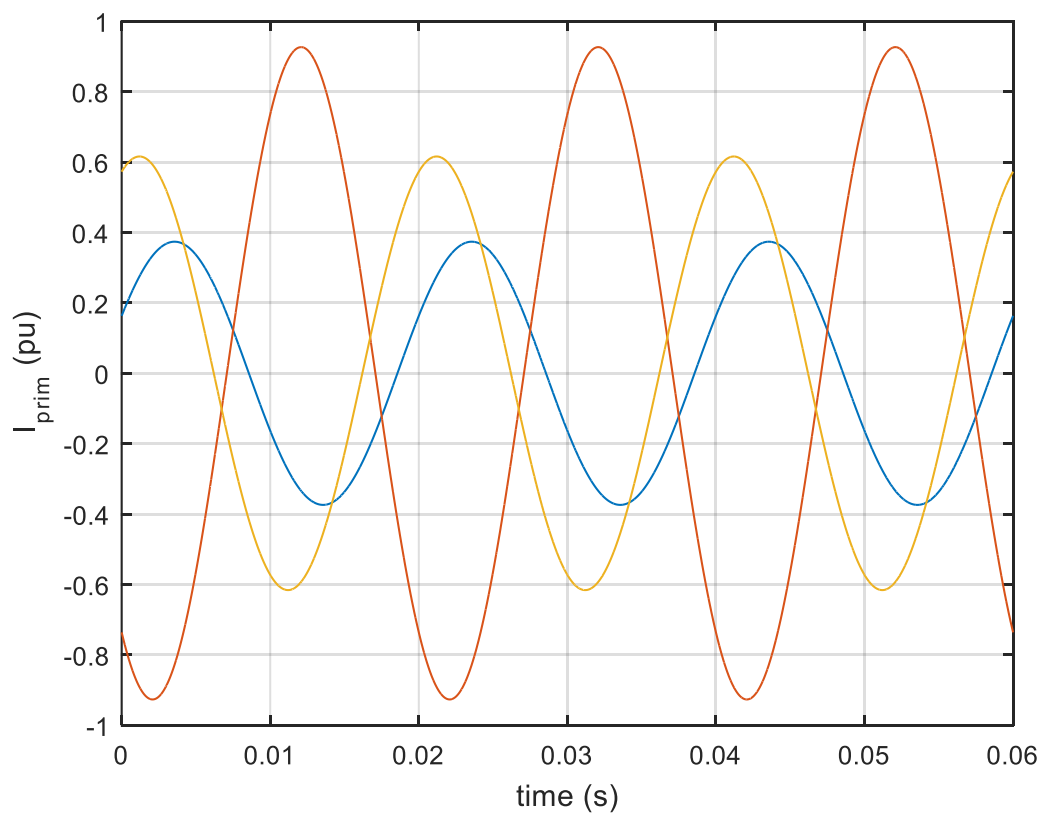


Εικόνα 4.3.3: Ρεύματα αμαξοστοιχιών



Εικόνα 4.3.4: Τάσεις δευτερεύοντος του μετασχηματιστή

Στην παρακάτω εικόνα (4.3.5), αποτυπώνεται η λειτουργία του συστήματος **χωρίς τη χρήση της αντιστάθμισης** και η έντονη ασυμμετρία που υπάρχει στο πρωτεύον του μετασχηματιστή.



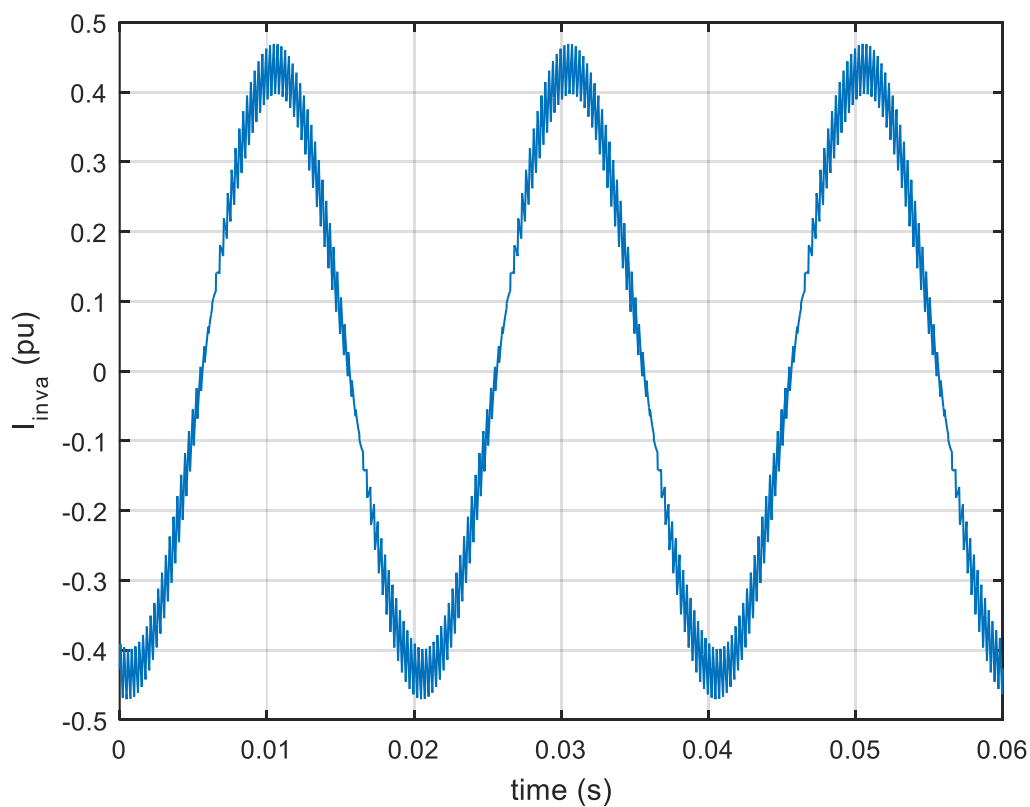
Εικόνα 4.3.5: Ρεύματα πρωτεύοντος του μετασχηματιστή χωρίς τη χρήση της αντιστάθμισης

Τα ρεύματα αντιστάθμισης όπως υπολογίζονται με βάση τις εξισώσεις παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3.2.

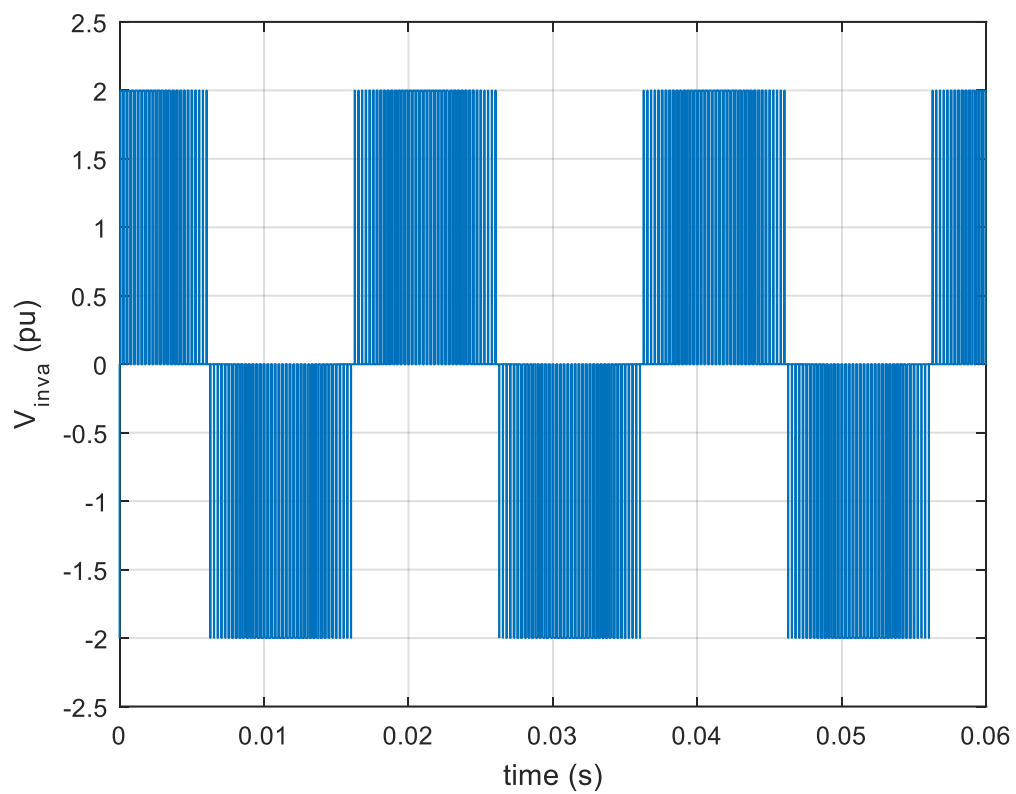
$\vec{I}_{r_a}$	$0.31e^{-j100.7^\circ}$
$\vec{I}_{r_b}$	$0.50e^{j174.9^\circ}$
$\vec{V}_{inv_a}$	$1.46e^{j65.7^\circ}$
$\vec{V}_{inv_b}$	$1.71e^{j115.1^\circ}$

Πίνακας 4.3.2 Ρεύματα αντιστάθμισης, και θεμελιώδης συνιστώσα, των τάσεων των αντιστροφών

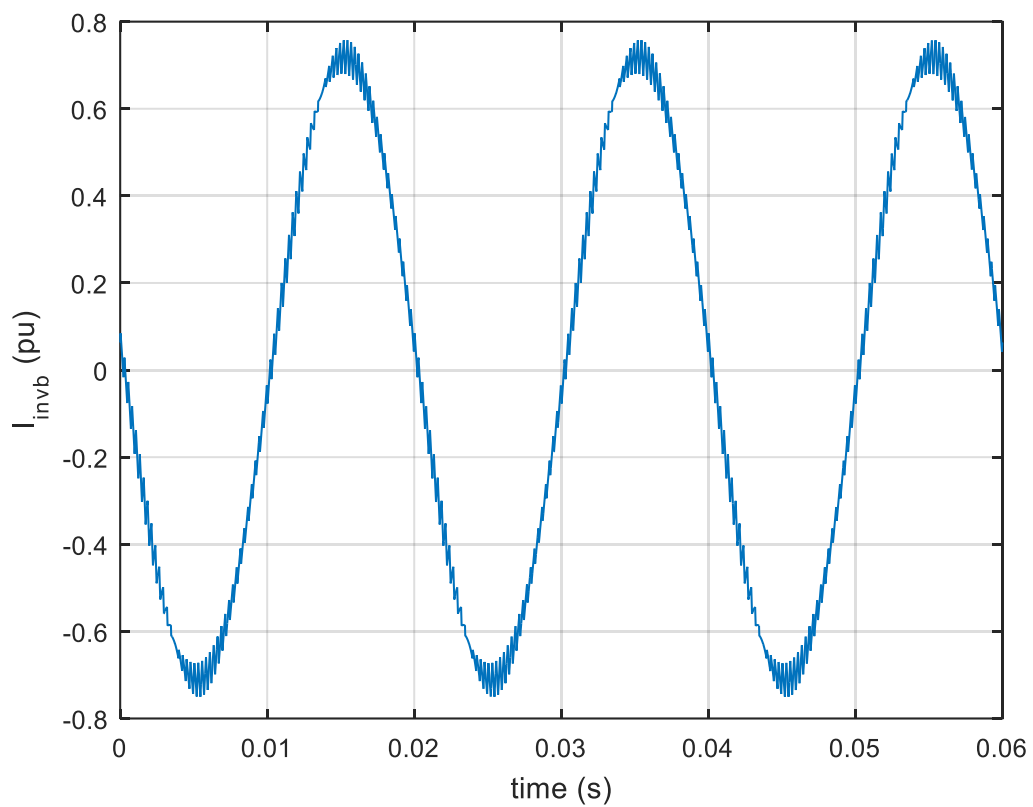
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι γραφικές τους παραστάσεις.



