



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Μελέτη των κυκλοφορούντων ρευμάτων στα DC μικροδίκτυα με σκοπό την ελαχιστοποίησή τους

Διπλωματική εργασία

Καλπάκης Θεόδωρος

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Μελέτη των κυκλοφορούντων ρευμάτων στα DC μικροδίκτυα με σκοπό την ελαχιστοποίησή τους

Διπλωματική εργασία

Καλπάκης Θεόδωρος

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 17/10/2016

.....

Ν. Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Στ. Παπαθανασίου

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Π. Γεωργιλάκης

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

... ..

Καλπάκης Θεόδωρος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Καλπάκης Θεόδωρος, 2016.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, 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 παρον μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Νικόλαο Χατζηαργυρίου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα πραγματικά ενδιαφέρον θέμα.

Ευχαριστώ, επίσης, την ερευνήτρια Δρ. Χριστίνα Παπαδημητρίου για την συνεχή βοήθεια και στήριξή της καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Με το κλείσιμο του βασικού κύκλου σπουδών μου, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου που μου έδωσε την δυνατότητα να φτάσω ως εδώ, τον αδερφό μου Θανάση και τους φίλους μου που ήταν δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια με τη συνεχή στήριξή τους.

Στην οικογενειά μου, στους φίλους και τις φίλες μου, σας ευχαριστώ για όλα.

Περίληψη

Τα χαμηλής τάσης συνεχούς ρεύματος μικροδίκτυα (LVDC MGs) είναι μια τεχνολογία που ολοένα και περισσότερο τραβάει την προσοχή των ερευνητών. Λόγω των πλεονεκτημάτων τους έναντι στα αντίστοιχα AC δίκτυα, ήδη χρησιμοποιείται σε κάποιες εφαρμογές. Ωστόσο, κάποια απ'τα μειονεκτήματά τους είναι αρκετά σημαντικά, ώστε η τεχνολογία αυτή να μην έχει αποκτήσει προς το παρόν ευρεία χρήση. Το σημαντικότερο μειονέκτημά τους είναι η δημιουργία ρευμάτων τα οποία αντί να καταλήγουν στο φορτίο, κυκλοφορούν σε βρόχους που δημιουργούνται μεταξύ των πηγών. Έτσι οδηγούν μεγάλες απώλειες ενέργειας. Τα ρεύματα αυτά ονομάζονται κυκλοφορούντα ρεύματα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν οι συνθήκες δημιουργίας τους σε διάφορες τοπολογίες των LVDC MGs με σκοπό την ελαχιστοποίησή τους. Η καταπολέμηση του συγκεκριμένου φαινομένου έχει επιτευχθεί μέσω της εφαρμογής ενός πρωτογενούς ελέγχου στο δίκτυο.

Αναλυτικότερα, στο κεφάλαιο 1, αναλύεται η έννοια των LVDC MGs και παρουσιάζονται τα δύο είδη των τοπολογιών που αυτά απαντώνται. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους έναντι των αντίστοιχων AC δικτύων και διατυπώνεται το πρόβλημα της δημιουργίας των κυκλοφορούντων ρευμάτων. Τέλος, γίνεται μία σύντομη εισαγωγή στα διάφορα επίπεδα ελέγχου που εφαρμόζονται στα LVDC MGs προκειμένου να αντιμετωπίσουμε τα κυκλοφορούντα ρεύματα.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται η θεωρητική ανάλυση των τοπολογιών που εξετάζονται στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία και μέσω των εξισώσεων των ρευμάτων του εκάστοτε δικτύου, επιτυγχάνεται η μοντελοποίηση της εκάστοτε τοπολογίας. Στην συνέχεια, μέσω των σχέσεων αυτών, απομονώνονται τα κυκλοφορούντα ρεύματα και προκύπτει η συνθήκη δημιουργίας τους σε κάθε τοπολογία.

Στο κεφάλαιο 3 εφαρμόζεται ο πρωτογενής παθητικός έλεγχος Droop (Droop Control) με σκοπό την καταστολή των κυκλοφορούντων ρευμάτων. Αποτέλεσμα της εφαρμογής του ελέγχου Droop είναι η δημιουργία εξισώσεων για κάθε τοπολογία, βάση των οποίων ελαχιστοποιούνται τα κυκλοφορούντα ρεύματα.

Στο κεφάλαιο 4, υπολογίζονται τα αποτελέσματα της θεωρητικής ανάλυσης κάθε τοπολογίας. Τα αποτελέσματα προκύπτουν από τις εξισώσεις των ρευμάτων του κεφαλαίου 2 και για συγκεκριμένα μεγέθη της τοπολογίας. Στη συνέχεια συγκρίνονται με τα αντίστοιχα μεγέθη που προκύπτουν απ'την προσομοίωση με χρήση των προγραμμάτων Matlab και Matlab Simulink, με σκοπό τον έλεγχο της ορθότητας των θεωρητικών εξισώσεων πριν την εφαρμογή του ελέγχου Droop (Droop Control). Ακόμη, με τη βοήθεια αυτών των προγραμμάτων και χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του κεφαλαίου 3, εφαρμόζεται ο έλεγχος Droop σε όλες τις παραπάνω τοπολογίες. Απώτερος σκοπός είναι ο έλεγχος της ορθότητάς του και της αποτελεσματικότητας του ελέγχου Droop στην αντιμετώπιση του φαινομένου των κυκλοφορούντων ρευμάτων.

Λέξεις κλειδιά : Χαμηλής τάσης και συνεχούς ρεύματος μικροδίκτυα (LVDC MGs), κυκλοφορούντα ρεύματα, μονοπολική συνδεσμολογία, διπολική συνδεσμολογία, έλεγχος Droop, δείκτης Droop Index (DI), διαμοιρασμός φορτίου, αντιστάσεις Droop.

Abstract

Low voltage DC micro-grids (LVDC MGs) are an attracting technology due to their advantages over low voltage AC micro-grids (LVAC MGs). Despite their advantages, at distribution levels, DC distribution systems are not widely used yet, and their applications are limited to specific areas. Their limited usage is a result of some serious disadvantages they appear. The major disadvantage is the existence of circulating currents. The term “circulating currents” refers to certain currents produced from the voltage sources. These currents are flowing in the micro-grid without yielding any power to the load. Instead, they cause great power losses by “circulating” in a loop created between sources. This loop doesn’t contain the load. In this diploma thesis the conditions that lead to the existence of the circulating currents are examined. In addition, a passive primary control method, called Droop Control is implemented aiming at the reduction of the circulating currents in different topologies.

Extensively, in the epigraph chapter (Chapter 1) the concept of the low voltage DC micro-grids (LVDC MGs) is elaborated and the two different major categories of LVDC MGs are presented. Afterwards, their advantages and disadvantages against low voltage AC micro-grids (LVAC MGs) are presented and the problem of the circulating currents is stated. Finally, the several control levels that can be applied to the low voltage DC micro-grids (LVDC MGs) are introduced aiming to minimize their disadvantages and overcome the occurring problems.

In Chapter 2, the theoretical analysis for each topology is performed. As a result, the respective current equations are derived and they are used to model each topology. Through the same equations, the circulating currents are isolated leading to an important condition which indicates whether there are circulating currents in each topology or not.

In Chapter 3, the derived conditions are used so the primary passive control method known as Droop Control is implemented. As a result new equations are derived. These equations are used in a specific way, which will be thoroughly presented in this chapter. The usage of these equations aims at the decrease of the circulating currents in each topology.

In the last chapter (Chapter 4), the results of the theoretical analysis are computed with the usage of the equations derived in chapter 2. For each topology certain numerical data concerning the voltage source, the lines’ resistances and the resistive loads of each topology, have been used. Also, simulating each topology using the Matlab and Matlab Simulink software, the respective numerical results are computed. The results of the theoretical analysis are compared with the results of the simulation for every single topology. In this way the rightness of the derived theoretical equations is examined. In addition, using the same software and the derived equations of chapter 3, Droop Control is implemented in all topologies in order to be tested for its rightness and its effectiveness against the circulating currents.