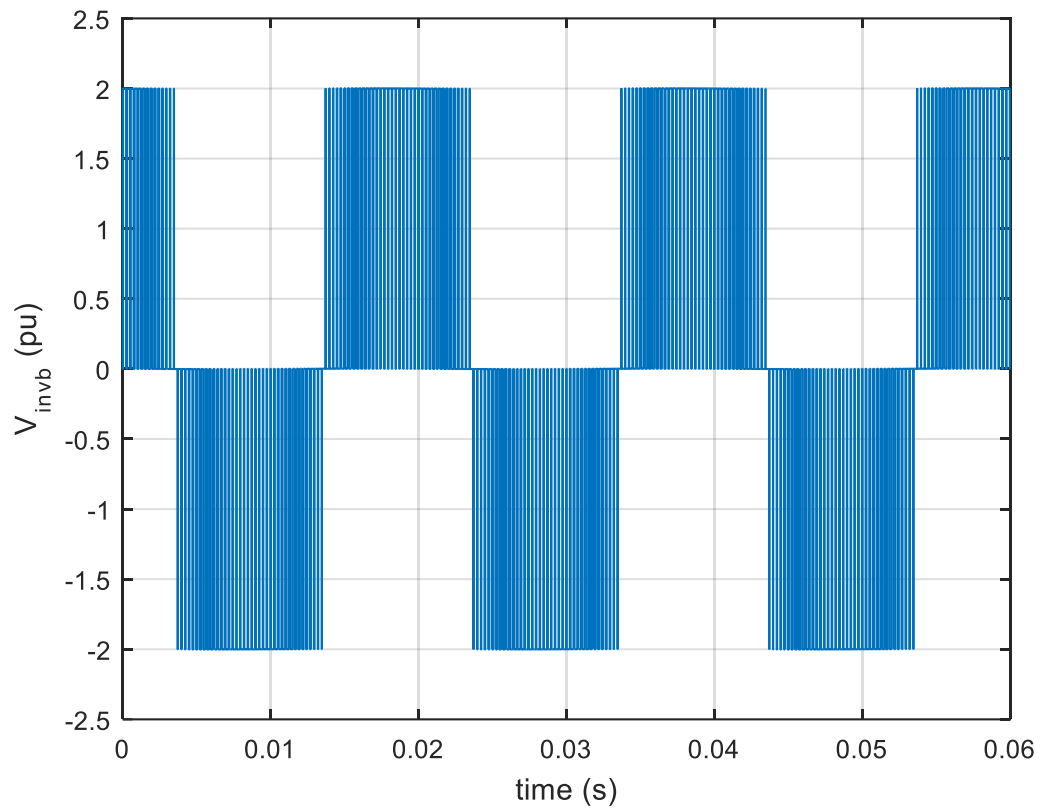
Εικόνα 4.3.6: Ρεύμα που εισέρχεται στον αντιστροφέα Inv_a



Εικόνα 4.3.7: Τάση εξόδου αντιστροφέα Inv_a



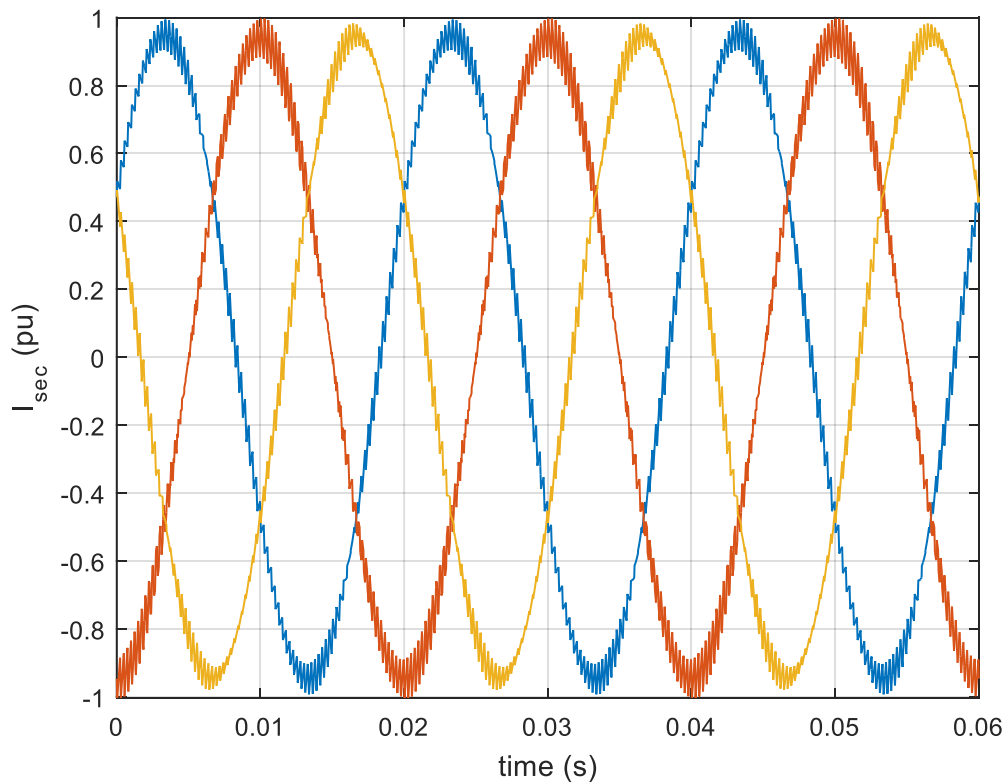
Εικόνα 4.3.8: Ρεύμα που εισέρχεται στον αντιστροφέα Inv_b



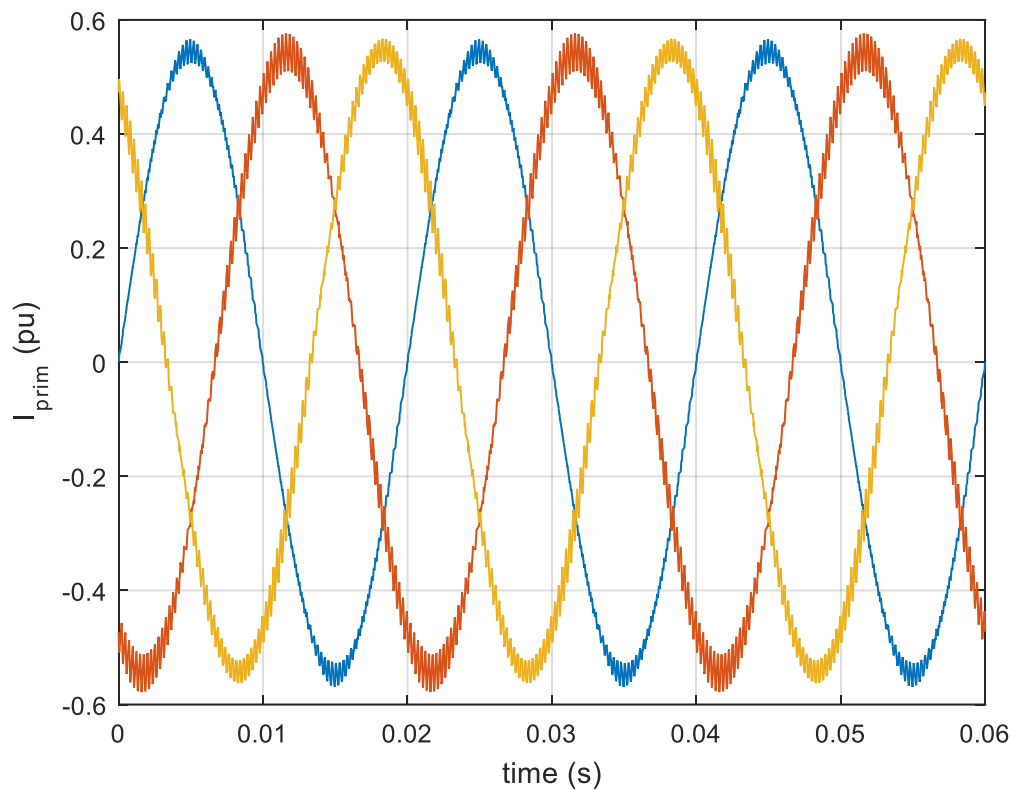
Εικόνα 4.3.9: Τάση εξόδου αντιστροφέα Inv_b

Προφανώς, οι φασικές τάσεις στο πρωτεύον του μετασχηματιστή είναι οι φασικές του δικτύου (Εικόνα 4.2.12).

Τα ρεύματα του δευτερεύοντος και η επιτευχθείσα συμμετρική φόρτιση στο δίκτυο παρουσιάζονται στις εικόνες 4.3.10 και 4.3.11 αντίστοιχα.



Εικόνα 4.3.10: Ρεύματα εξόδου του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή



Εικόνα 4.3.11: Ρεύματα γραμμής δικτύου (πρωτεύοντος Μ/Σ)

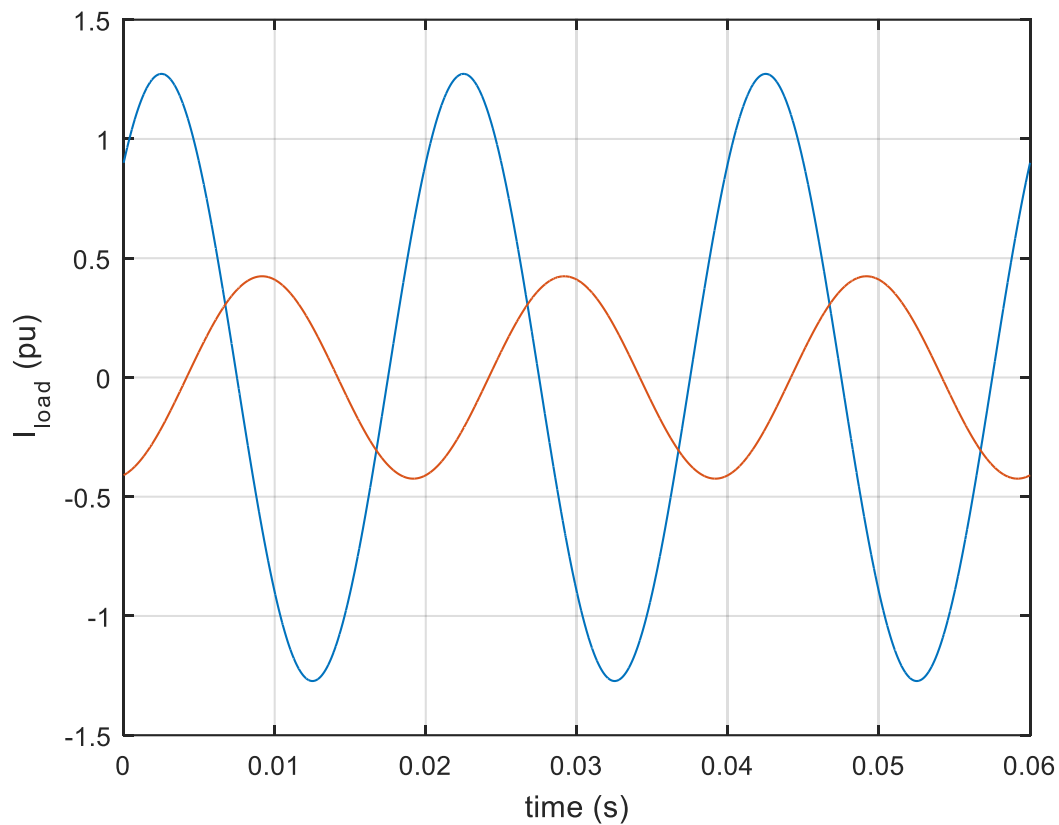
Ακολουθεί το ισοζύγιο ενεργού ισχύος, για λόγους πληρότητας και επαλήθευσης της προσομοίωσης.

$P_{prim} (3\phi)$	0.39 α.μ.
P_{sec_a}	0.58 α.μ.
P_{sec_b}	0.58 α.μ.
P_{inv_a}	0.29 α.μ.
P_{inv_b}	0.29 α.μ.
P_{Load_a}	0.87 α.μ.
P_{Load_b}	0.29 α.μ.

Πίνακας 4.3.3 Ισοζύγιο ενεργού ισχύος

4.3.2.3 Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας σε αναγεννητική πέδηση.

Έστω ότι τα ρεύματα των φορτίων είναι $\tilde{I}_{Load_a} = 0.9$ α.μ. και $\tilde{I}_{Load_b} = -0.3$ α.μ., δηλαδή η αμαξοστοιχία b επιβραδύνει. Οι κυματομορφές τους παρουσιάζονται στην εικόνα 4.3.12.