Key words : low voltage DC micro-grids (LVDC MGs), circulating currents, unipolar topology, bipolar topology, Droop Control, Droop Index (DI), load sharing, Droop resistances.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1.....	14
Εισαγωγή.....	14
1.1 - DC μικροδίκτυα χαμηλής τάσης.....	15
1.2 - Τοπολογίες των μικροδικτύων χαμηλής τάσης.....	15
1.3 – Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των LVDC MGs έναντι των LVAC MGs.....	16
1.4 - Αντιμετώπιση των κυκλοφορούντων ρευμάτων μέσω ιεραρχικού ελέγχου.....	17
1.5 – Συνοπτικό περιεχόμενο θεωρητικού μέρους της εργασίας.....	20
Κεφάλαιο 2.....	21
Μελέτη και θεωρητική ανάλυση των κυκλοφορούντων ρευμάτων.....	21
2.1 – Εισαγωγή.....	22
2.2 – Μονοπολικές (Unipolar) συνδεσμολογίες.....	22
2.2.1 – Εισαγωγή.....	22
2.2.2 – Σύνδεση δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Two terminal DC unipolar connection).....	23
2.2.2.1 - Μαθηματική έκφραση των ρευμάτων I_1 και I_2 του δικτύου.....	24
2.2.2.2 - Μαθηματική έκφραση των κυκλοφορούντων ρευμάτων.....	25
2.2.2.3 - Η παρουσία των κυκλοφορούντων ρευμάτων στα ρεύματα I_1 και I_2	25
2.2.2.4 - Γενίκευση για περισσότερες από δύο πηγές: Σύνδεση n πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (n terminal DC unipolar connection).....	26
2.2.3.1 – Κοινή σύνδεση δύο παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources).....	29
2.2.3.2 – Γενίκευση για περισσότερες από δύο πηγές: Κοινή σύνδεση n παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with n parallel voltage sources).....	31
2.3 – Διπολικές (Bipolar) συνδεσμολογίες.....	31
2.3.1 – Εισαγωγή.....	31

2.3.2- Σύνδεση δύο πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου (DC bipolar connection).....	33
2.3.3- Σύνδεση τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (DC bipolar connection with 1 more voltage source connected between + - poles).....	37
2.4- Συμπεράσματα.....	41
Κεφάλαιο 3.....	42
Καταστολή των κυκλοφορούντων ρευμάτων μέσω της μεθόδου Droop Index.....	42
3.1 – Εισαγωγή.....	43
3.2 – Ο έλεγχος Droop μέσω της μεθόδου Droop Index.....	43
3.3 – Μονοπολικές (Unipolar) συνδεσμολογίες.....	45
3.3.1.1 – Σύνδεση δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Two terminal DC unipolar connection).....	46
3.3.1.2 - Γενίκευση για περισσότερες από δύο πηγές: Σύνδεση n πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (n terminal DC unipolar connection).....	48
3.3.2.1 – Κοινή σύνδεση δύο παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources).....	52
3.3.2.2 – Γενίκευση για περισσότερες από δύο πηγές: Κοινή σύνδεση n παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources).....	54
3.3 – Διπολικές (Bipolar) συνδεσμολογίες.....	55
3.3.1- Σύνδεση δύο πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου (DC bipolar connection).....	55
3.3.2- Σύνδεση τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (DC bipolar connection with 1 more voltage source connected between + - poles).....	60
3.4- Συμπεράσματα.....	66
Κεφάλαιο 4.....	67
Παρουσίαση των θεωρητικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.....	67