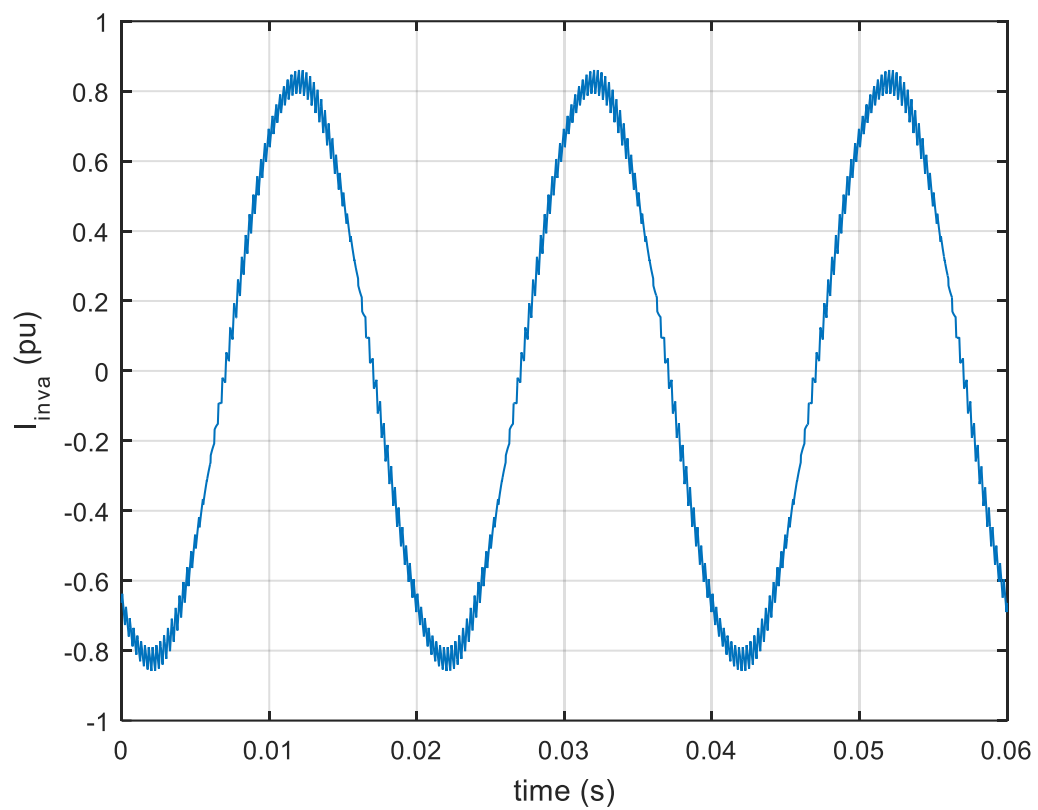
Εικόνα 4.3.12: Ρεύματα των αμαξοστοιχιών

Με βάση τις εξισώσεις 3.22 υπολογίζονται τα ρεύματα αντιστάθμισης και αντίστοιχα οι θεμελιώδεις συνιστώσες των τάσεων εξόδου των αντιστροφένων :

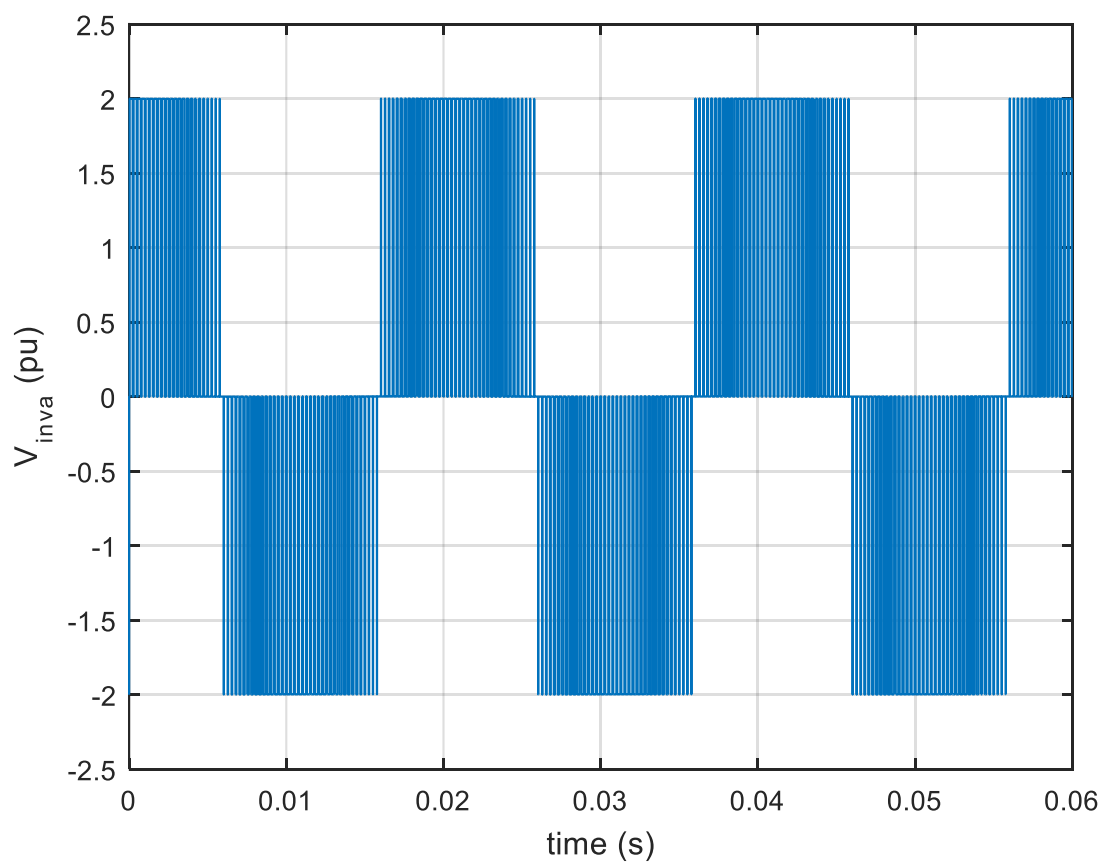
$\vec{I}_{r\ a}$	$0.58e^{-j126.5^\circ}$
$\vec{I}_{r\ b}$	$0.59e^{j128.8^\circ}$
$\vec{V}_{inv\ a}$	$1.56e^{j70.7^\circ}$
$\vec{V}_{inv\ b}$	$1.57e^{j109.4^\circ}$

Πίνακας 4.3.5 Ρεύματα αντιστάθμισης και θεμελιώδεις συνιστώσες τάσεων εξόδου αντιστροφένων

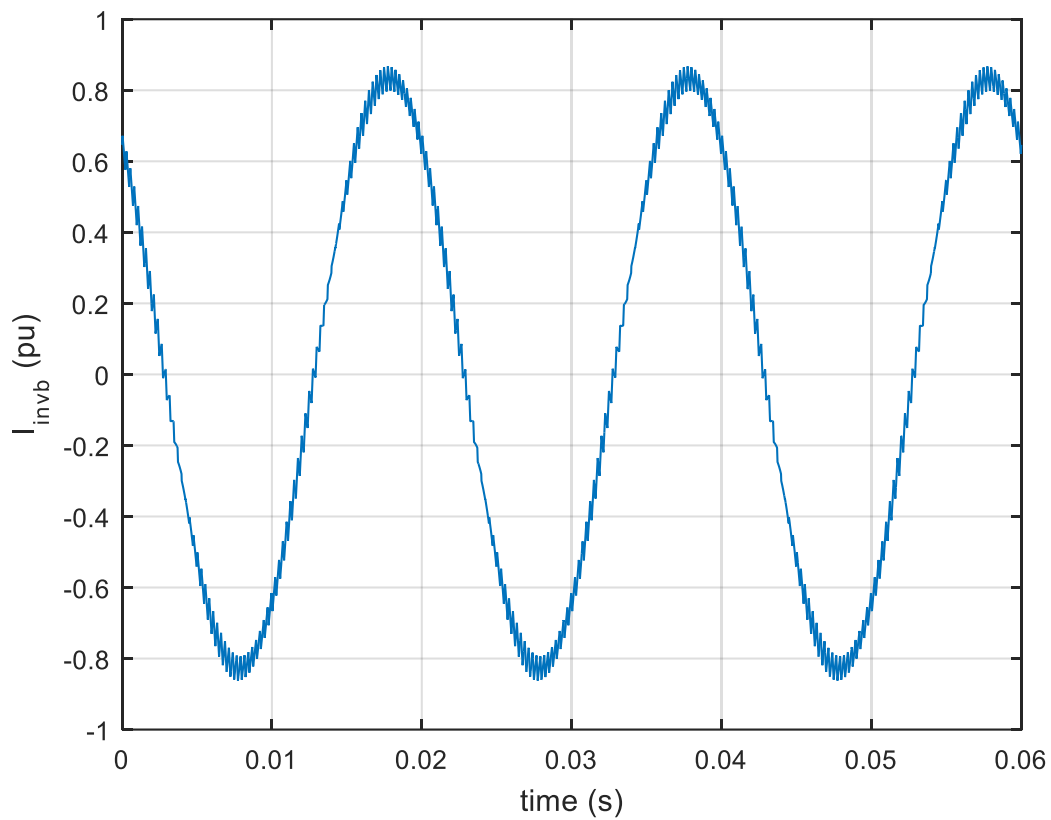
Ακολουθούν οι κυματομορφές όπως προκύψαν από την προσομοίωση.



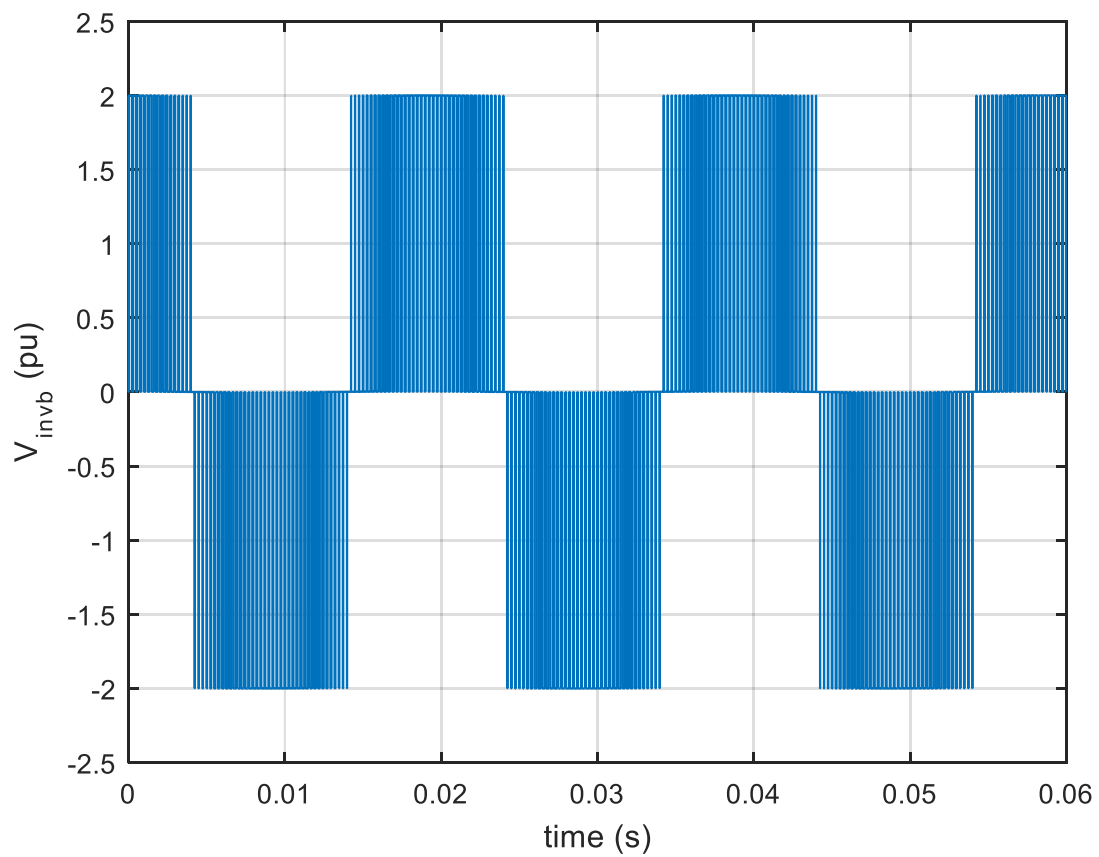
Εικόνα 4.3.13: Ρεύματα που εισέρχεται στον αντιστροφέα Inv_a



Εικόνα 4.3.14: Τάση εξόδου αντιστροφέα Inv_a

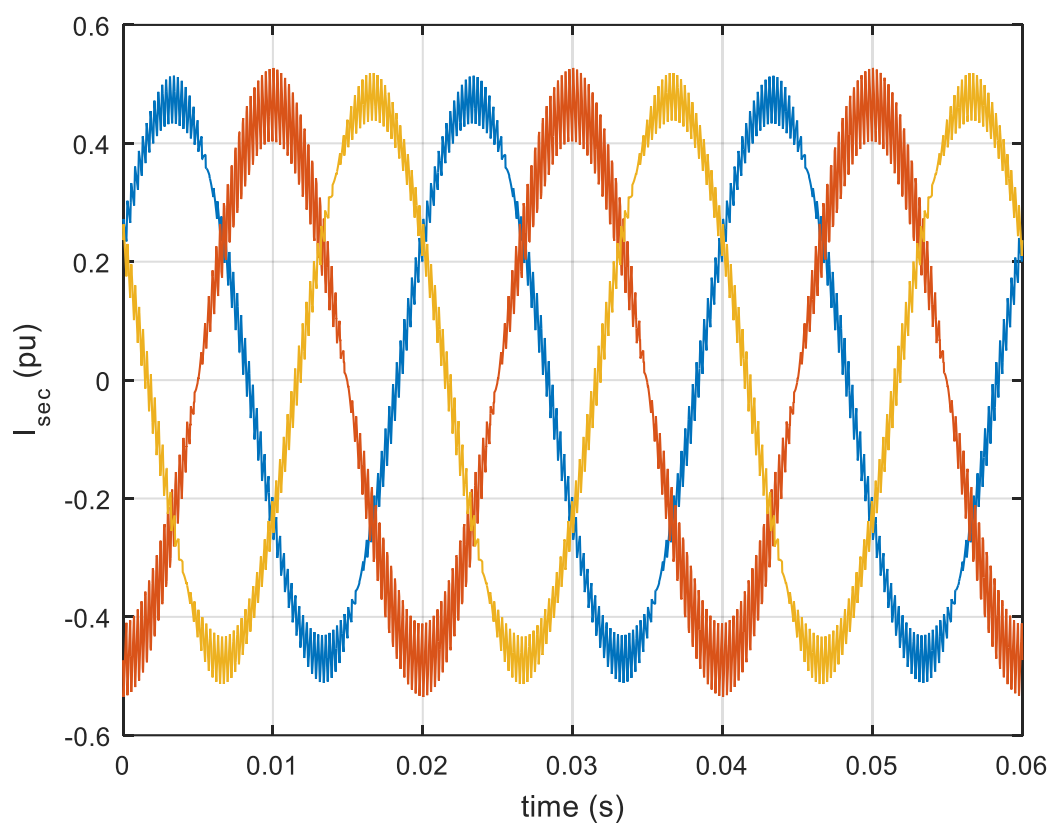


Εικόνα 4.3.15: Ρεύμα που εισέρχεται στον αντιστροφέα Inv_b

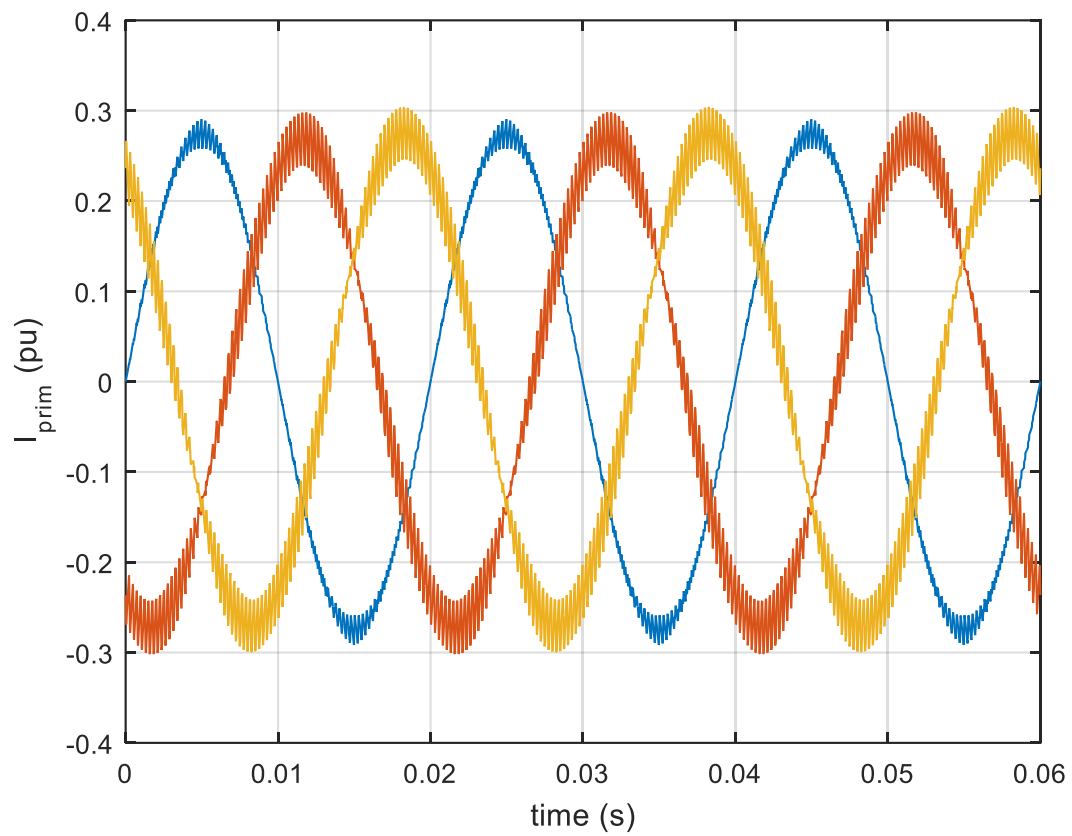


Εικόνα 4.3.16: Τάση εξόδου αντιστροφέα Inv_b

Τα ρεύματα δευτερεύοντος και πρωτεύοντος του μετασχηματιστή φαίνονται στις εικόνες 4.3.17 και 4.3.18 αντίστοιχα.



Εικόνα 4.3.17: Ρεύματα δευτερεύοντος μετασχηματιστή



Εικόνα 4.3.18: Ρεύματα πρωτεύοντος μετασχηματιστή (δικτύου)

Ακολουθεί το ισοζύγιο ενεργού ισχύος.

$P_{prim} (3\phi)$	0.19 α.μ.
P_{sec_a}	0.29 α.μ.
P_{sec_b}	0.29 α.μ.
P_{inv_a}	0.58 α.μ.
P_{inv_b}	0.58 α.μ.
P_{Load_a}	0,87 α.μ.
P_{Load_b}	0.29 α.μ.

Πίνακας 4.3.6 Ισοζύγιο ενεργού ισχύος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Τιμές ρευμάτων αντιστροφών σε όλες τις περιοχές λειτουργίας

Αφού επιβεβαιώσαμε την ορθότητα των υπολογισμών του 2^{ου} κεφαλαίου, μπορούμε να επεκτείνουμε τα αποτελέσματα σε όλες τις περιοχές λειτουργίας. Θεωρώντας ανεξάρτητες μεταβλητές τις ενεργές τιμές των ρευμάτων κάθε αμαξοστοιχίας στο διάστημα $[-0.5, 1]$, καθώς και τις φάσεις τους, χαράχτηκαν, για τις διαφορετικές τιμές του συντελεστή ισχύος, οι τρισδιάστατες επιφάνειες του $\tilde{I}_r$ συναρτήσει των $\tilde{I}_{Load_a}$, $\tilde{I}_{Load_b}$, με χρήση κώδικα Matlab (Παράρτημα)

5.1 Τιμές ρευμάτων αντιστροφών για τον μετασχηματιστή ανοιχτού τριγώνου

Παρακάτω παρατίθεται πίνακας με τις μέγιστες τιμές των εν λόγω ρευμάτων για διάφορες τιμές του συντελεστή ισχύος.

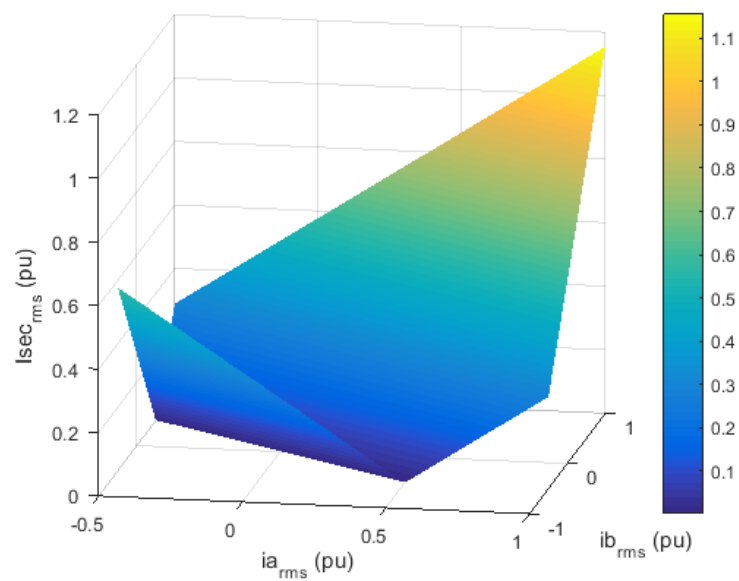
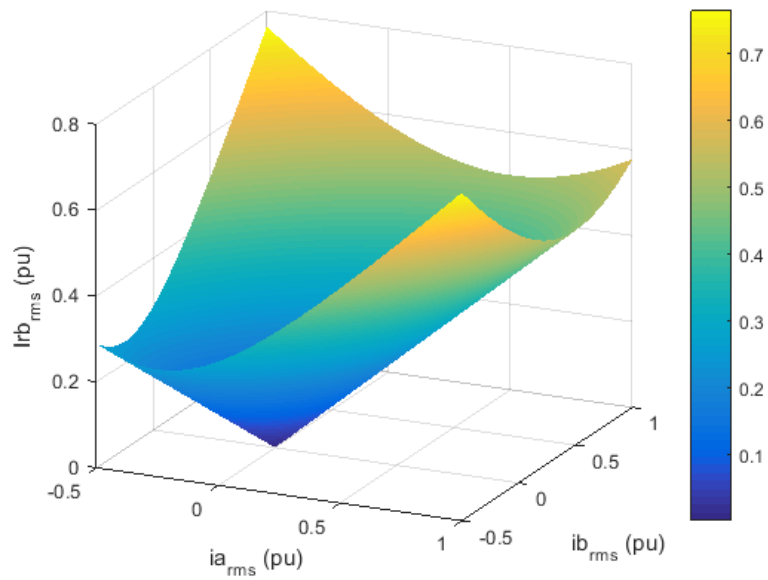
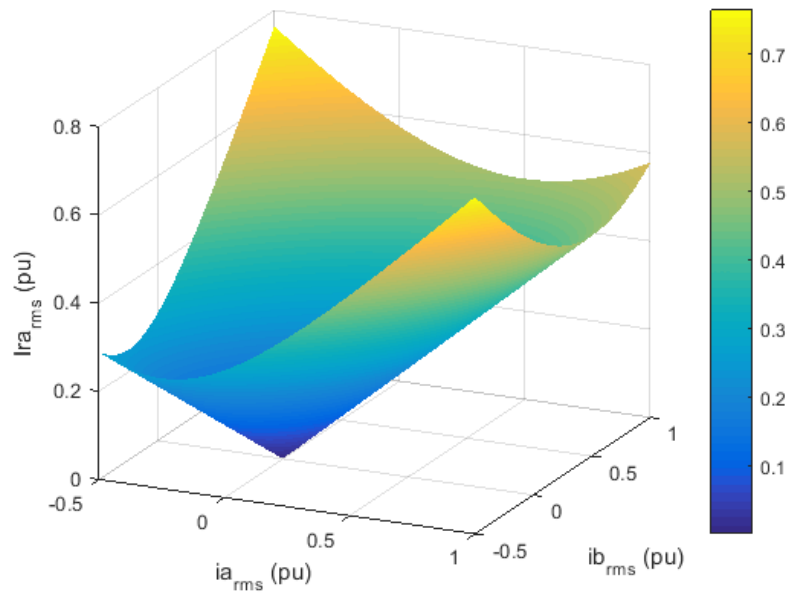
$\phi_{Load} (^{\circ})$	$\tilde{I}_{ra_max} (\alpha.\mu.)$	$\tilde{I}_{rb_max} (\alpha.\mu.)$	$\tilde{I}_{sec_max} (\alpha.\mu.)$	$\tilde{I}_{grid_max} (\alpha.\mu.)$
0	0.76	0.76	1.15	0.575
10	0.77	0.8	1.13	0.565
15	0.77	0.82	1.12	0.56
20	0.77	0.88	1.08	0.54
25	0.76	0.95	1.05	0.525
30	0.75	1	1	0.5
36.9	0.77	1.06	0.92	0.46

Πίνακας 5.1: Μέγιστες τιμές ρευμάτων αντιστροφών, δευτερεύοντος και δικτύου, για διάφορες τιμές του συντελεστή ισχύος