4.1 – Εισαγωγή.....	68
4.2 – Μονοπολικές (Unipolar) συνδεσμολογίες.....	68
4.2.1 – Σύνδεση δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Two terminal DC unipolar connection).....	68
4.2.1.1 – Περίπτωση 1 ^η : $V_{dc1} = V_{dc2}$	69
4.2.1.2 – Περίπτωση 2 ^η : $V_{dc1} \neq V_{dc2}$	71
4.2.2 – Σύνδεση n πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (n terminal DC unipolar connection).....	74
4.2.2.1 – Περίπτωση 2 ^η : $V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc3}$	75
4.2.2.2 – Περίπτωση 2 ^η : $V_{dc1} \neq V_{dc2} \neq V_{dc3}$	78
4.2.3 – Κοινή σύνδεση δύο παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources).....	80
4.2.3.1 – Περίπτωση 1 ^η : $V_{dc1} = V_{dc2}$	81
4.2.3.2 – Περίπτωση 2 ^η : $V_{dc1} \neq V_{dc2}$	83
4.2.4 - Κοινή σύνδεση n παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with n parallel voltage sources).....	86
4.2.4.1 – Περίπτωση 1 ^η : $V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc3} = V_{dc4}$	87
4.2.4.2 – Περίπτωση 2 ^η : $V_{dc1} \neq V_{dc2} \neq V_{dc3} \neq V_{dc4}$	90
4.3 – Διπολικές (Bipolar) συνδεσμολογίες.....	93
4.3.1- Σύνδεση δύο πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου (DC bipolar connection).....	93
4.3.1.1 – Περίπτωση 1 ^η : $V_{dc1} + V_{dc2} = 0$	94
4.3.1.2 – Περίπτωση 2 ^η : $V_{dc1} + V_{dc2} \neq 0$	96
4.3.2- Σύνδεση τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (DC bipolar connection with 1 more voltage source connected between + - poles).....	98
4.3.2.1 – Περίπτωση 1 ^η : $V_{dc1} + V_{dc2} = 0$ και $V_{dc1} + V_{dc2} - V_{dc3} = 0$	99
4.3.2.2 – Περίπτωση 2 ^η : $V_{dc1} + V_{dc2} \neq 0$ και $V_{dc1} + V_{dc2} - V_{dc3} \neq 0$	102
4.4- Συμπεράσματα.....	104
4.5- Εφαρμογή του Droop Index στις τοπολογίες και παρουσίαση των αποτελεσμάτων.....	104

4.5.1- Εφαρμογή του Droop Index στην τοπολογία σύνδεσης δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Droop Index in Two terminal DC unipolar connection).....	105
4.5.2- Εφαρμογή του Droop Index στην τοπολογία σύνδεσης n πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Droop Index in n terminal DC unipolar connection).....	110
4.5.3- Εφαρμογή του Droop Index στην τοπολογία κοινής σύνδεσης δύο παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Droop Index in One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources).....	115
4.5.4- Εφαρμογή του Droop Index στην τοπολογία κοινής σύνδεσης n παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Droop Index in One terminal DC unipolar connection with n parallel voltage sources).....	120
4.5.5- Εφαρμογή του Droop Index στην τοπολογία σύνδεσης δύο πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου (Droop Index in DC bipolar connection).....	126
4.5.6- Εφαρμογή του Droop Index στην τοπολογία σύνδεσης τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (Droop Index in DC bipolar connection with 1 more voltage source connected between + -).....	129
4.6- Συμπεράσματα.....	134
Κεφάλαιο 5.....	135
Μελέτη και θεωρητική ανάλυση των κυκλοφορούντων ρευμάτων.....	135
5.1 – Εισαγωγή.....	136
5.2 – Μονοπολικές (Unipolar) συνδεσμολογίες.....	136
5.3 – Εισαγωγή.....	138
Παράρτημα.....	139
1) Τοπολογία σύνδεσης δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Two terminal DC unipolar connection).....	139
2) Τοπολογία σύνδεσης n πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (n terminal DC unipolar connection).....	140
3) Τοπολογία κοινής σύνδεσης δύο παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources).....	141

4) Τοπολογία κοινής σύνδεσης n παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with n parallel voltage sources).....	141
5) Τοπολογία σύνδεση δύο πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου (DC bipolar connection).....	143
6) Τοπολογία σύνδεσης τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (DC bipolar connection with 1 more voltage source connected between + - poles).....	144
 Βιβλιογραφία.....	 145

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται η έννοια των χαμηλής τάσης συνεχούς ρεύματος μικροδικτύων (LVDC MGs) και παρουσιάζονται τα δύο είδη των τοπολογιών που αυτά απαντώνται. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους έναντι των χαμηλής τάσης και εναλασσόμενου ρεύματος μικροδικτύων (LVAC MGs) και διατυπώνεται το πρόβλημα της δημιουργίας των κυκλοφορούντων ρευμάτων. Τέλος, γίνεται μία σύντομη εισαγωγή στα διάφορα επίπεδα ελέγχου που μπορούμε να εφαρμόσουμε στα χαμηλής τάσης και συνεχούς ρεύματος μικροδικτύων (LVDC MGs) προκειμένου να αντιμετωπίσουμε τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν.