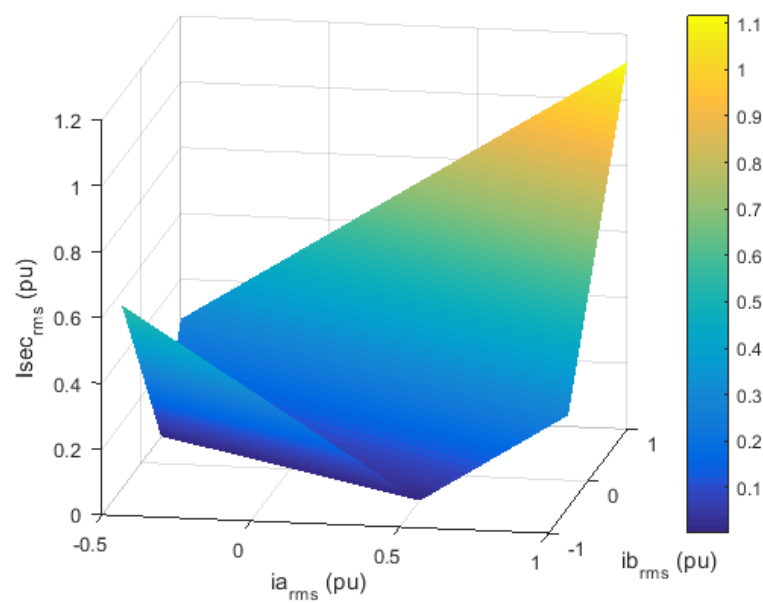
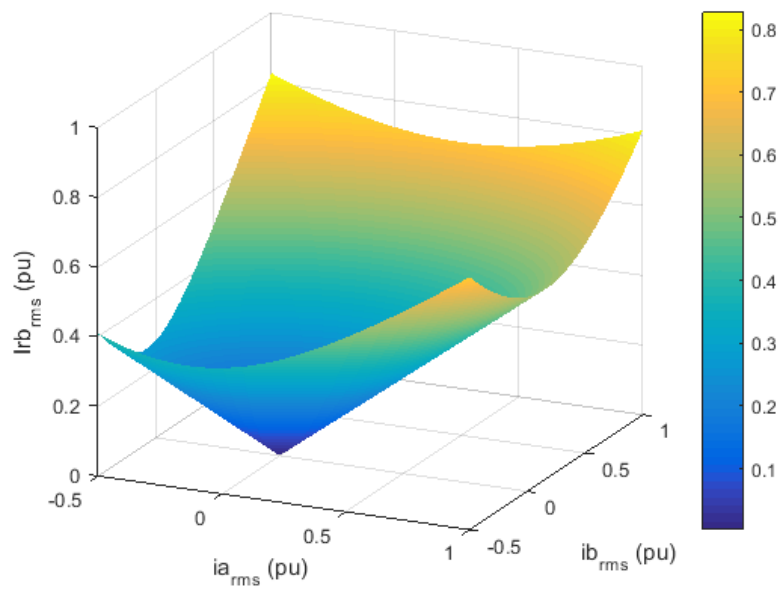
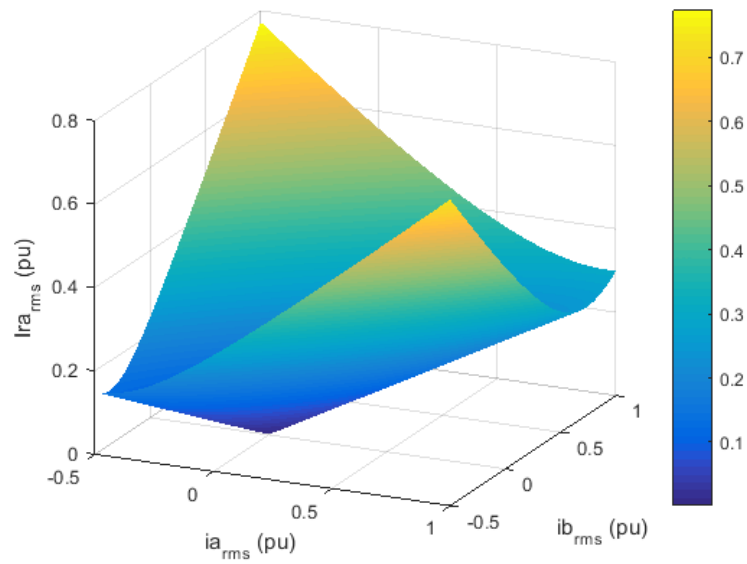
Αυτές σημειώνονται στα σημεία $(-0.5, 1)$, $(1, -0.5)$ για το $\tilde{I}_{ra}$ και στα $(-0.5, 1)$, $(1, 1)$ για το $\tilde{I}_{rb}$. Τα σημεία αυτά εμφάνισης του μέγιστου ρεύματος παραμένουν σταθερά για τις διάφορες τιμές του συντελεστή ισχύος.

Η τάση στα άκρα του φορτίου ήταν 1 α.μ.

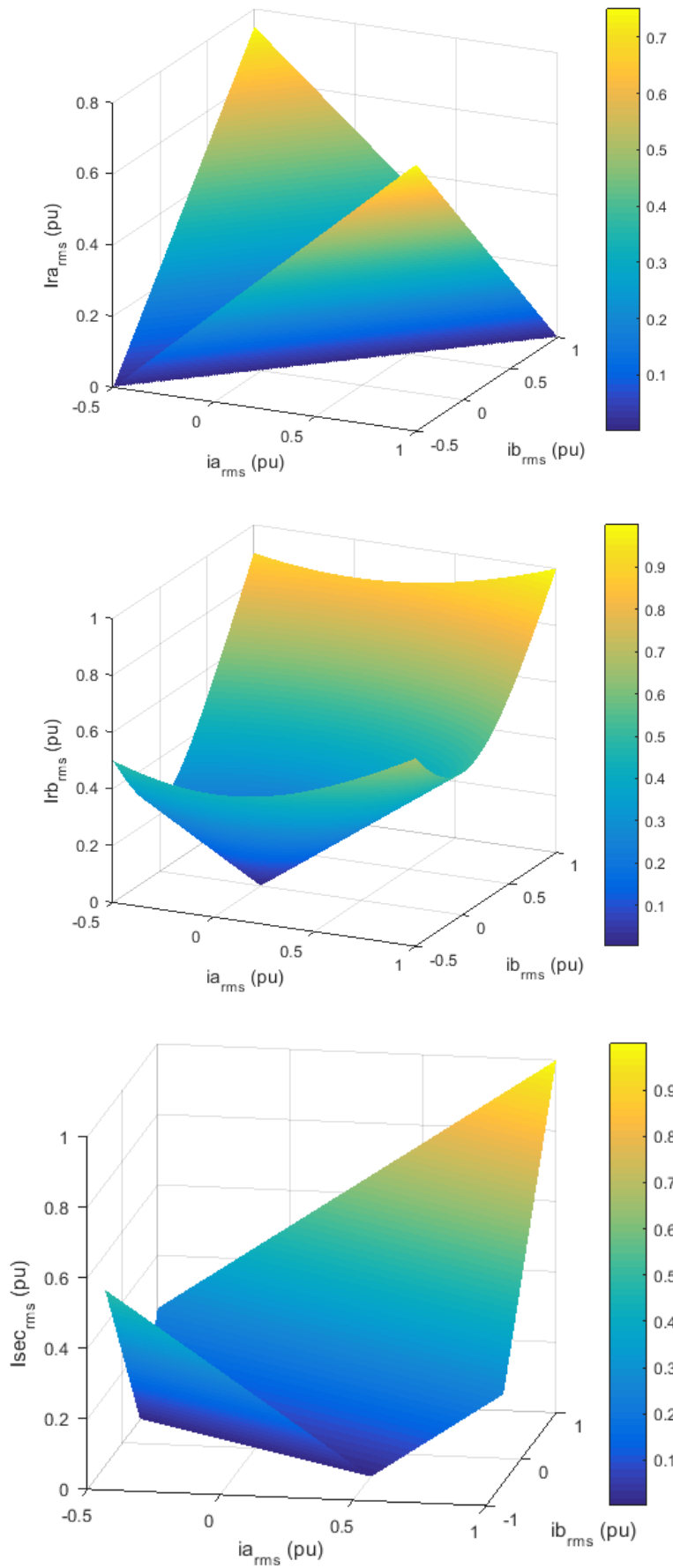
5.1.1 Συντελεστής ισχύος 1 ($\phi_{Load}=0^\circ$)



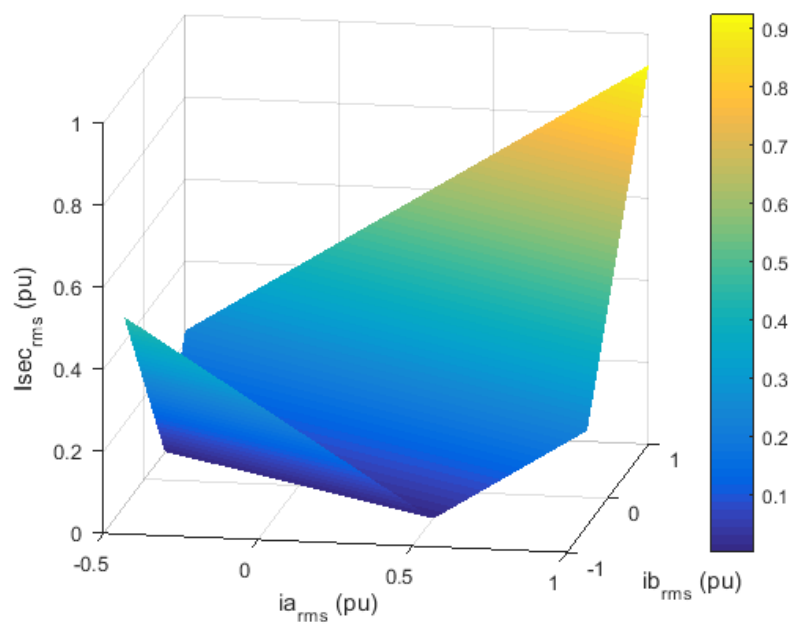
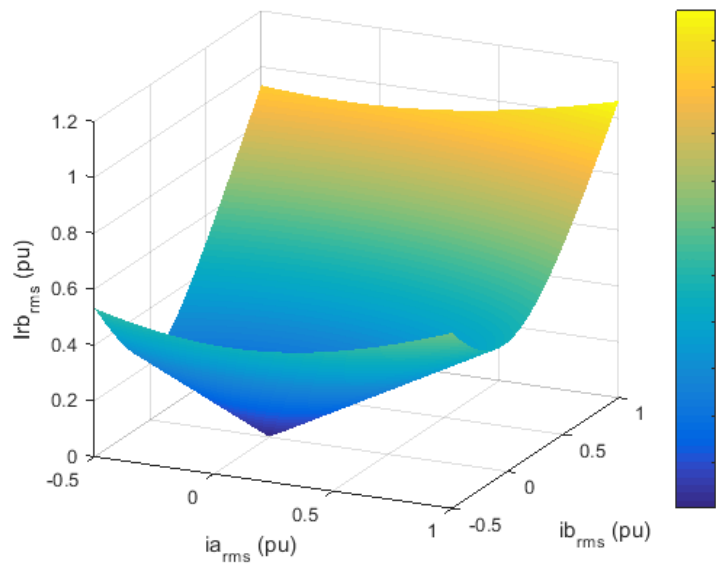
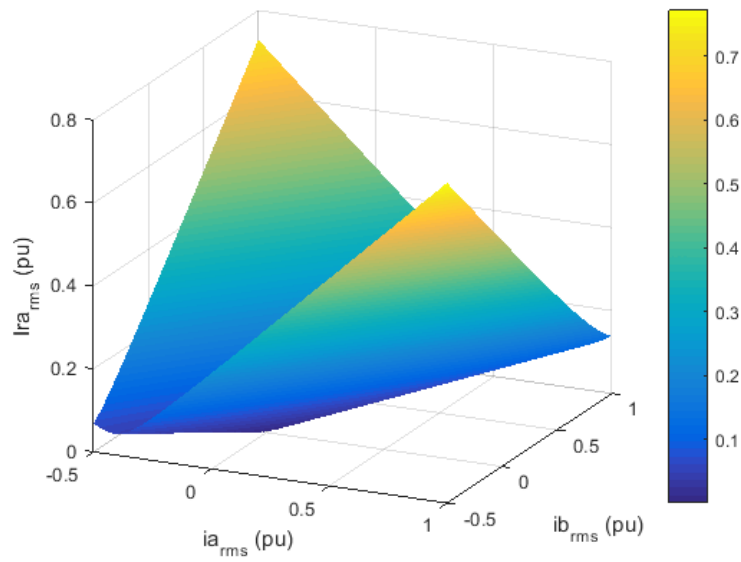
5.1.2 Συντελεστής ισχύος 0.966 ($\phi_{\text{Load}}=15^\circ$)



5.1.3 Συντελεστής ισχύος 0.866 ($\phi_{\text{Load}}=30^\circ$)



5.1.4 Συντελεστής ισχύος 0.8 ($\phi_{\text{Load}}=36.9^\circ$)



5.2 Τιμές ρευμάτων αντιστροφών για τον μετασχηματιστή Τρίγωνο-Αστέρα.

Παρατίθεται πίνακας με τις μέγιστες τιμές των ρευμάτων αντιστάθμισης που καταγράφονται για διάφορες τιμές του συντελεστή ισχύος των φορτίων.