1.1 - DC μικροδίκτυα χαμηλής τάσης

Τα μικροδίκτυα (micro-grids) αποτελούν μία πρωτότυπη μορφή συστημάτων διαμοιρασμού ενέργειας, που ανήκουν στην ευρύτερη κλάση των smart-grids. Πρόκειται για μικρής κλίμακας δίκτυα που λειτουργούν σε χαμηλή (LV) και μέση (MV) τάση. Αποτελούνται από διάφορες πηγές ενέργειας, κυρίως ανανεώσιμης μορφής, διάφορες διατάξεις όπως DC converters και DC/AC inverters, αποθηκευτικούς μηχανισμούς και φορτία. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τους είναι ότι μπορούν εύκολα να απομονωθούν, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις βλάβης ή σφάλματος, αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία του δικτύου. Τα μικροδίκτυα μπορούν να λειτουργούν είτε με εναλασσόμενο (AC) είτε με συνεχές (DC) ρεύμα. Στην συγκεκριμένη εργασία, θα ασχοληθούμε μόνο με τα DC μικροδίκτυα χαμηλής τάσης (LVDC MGs). Προς το παρόν, τα LVDC μικροδίκτυα χρησιμοποιούνται σε απομονωμένα συστήματα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως είναι τα διάφορα συστήματα επικοινωνίας και διάφορα οχήματα. Αξίζει να σημειωθεί, ότι έχει προταθεί η χρήση τους σε αγροτικές περιοχές και σε νησιά.

1.2 - Τοπολογίες των μικροδικτύων χαμηλής τάσης

Οι τοπολογίες που συναντούμε τα DC μικροδίκτυα χαμηλής τάσης (LVDC MGs) χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Στις μονοπολικές (unipolar) και στις διπολικές (bipolar). Κάθε ένα απ' τα δύο είδη μπορεί να έχει διάφορες παραλλαγές οι οποίες αφορούν τον αριθμό των πηγών και των τρόπων με τον οποίο αυτές συνδέονται στον ζυγό του φορτίου. Στην συνέχεια της διπλωματικής θα εξετάσουμε διάφορα είδη τοπολογιών, τόσο μονοπολικών όσο και διπολικών. Η βασική διαφορά μεταξύ των δυο τοπολογιών, έγκειται στην ύπαρξη ή μη αντίθετης πολικότητας μεταξύ των πηγών συνεχούς τάσης. Πιο συγκεκριμένα, στην μονοπολική συνδεσμολογία, έχουμε πηγές θετικής πολικότητας, ενώ στην διπολική υπάρχουν πηγές και θετικής, αλλά και αρνητικής πολικότητας.

Αυτό που αξίζει να σημειώσουμε είναι κάποια σημαντικά επίπεδα συνεχών τάσεων στα οποία τα DC μικροδίκτυα χαμηλής τάσης (LVDC MGs) θα μπορούσαν να λειτουργήσουν. Έχοντας υπόψη μας ότι τα δίκτυα χαμηλής τάσης εναλασσόμενου ρεύματος λειτουργούν με επίπεδο τάσης 400/230V, έχουμε τα εξής δύο σημαντικά επίπεδα συνεχούς τάσης:

1. 326V σε μονοπολική συνδεσμολογία, $\pm 326V$ σε διπολική συνδεσμολογία.

Πολλές απ' τις ηλεκτρικές συσκευές που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα χαμηλής τάσης, περιέχουν ανορθωτές, οι οποίοι ανορθώνουν τα 230V της ενεργού τιμής της τάσης, στα 326V. Αυτές οι συσκευές θα μπορούσαν να συνδεθούν απευθείας σε ένα LVDC MGs με τάση λειτουργίας 326V σε μονοπολική συνδεσμολογία ή $\pm 326V$ σε διπολική συνδεσμολογία.

2. 230V σε μονοπολική συνδεσμολογία, $\pm 230V$ σε διπολική συνδεσμολογία.

Όλα τα καθαρά ωμικά φορτία που συνδέονται στα LVAC MGs με ενεργό τιμή τάσης 230V, θα μπορούσαν να συνδεθούν απευθείας σε ένα LVDC MGs με τάση

λειτουργίας 230V σε μονοπολική συνδεσμολογία ή $\pm 230V$ σε διπολική συνδεσμολογία.

1.3 – Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των LVDC MGs έναντι των LVAC MGs

Ο λόγος για τον οποίο τα DC μικροδίκτυα χαμηλής τάσης (LVDC MGs) αρχίζουν να τραβάνε περισσότερο την προσοχή τελευταία, είναι τα πλεονεκτήματα που έχουν έναντι των AC μικροδικτύων χαμηλής τάσης (LVAC MGs). Πιο συγκεκριμένα, τα LVDC έχουν:

1) Υψηλότερη απόδοση

Στα LVDC δεν υπάρχει άεργος ισχύς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν μικρότερες απώλειες στο δίκτυο και έτσι μεγαλώνει η απόδοσή τους. Ακόμη, καθώς η μεγάλη πλειονότητα των φορτίων λειτουργεί με συνεχές ρεύμα, στα LVDC MGs δεν χρειάζονται οι AC/DC μετατροπείς. Το γεγονός αυτό επηρεάζει άμεσα τις απώλειες ενέργειας, οι οποίες ελαττώνονται χωρίς την χρήση αυτών των μετατροπέων.

2) Καλύτερη ποιότητα ισχύος

Πέρα απ'την απουσία αέργου ισχύος που συνεισφέρει στην καλύτερη ποιότητα ισχύος, στα LVDC MGs έχουμε μικρότερα σφάλματα όσων αφορά τα ρεύματα του δικτύου. Αυτό συμβαίνει διότι η συνεισφορά των DC converter ή των DC πηγών στα σφάλματα των ρευμάτων είναι πολύ περιορισμένη στα LVDC MGs.

3) Ευκολότερο έλεγχο

Ο συντονισμός των πηγών συνεχούς τάσης είναι ευκολότερος, διότι ο έλεγχός τους γίνεται χωρίς την ανάγκη συγχρονισμού. Ακόμα ο έλεγχος της ροής φορτίου και των ρευμάτων είναι ευκολότερος λόγω της απουσίας αέργου ισχύος.

4) Χαμηλότερο κόστος

Η απουσία των AC/DC μετατροπέων στους οποίους αναφερθήκαμε νωρίτερα και γενικότερα οι μικρότερες απώλειες ρεύματος, έχουν ως αποτέλεσμα να μειώνεται το κόστος των LVDC MGs.

Ωστόσο, τα LVDC MGs παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα έναντι των LVAC MGs. Αυτά είναι:

1) Η δυσκολότερη προστασία των DC δικτύων έναντι των AC.

2) Ο χειρότερος διαμοιρασμός του φορτίου μεταξύ των πηγών.

Γενικότερα, θέλουμε το φορτίο να τροφοδοτείται απ'τις διάφορες πηγές με τρόπο τέτοιο ώστε οι πηγές να συμβάλουν εξίσου στην τροφοδοσία του. Για παράδειγμα αν ένα φορτίο καταναλώνει ενεργό ισχύ 1KW και τροφοδοτείται από 2 πηγές ονομαστικής ενεργού ισχύος 1KW, θέλουμε το φορτίο να ισομοιράζεται, δηλαδή κάθε πηγή να δίνει στο φορτίο 500W. Με τον τρόπο αυτό, δεν επιβαρύνεται παραπάνω κάποια πηγή του δικτύου σε σχέση με κάποια άλλη. Ωστόσο, στα LVDC MGs, ο διαμοιρασμός του φορτίου είναι χειρότερος απ'ό,τι στα LVAC MGs. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί η μία πηγή να τροφοδοτεί με 700W και η άλλη με 300W. Όταν η τάση εξόδου των πηγών συνεχούς τάσης είναι ίδια, τότε μπορούμε να ταυτίσουμε το φορτίο με το ρεύμα εξόδου των πηγών.

3) Η ύπαρξη κυκλοφορούντων ρευμάτων.