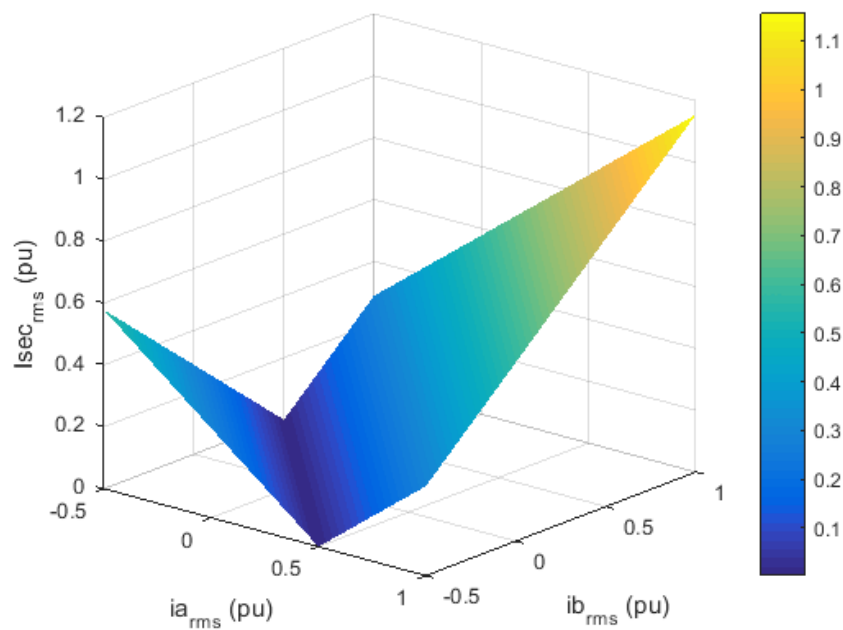
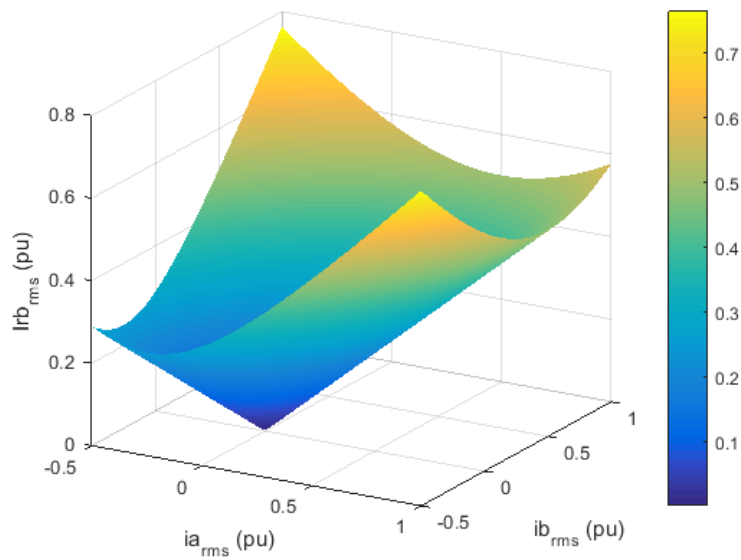
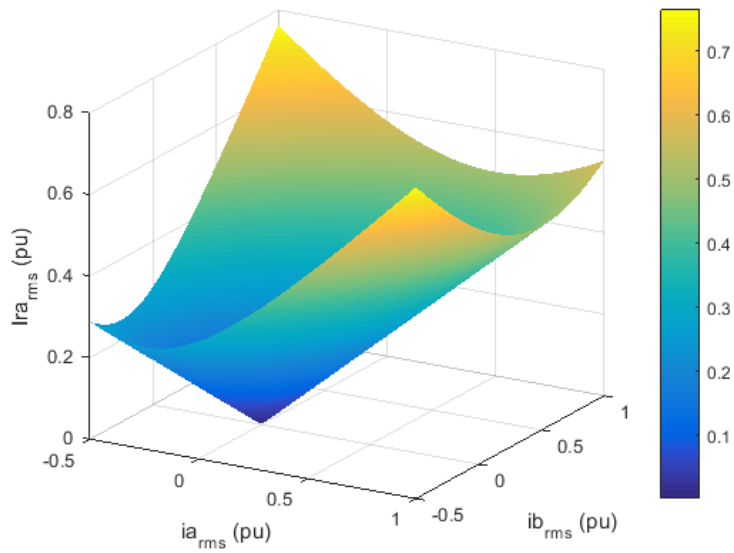
$\phi_{Load} (^{\circ})$	$\tilde{I}_{ra_max}(\alpha.\mu.)$	$\tilde{I}_{rb_max}(\alpha.\mu.)$	$\tilde{I}_{sec_max}(\alpha.\mu.)$	$\tilde{I}_{prim_max}(\alpha.\mu.)$
0	0.76	0.76	1.15	1
10	0.77	0.8	1.14	0.98
15	0.77	0.83	1.12	0.97
20	0.77	0.88	1.02	0.88
25	0.76	0.95	1.05	0.9
30	0.75	1	1	0.86
36.9	0.77	1.06	0.92	0.8

Πίνακας 5.2 Μέγιστες τιμές ρευμάτων αντιστροφών για τις διάφορες τιμές του συντελεστή ισχύος των φορτίων

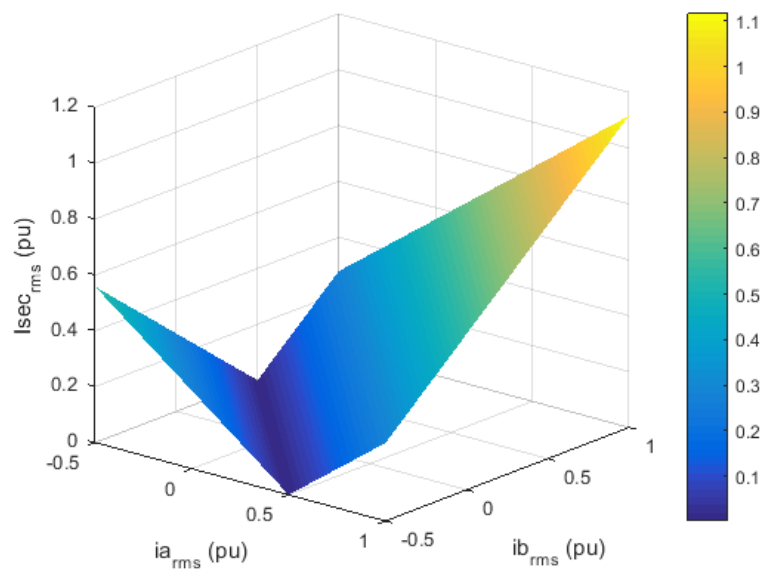
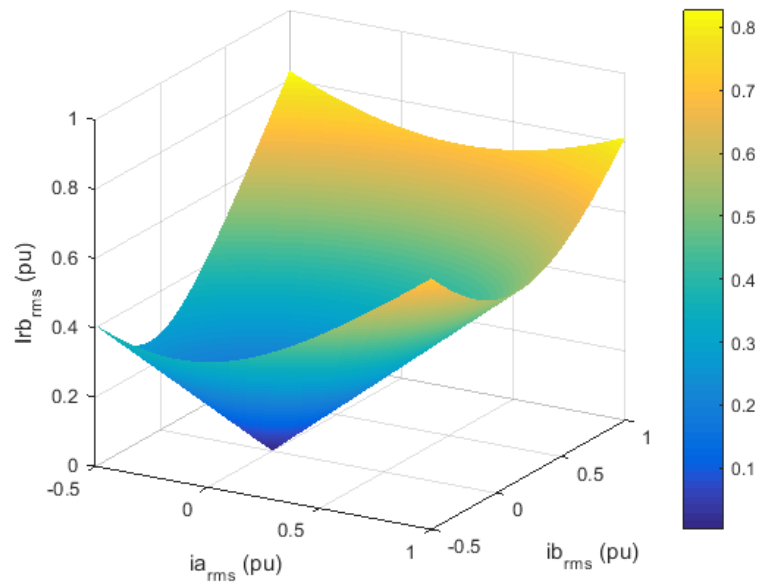
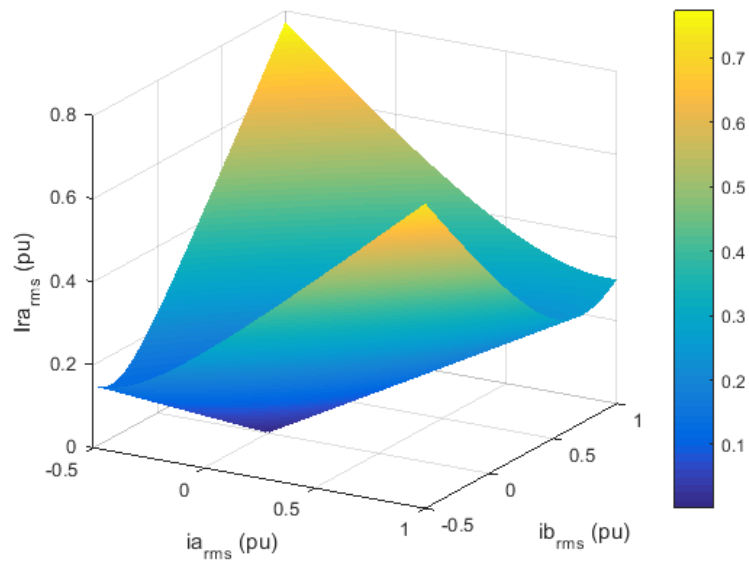
Όπως θα διαπιστώσουμε και από τα παρακάτω διαγράμματα, οι μέγιστες τιμές καταγράφονται για το $\tilde{I}_{ra}$ στο (1,-0.5) και στο (-0.5,1) ενώ για το $\tilde{I}_{rb}$ ενίοτε στο (-0.5,1) ενίοτε στο (1,1).

Η τάση στα άκρα του φορτίου ήταν 1 α.μ.

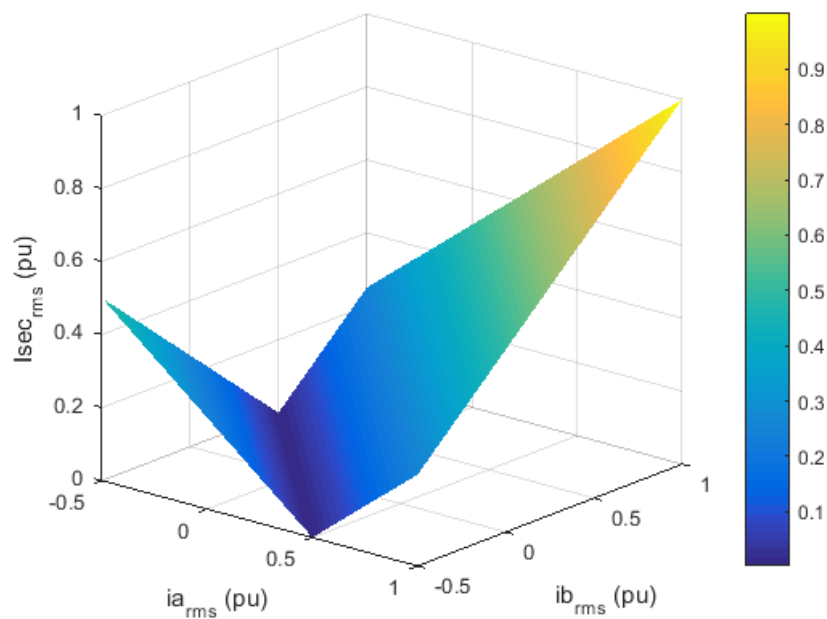
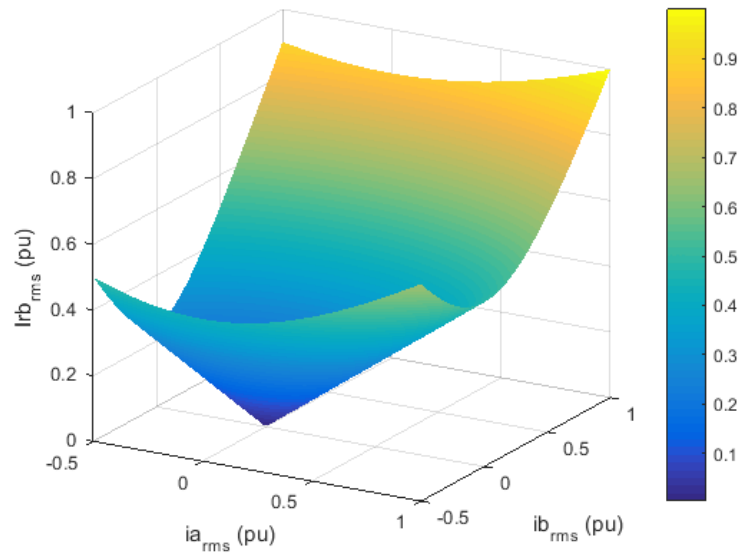
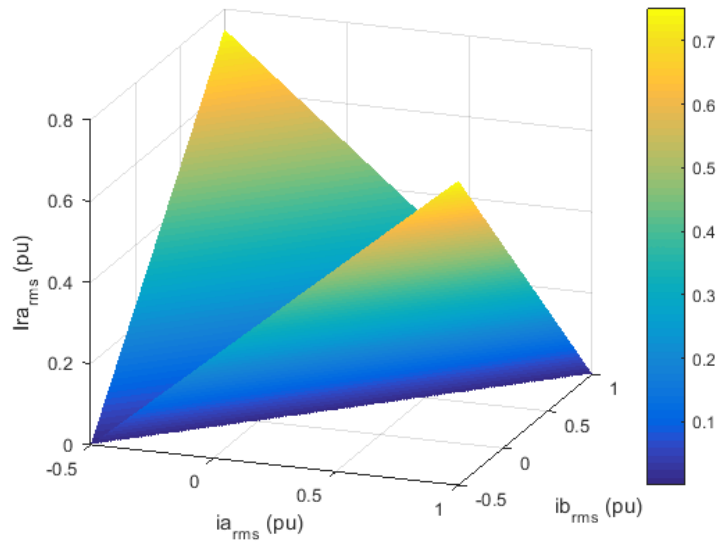
5.2.1 Συντελεστής ισχύος 1 ($\phi_{\text{Load}}=0^\circ$)



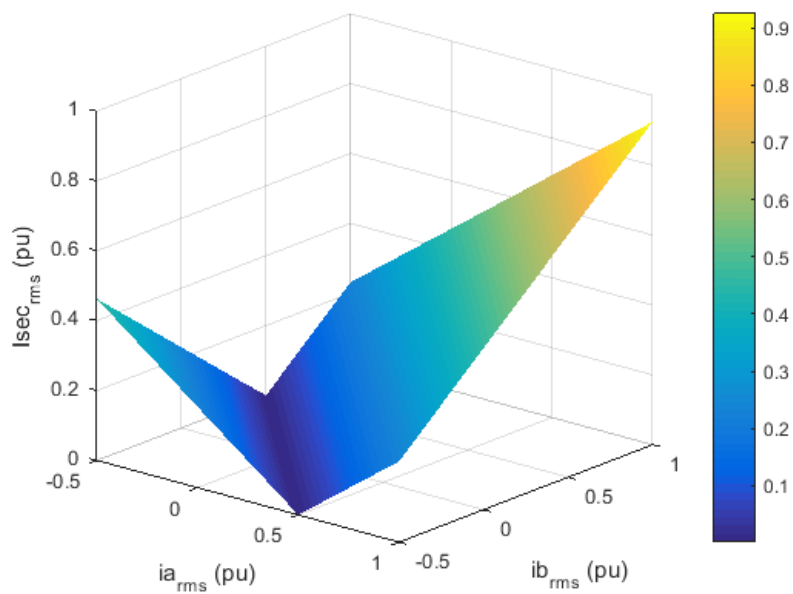
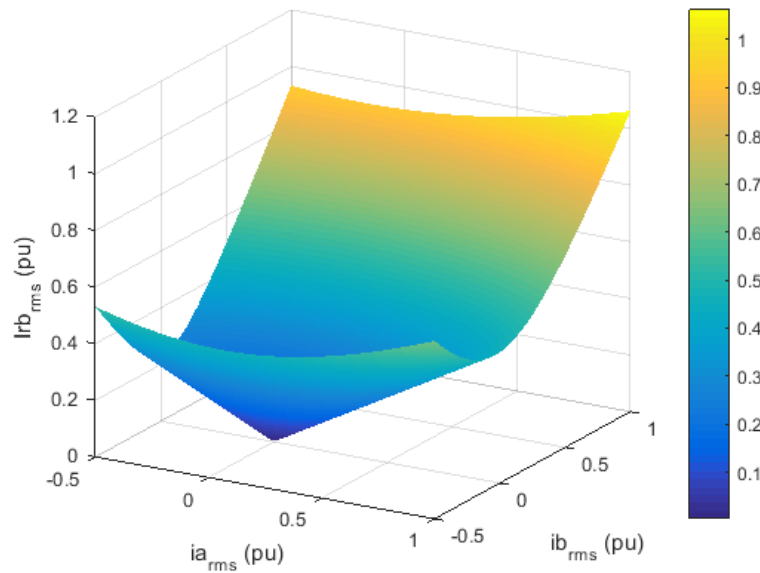
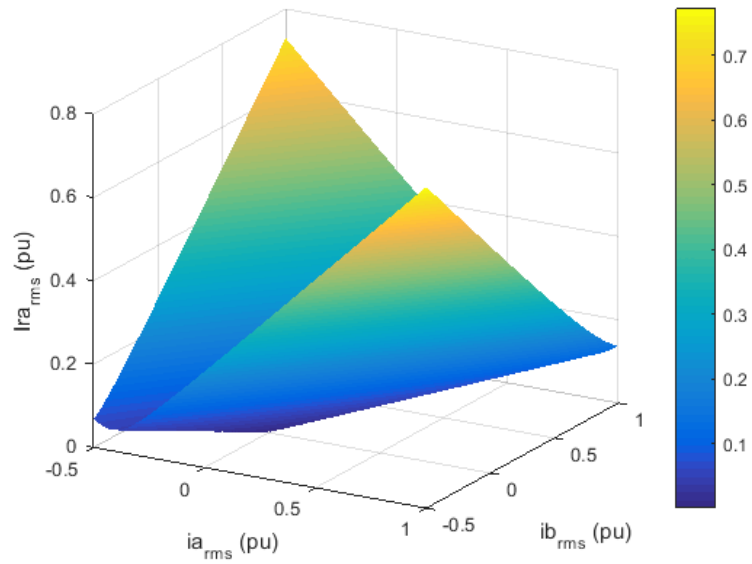
5.2.2 Συντελεστής ισχύος 0.966 ($\phi_{\text{Load}}=15^\circ$)



5.2.3 Συντελεστής ισχύος 0.866 ($\phi_{\text{Load}}=30^\circ$)



5.2.4 Συντελεστής ισχύος 0.799 ($\phi_{\text{Load}}=36.9^\circ$)



5.3 Παρατηρήσεις

Παρατηρούμε καταρχάς ότι τα μέγιστα ρεύματα σημειώνονται στις ακραίες φορτίσεις (1,-0,5). Επίσης, η μείωση του συντελεστή ισχύος του φορτίου, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του μέγιστου ρεύματος του αντιστροφέα.

Παράλληλα, συνεπάγεται την αύξηση της ασυμμετρίας των ρευμάτων στις δύο πλευρές της διάταξης αντιστάθμισης, και την αύξηση των απωλειών ενεργού ισχύος στους αντιστροφείς. Αυτό είναι λογικό καθώς κατά την αύξηση της γωνίας φορτίου, το ρεύμα του ενός φορτίου πλησιάζει την τάση του, ενώ το ρεύμα του άλλου φορτίου απομακρύνεται περαιτέρω από αυτήν. Συνεπώς στη μια περίπτωση χρειάζεται μεγαλύτερη επίδραση του αντιστροφέα στο ρεύμα γραμμής από ότι στην άλλη, δηλαδή μεγαλύτερο άεργο ρεύμα.

Επίσης, η μείωση του συντελεστή ισχύος, συνεπάγεται και αύξηση των απωλειών αέργου ισχύος του φορτίου, επομένως στο παράδειγμά μας, το κάθε σημείο του επιπέδου (ia,ib) συνεπάγεται διαφορετική ενεργό ισχύ προς το φορτίο για τις διαφορετικές τιμές του συντελεστή ισχύος. Αυτό αποτυπώνει και η πτώση του μέγιστου ρεύματος δικτύου το οποίο είναι συμφασικό με την τάση δικτύου. Αυτό, με άλλα λόγια, σημαίνει ότι μια δοσμένου μεγέθους διάταξη αντιστάθμισης, μπορεί να αντισταθμίσει ένα όλο και μικρότερο φορτίο, καθώς αυξάνεται ο συντελεστής ισχύος του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Συμπεράσματα, εμπλουτισμός της μελέτης

6.1 Συμπεράσματα

Οι δύο μετασχηματιστές έχουν παρόμοια συμπεριφορά για τις διάφορες περιοχές λειτουργίας του συστήματος. Και στις δύο περιπτώσεις σημειώνεται σαν μέγιστη τιμή του ρεύματος αντιστροφέα το $\tilde{I}_{r_max}=1,06$ α.μ., για συντελεστή ισχύος 0,8. Οπότε στη μεταξύ τους σύγκριση δεν επηρεάζει κανένας από τους δύο το μέγεθος του αντιστροφέα. Επομένως ο αντιστροφέας, θα πρέπει να μπορεί να διαχειριστεί ένα ρεύμα της τάξης μεγέθους του 1,06 α.μ..

Όπως ήταν αναμενόμενο, στις ακραίες φορτίσεις (-0.5,1) παρουσιάζεται πολύ εντονότερο το πρόβλημα, και σημειώνονται οι μέγιστες τιμές του ρεύματος αντιστροφέα.

Η αύξηση του συντελεστή ισχύος των φορτίων, επίσης συμβάλει στην αύξηση του ζητούμενου ρεύματος αντιστάθμισης. Η επίδρασή της μάλιστα είναι ακόμη μεγαλύτερη, αν συνυπολογίσουμε την ανάγκη αύξησης του ρεύματος τροφοδοσίας, ώστε να καλυφθούν οι απώλειες αέργου ισχύος που προκαλούνται. Όπως σημειώθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, μια δοσμένη διάταξη αντιστάθμισης, μπορεί να καλύψει όλο και μικρότερης ισχύος φορτίο, καθώς αυξάνεται ο συντελεστής ισχύος του.

6.2 Εμπλουτισμός της μελέτης

Όπως σημειώθηκε και σε άλλα σημεία του κειμένου, η εργασία περιλαμβάνει αρκετές απλοποιήσεις. Μια βαθύτερη μελέτη των προβλημάτων αντιστάθμισης ισχύος σε υποσταθμούς ηλεκτρικών αμαξοστοιχιών, θα απαιτούσε την πληρέστερη περιγραφή του προβλήματος, για παράδειγμα με το να ληφθούν υπόψιν οι αρμονικές συνιστώσες ρεύματος στο σύστημα και να εξετασθεί ο προσδιορισμός κατάλληλων φίλτρων για την καταστολή τους.

Η σωστότερη προσομοίωση της αμαξοστοιχίας, όχι σαν μια απλή πηγή ρεύματος, αλλά σαν επαγωγικού κινητήρα, οδηγούμενο από μετατροπέα με ανόρθωση στην είσοδο του, είναι άλλη μια παράμετρος προς μελλοντική βελτίωση.

Τέλος, μπορούν να μελετηθούν κι άλλες διατάξεις μετασχηματιστών, με ευρεία χρήση στους υποσταθμούς τροφοδοσίας ηλεκτρικών αμαξοστοιχιών, όπως οι Scott, Le Blanc, και πώς επηρεάζουν αυτοί με τη σειρά τους το μέγεθος της διάταξης αντιστάθμισης.

Βιβλιογραφία

- [1], S. M. Mousavi G., Adel Tabakhpour L., Ewald F. Fuchs, Fellow, IEEE, and Kamal Al-Haddad, Fellow, IEEE : *Power Quality Issues in Railway Electrification: A Comprehensive Perspective*
- [2] <https://www.independent.co.uk/student/student-life/technology-gaming/how-we-can-make-super-fast-hyperloop-travel-reality-a7529316.html>
- [3] <https://www.iefimerida.gr/politiki/kyriakos-mitsotakis-kinitra-gia-ilektrokinita-ih>
- [4] Bruno Busco, Pompeo Marino, Mario Porzio, Roberta Schiavo, and Francesco Vasca, Member, IEEE : *Digital Control and Simulation for Power Electronic Apparatus in Dual Voltage Railway Locomotive*
- [5] [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%BF%CE%B3%CF%81%CE%AC%CF%86%CE%BF%CF%82_\(%CF%84%CF%81%CE%B1%CE%AF%CE%BD%CE%B1\)](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%BF%CE%B3%CF%81%CE%AC%CF%86%CE%BF%CF%82_(%CF%84%CF%81%CE%B1%CE%AF%CE%BD%CE%B1))
- [6] N.Y. Dai K.W. Lao M.C. Wong C.K. Wong: *Hybrid power quality conditioner for co-phase power supply system in electrified railway*
- [7] R. Barnes and K. T. Wong, "Unbalance and harmonic studies for the Channel Tunnel railway system," *IEE Proc. Elect. Power Appl.*, vol. 138, pp. 41-50, 1991.
- [8] Chuanping Wu, An Luo, Senior Member, IEEE, John Shen, Fellow, IEEE, Fu Jun Ma, and Shuangjian Peng: *A Negative Sequence Compensation Method Based on a Two-Phase Three-Wire Converter for a High-speed Railway Traction Power Supply System*
- [9] C. Bin-Kwie and G. Bing-Song: "Three phase models of specially connected transformers," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 11, pp. 323-330, 1996.
- [10] An Luo, Senior Member, IEEE, Chuanping Wu, John Shen, Fellow, IEEE, Zhikang Shuai, Member, IEEE, and Fujun Ma: *Railway Static Power Conditioners for High-speed Train Traction Power Supply Systems Using Three-phase V/V Transformers*
- [11] Hooman Erfanian Mazin, Wilsun Xu : *Harmonic cancellation characteristics of specially connected transformers*
- [12] F. J. Foley, "The impact of electrification on railway signalling systems," in *IET Professional Development Course on Railway Electrification Infrastructure and Systems (REIS)*, 2011, pp. 146-153.
- [13] Στέφανος Μανιάς, *Ηλεκτρονικά ισχύος*