Στα DC μικροδίκτυα χαμηλής τάσης (LVDC MGs) παρατηρείται το εξής φαινόμενο, μέρος των ρευμάτων, που παράγονται με σκοπό την τροφοδότηση του φορτίου απ'τις DC πηγές, εν τέλει κυκλοφορούν μεταξύ των πηγών και δεν καταλήγουν στο φορτίο. Αυτό το μέρος των ρευμάτων ονομάζεται κυκλοφορούντα ρεύματα. Τα κυκλοφορούντα ρεύματα, κυκλοφορούν σε βρόχους που σχηματίζονται μεταξύ των πηγών, όταν δεν πληρούνται οι συνθήκες που οδηγούν στην καταστολή τους. Άμεσο αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου είναι η αύξηση των απωλειών ισχύος στο δίκτυο, καθώς προκειμένου οι πηγές να εξυπηρετήσουν το φορτίο θα πρέπει να παράγουν περισσότερη ενέργεια απ'αυτή που καταναλώνει το φορτίο, αφού μέρος αυτής δεν καταλήγει εκεί. Πολλές φορές το φαινόμενο αυτό είναι τόσο έντονο, που οι απώλειες είναι πολύ μεγάλες και οι πηγές καλούνται να παράγουν πολύ μεγάλες ποσότητες ισχύος οι οποίες καταναλώνονται στους βρόχους που δημιουργούνται μεταξύ των πηγών. Όπως θα δούμε στη συνέχεια, προκειμένου να μην υπάρχουν κυκλοφορούντα ρεύματα στο δίκτυο, θα πρέπει είτε πρόκειται για μονοπολική είτε για διπολική συνδεσμολογία, τα μέτρα των τάσεων των πηγών να είναι ίσα.

1.4 - Αντιμετώπιση των κυκλοφορούντων ρευμάτων μέσω ιεραρχικού ελέγχου

Το φαινόμενο των κυκλοφορούντων ρευμάτων είναι ένα πολύ σημαντικό μειονέκτημα των DC μικροδικτύων χαμηλής τάσης (LVDC MGs) και θα πρέπει να αντιμετωπιστεί προκειμένου τα LVDC MGs να χρησιμοποιηθούν σε περισσότερες εφαρμογές.

Για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου φαινομένου, μπορούμε να εφαρμόσουμε διάφορες μορφές ελέγχου, οι οποίες χωρίζονται σε επίπεδα/στάδια.

Έτσι λοιπόν έχουμε τα εξής στάδια ελέγχου:

A) Πρωτογενής ή πρωταρχικός έλεγχος

Ο έλεγχος αυτός αποτελεί μία απλή μορφή ελέγχου και επιτυγχάνεται μέσω της βελτίωσης του διαμοιρασμού του φορτίου μεταξύ των πηγών. Δεδομένου ότι τα μέτρα των τάσεων εξόδου των πηγών πρέπει να είναι ίσα, ανεξαρτήτως συνδεσμολογίας, ο διαμοιρασμός του φορτίου μεταξύ των πηγών, ανάγεται στον διαμοιρασμό των ρευμάτων τους. Επομένως, θα πρέπει τα ρεύματα των πηγών να είναι ίσα.

Υπάρχουν δύο είδη πρωτογενούς ελέγχου. Ο παθητικός (passive load sharing), όπου δεν υπάρχει κάποια μορφή επικοινωνίας μεταξύ των πηγών και ο ενεργός (active load sharing), όπου οι πηγές επικοινωνούν μεταξύ τους.

Ο έλεγχος Droop αποτελεί μορφή παθητικού πρωτογενούς ελέγχου. Στον έλεγχο Droop θα αναφερθούμε αναλυτικότερα στη συνέχεια.

Μορφές ενεργού πρωτογενούς ελέγχου είναι οι παρακάτω:

i. Centralized control

Με τη χρήση ενός ελεγκτή, μετράται το συνολικό ρεύμα όλων των πηγών συνεχούς τάσης και στη συνέχεια διαιρείται με το πλήθος τους. Το ρεύμα που προκύπτει αποτελεί το ρεύμα αναφοράς για κάθε πηγή.

ii. Master-Slave control

Μία πηγή ορίζεται ως πηγή αναφοράς (master) και το ρεύμα της ως ρεύμα αναφοράς όλων των πηγών. Οι υπόλοιπες πηγές (slaves) προσαρμόζουν το ρεύμα τους στο ρεύμα αναφοράς που προέκυψε από την πηγή αναφοράς (master).

iii. Average load sharing

Χρησιμοποιείται ένα καλώδιο που περιέχει την μέση τιμή των ρευμάτων που θα έπρεπε να έχουν οι πηγές. Η τιμή αυτή υπολογίζεται μέσω μιας αντίστασης που συνδέεται στον ελεγκτή κάθε πηγής. Το ρεύμα αυτό αποτελεί το ρεύμα αναφοράς.

iv. Circular Chain Control

Στη συγκεκριμένη μέθοδο, το ρεύμα αναφοράς κάθε πηγής τάσης, είναι το ρεύμα της προηγούμενης πηγής. Το ρεύμα αναφοράς της πρώτης πηγής τάσης είναι το ρεύμα της τελευταίας.