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Π.1 Υπολογισμός ρευμάτων αντιστάθμισης για δοσμένη φόρτιση στο δευτερεύον και έλεγχος της προσομοίωσης για τον μετασχηματιστή ανοιχτού τριγώνου

```
%%%%%%%%% INVERTER'S CURRENTS AND CONTROL FOR V-v TRANSFORMER %%%%%%%%%%
clear all;

% TRANSFORMER
Kv=0.5;

%PHASORS OF THE LINE VOLTAGES OF THE SECONDARY
Va=3^(1/2)*Kv*exp(1i*pi/6);
Vb=3^(1/2)*Kv*exp(1i*pi/2);

%INVERTER
Vd=1.5;
f_c=1950;

%POWER FACTOR
pf=0; % φ_load
pf=pf*pi/180;

%I_LOAD ANGLE
ia_angle=pi/6-pf;
ib_angle=pi/2-pf;

%LOAD CURRENTS
ia_rms=0.9; ib_rms=0.4;% rms value of load current in phase a and b
ia_30=ia_rms*cos(pf); ib_90=ib_rms*cos(pf);

% PHASOR'S OF CONVERTER'S CURRENTS

ira=0.57735*(ia_30+ib_90)-ia*exp(1i*(pi/6))+ia_rms*sin(pf)*exp(1i*(2*pi/3));
irb=0.57735*(ia_30+ib_90)*exp(2i*pi/3)-ib_90*exp(1i*(pi/2))+ib_rms*sin(pf)*exp(1i*pi);

[ira_angle,ira_value]=cart2pol(real(ira),imag(ira)); % phasor's in polar
[irb_angle,irb_value]=cart2pol(real(irb),imag(irb));

ira_angle=ira_angle*180/pi; %angle in degrees
irb_angle=irb_angle*180/pi;

% POWER TEST
I_sec_a=ira+ia_rms*exp(1i*ia_angle);
I_sec_b=irb+ib_rms*exp(1i*ib_angle);

[I_sec_a_angle,I_sec_a_value]=cart2pol(real(I_sec_a),imag(I_sec_a)); % in polar
[I_sec_b_angle,I_sec_b_value]=cart2pol(real(I_sec_b),imag(I_sec_b));

I_sec_a_angle=I_sec_a_angle*180/pi; %angle in degrees
I_sec_b_angle=I_sec_b_angle*180/pi;

S_sec= conj(I_sec_a)*Va+conj(I_sec_b)*Vb; %Power from the grid
P_sec= real(S_sec);

Sra=conj(ira)*Va; %Power of the inverter
Srb=conj(irb)*Vb;
Pra= real(Sra);
Prb= real(Srb);

Sload_a=conj((ia/cos(pf))*exp(1i*(pi/6-pf)))*Va; %Power of the load
Sload_b=conj((ib/cos(pf))*exp(1i*(pi/2-pf)))*Vb;
```

```

Pload_a=real(Sload_a); % Real Power of the load
Pload_b=real(Sload_b);

%ANSWERS IN THE RIGHT FORM
pf=pf*180/pi;
ia_angle=ia_angle*180/pi;
ib_angle=ib_angle*180/pi;

%INVERTER
Vinv_a=-1i*0.5*ira+Va;
Vinv_b=-1i*0.5*irb+Vb;
[Vinv_a_angle,Vinv_a_value]=cart2pol(real(Vinv_a),imag(Vinv_a));
[Vinv_b_angle,Vinv_b_value]=cart2pol(real(Vinv_b),imag(Vinv_b));

Vinv_a_angle=Vinv_a_angle*180/pi;
Vinv_b_angle=Vinv_b_angle*180/pi;

```


Π.2 Δημιουργία επιφανειών ρευμάτων αντιστάθμισης και ρευμάτων δευτερεύοντος του μετασχηματιστή σε όλες τις περιοχές λειτουργίας

```

%%%%%%%%% INVERTER'S CURRENTS SURFACES FOR V-v TRANSFORMER %%%%%%%%%%
clear all;
%PHASORS OF THE LINE VOLTAGES OF THE SECONDARY

%POWER FACTOR
pf=0;
pf=pf*pi/180;

%LOAD ANGLE
ia_angle=pi/6-pf;
ib_angle=pi/2-pf;

%LOAD CURRENTS
ia=linspace(-0.5,1,150);  ib=linspace(-0.5,1,150);
[ia_rms,ib_rms]=meshgrid(ia,ib);
[ia_30,ib_90]=meshgrid(ia*cos(pf),ib*cos(pf));

%PHASORS OF INVERTER'S CURRENTS
ira=(0.57735).*(ia_30+ib_90)-ia_30.*exp(1i*(pi/6))+ia_rms.*sin(pf).*exp(1i*(2*pi/3));
irb=(0.57735).*(ia_30+ib_90).*exp(2i*pi/3)-ib_90.*exp(1i*pi/2)
+ib_90.*sin(pf).*exp(1i*pi);

[ira_angle,ira_value]=cart2pol(real(ira),imag(ira)); %converter's currents in polar
[irb_angle,irb_value]=cart2pol(real(irb),imag(irb));

I_sec_a=ira+ia/cos(pf)*exp(1i*(pi/6-pf));

[I_sec_a_angle,I_sec_a_value]=cart2pol(real(I_sec_a),imag(I_sec_a));

%ANSWERS IN THE RIGHT FORM
pf=pf*180/pi;
ia_angle=ia_angle*180/pi;
ib_angle=ib_angle*180/pi;

%Imax
Imaxa=max(max(ira_value,[],2),[],1);
disp('Imaxa is')
disp (Imaxa);

Imaxb=max(max(irb_value,[],2),[],1);
disp('Imaxb is')
disp (Imaxb);

Imaxsec=max(max(I_sec_a_value,[],2),[],1);
disp('Imaxsec is')
disp (Imaxsec);

%PLOT
figure (1);
surf(ia_rms,ib_rms,ira_value);
xlabel('ia_r_m_s (pu)');
ylabel('ib_r_m_s (pu)');
zlabel('Ira_r_m_s (pu)');
shading interp; colorbar;
view (25,20);

figure (2);
surf(ia_rms,ib_rms,irb_value);
xlabel('ia_r_m_s (pu)');
ylabel('ib_r_m_s (pu)');

```

```
zlabel('Irb_r_m_s (pu)');  
shading interp; colorbar;  
view (25,20);  
  
figure (3) ;  
surf(ia_rms,ib_rms,I_sec_a_value);  
xlabel('ia_r_m_s (pu)');  
ylabel('ib_r_m_s (pu)');  
zlabel('Isec_r_m_s (pu)');  
shading interp; colorbar;  
view (25,15);
```

Π.3 Υπολογισμός ρευμάτων αντιστάθμισης για δοσμένη φόρτιση στο δευτερεύον και έλεγχος της προσομοίωσης για τον μετασχηματιστή τρίγωνο αστέρα

```
%%%%%%%%% INVERTER'S CURRENTS AND CONTROL FOR Δ-Y TRANSFORMER %%%%%%%%%%
clear all;

%TRANSFORMER
Kv=0.5;

%PHASORS OF THE LINE VOLTAGES OF THE SECONDARY
Va=3*Kv*exp(1i*pi/3);
Vb=3*Kv*exp(1i*2*pi/3);

%INVERTER
Vd=2.5;
f_c=1950;

%POWER FACTOR
pf=0;
pf=pf*pi/180;

%LOAD ANGLE
ia_angle=pi/3-pf;
ib_angle=2*pi/3-pf;

%LOAD CURRENTS
ia_rms=0.5; ib_rms=0.1;% rms value of load current in phase a and b
ia_60=ia_rms*cos(pf); ib_120=ib_rms*cos(pf);

%PHASORS OF CONVERTERS CURRENTS
ira=0.57735*(ia_60+ib_120)*exp(1i*pi/6)-ia_60*exp(1i*pi/3)+ia_rms*sin(pf)*exp(5i*pi/6);

irb=0.57735*(ia_60+ib_120)*exp(5i*pi/6)-
ib_120*exp(2i*pi/3)+ib_rms*sin(pf)*exp(7i*pi/6);

[ira_angle,ira_value]=cart2pol(real(ira),imag(ira)); %converter's currents in polar
[irb_angle,irb_value]=cart2pol(real(irb),imag(irb));

ira_angle=ira_angle*180/pi; %angle in degrees
irb_angle=irb_angle*180/pi;

% POWER TEST
I_sec_a=ira+ia_rms*exp(1i*(ia_angle));
I_sec_b=irb+ib_rms*exp(1i*(ib_angle));

[I_sec_a_angle,I_sec_a_value]=cart2pol(real(I_sec_a),imag(I_sec_a));
[I_sec_b_angle,I_sec_b_value]=cart2pol(real(I_sec_b),imag(I_sec_b));

I_sec_a_angle=I_sec_a_angle*180/pi;
I_sec_b_angle=I_sec_b_angle*180/pi;

S_sec= conj(I_sec_a)*Va+conj(I_sec_b)*Vb; %Power from the grid
P_sec= real(S_sec);

Sra=conj(ira)*Va; %Power of the inverter
Srb=conj(irb)*Vb;
Pra= real(Sra);
Prb= real(Srb);

Sload_a=conj((ia_rms)*exp(1i*(ia_angle)))*Va; %Power of the load
Sload_b=conj((ib_rms)*exp(1i*(ib_angle)))*Vb;
```

```

Pload_a=real(Sload_a); % Real Power of the load
Pload_b=real(Sload_b);

%ANSWERS IN THE RIGHT FORM
pf=pf*180/pi;
ia_angle=ia_angle*180/pi;
ib_angle=ib_angle*180/pi;

%INVERTER
Vinv_a=-1i*0.5*ira+Va;
Vinv_b=-1i*0.5*irb+Vb;
[Vinv_a_angle,Vinv_a_value]=cart2pol(real(Vinv_a),imag(Vinv_a));
[Vinv_b_angle,Vinv_b_value]=cart2pol(real(Vinv_b),imag(Vinv_b));

Vinv_a_angle=Vinv_a_angle*180/pi;
Vinv_b_angle=Vinv_b_angle*180/pi;

```

Π.4 Δημιουργία επιφανειών ρευμάτων αντιστάθμισης και ρευμάτων δευτερεύοντος του μετασχηματιστή σε όλες τις περιοχές λειτουργίας για το μετασχηματιστή τρίγωνο-αστέρα

```

%%%%%%%%% INVERTER CURRENTS SURFACES FOR Δ-Y TRANSFORMER %%%%%%%%%%
clear all;

%POWER FACTOR
pf=0;
pf=pf*pi/180;

%LOAD ANGLE
ia_angle=pi/3-pf;
ib_angle=2*pi/3-pf;

%LOAD CURRENTS
ib=linspace(-0.5,1,150); ia=linspace(-0.5,1,150);
[ia_rms,ib_rms]=meshgrid(ia,ib);
[ia_60,ib_120]=meshgrid(ia*cos(pf),ib*cos(pf));

%PHASORS OF INVERTER'S CURRENTS

ira=0.57735.*(ia_60+ib_120).*exp(1i*pi/6)-
ia_60.*exp(1i*pi/3)+ia_rms.*sin(pf).*exp(5i*pi/6);

irb=0.57735.*(ia_60+ib_120).*exp(5i*pi/6)-
ib_120.*exp(2i*pi/3)+ib_rms.*sin(pf).*exp(7i*pi/6);

[ira_angle,ira_value]=cart2pol(real(ira),imag(ira)); %inverter's currents in polar
[irb_angle,irb_value]=cart2pol(real(irb),imag(irb));

ira_angle=ira_angle*180/pi; %angle in degrees
irb_angle=irb_angle*180/pi;

% POWER TEST
Iseca=ira+ia_rms*exp(1i*(ia_angle));
[Iseca_angle,I_sec_1_value]=cart2pol(real(Isec_a),imag(Isec_a));

Iseca_angle=Iseca_angle*180/pi;

%Imax
Imaxa=max(max(ira_value,[],2),[],1);
disp('Imax a is')
disp (Imaxa)

Imaxb=max(max(irb_value,[],2),[],1);
disp('Imax b is')
disp (Imaxb)

Imax_sec=max(max(I_sec_1_value,[],2),[],1);
disp('Imax sec is')
disp (Imax_sec)

%PLOT
figure (1);
surf(ia_rms,ib_rms,ira_value);
xlabel('ia_r_m_s (pu)');
ylabel('ib_r_m_s (pu)');
zlabel('Ira_r_m_s (pu)');
shading interp; colorbar;
view (30,20);

```

```

figure (2) ;
surf(ia_rms,ib_rms,irb_value);
xlabel('ia_r_m_s (pu)');
ylabel('ib_r_m_s (pu)');
zlabel('Irb_r_m_s (pu)');
shading interp; colorbar;
view (30,20);

figure (3);
surf(ia_rms,ib_rms,Iseca_value);
xlabel('ia_r_m_s (pu)');
ylabel('ib_r_m_s (pu)');
zlabel('Isec_r_m_s (pu)');
shading interp; colorbar;
view (40,20);

```