B) Δευτερογενής έλεγχος

Ο δευτερογενής έλεγχος επιτυγχάνεται διατηρώντας σταθερή την τάση εξόδου των πηγών ή των DC/DC converters με βάση την τάση που επιθυμούμε στον ζυγό στον οποίο συνδέεται το φορτίο.

Μορφές δευτερογενούς ελέγχου είναι οι παρακάτω:

I. Centralized Control

Ένας ελεγκτής κρατάει τις τάσεις των πηγών στο επίπεδο της τάσης που επιθυμούμε στον ζυγό στον οποίο συνδέεται το φορτίο.

II. Decentralized Control

Κάθε πηγή ελέγχει αυτόνομα την τάση της. Έχουμε δύο είδη decentralized control:

- 1) Με επικοινωνία μεταξύ των πηγών τάσεων, όπου οι ελεγκτές των πηγών τάσης ρυθμίζουν την τάση της πηγής που ελέγχουν, λαμβάνοντας υπόψη τις τάσεις των άλλων πηγών.
- 2) Χωρίς επικοινωνία μεταξύ των πηγών τάσεων, όπου οι ελεγκτές δεν επικοινωνούν με τους ελεγκτές των άλλων πηγών.

III. Hybrid methods

Χρησιμοποιούνται περισσότερες από μία απ' τις παραπάνω μεθόδους που προαναφέρθηκαν σε διαφορετικά επίπεδα. Για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί decentralized control χωρίς επικοινωνία σε περίπτωση που ο δευτερογενής έλεγχος με τη μορφή του centralized control αποτύχει να φέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Γ) Τριτογενής έλεγχος

Ο τριτογενής έλεγχος αποτελεί μία μορφή ελέγχου που καθορίζει και ρυθμίζει την ροή ενέργειας από το LVDC MG στο δίκτυο όταν το LVDC MGs παράγει περισσότερη ενέργεια από αυτή που καταναλώνεται απ' τα φορτία του και από το δίκτυο προς το LVDC MG όταν οι πηγές δεν μπορούν να καλύψουν την ζήτηση του φορτίου.

1.5 – Συνοπτικό περιεχόμενο θεωρητικού μέρους της εργασίας

Στην συγκεκριμένη εργασία, θα ασχοληθούμε με το πρόβλημα των κυκλοφορούντων ρευμάτων, σε διάφορες τοπολογίες, τόσο μονοπολικές όσο και διπολικές. Θα εξετάσουμε το πώς αυτά δημιουργούνται και μοντελοποιώντας κάθε τοπολογία μέσω εξισώσεων για τα ρεύματα κάθε πηγής, θα προσπαθήσουμε να βρούμε ποιο μέρος των ρευμάτων αυτών αντιστοιχεί στα κυκλοφορούντα ρεύματα. Στη συνέχεια, θα προχωρήσουμε στην εφαρμογή μίας μορφής ελέγχου για την καταστολή τους. Πιο συγκεκριμένα, θα ασχοληθούμε με τον παθητικό πρωτογενή έλεγχο, δηλαδή με τον έλεγχο Droop.

Κεφάλαιο 2

Μελέτη και θεωρητική ανάλυση των κυκλοφορούντων ρευμάτων

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η θεωρητική ανάλυση των τοπολογιών που εξετάζονται στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία και μέσω των εξισώσεων των ρευμάτων του εκάστοτε δικτύου, όπως αυτά προέκυψαν από την παραπάνω ανάλυση, επιτυγχάνεται η μοντελοποίηση της εκάστοτε τοπολογίας. Στην συνέχεια, μέσω των σχέσεων αυτών, απομονώνονται τα κυκλοφορούντα ρεύματα και προκύπτει η συνθήκη δημιουργίας κυκλοφορούντων ρευμάτων σε κάθε τοπολογία.

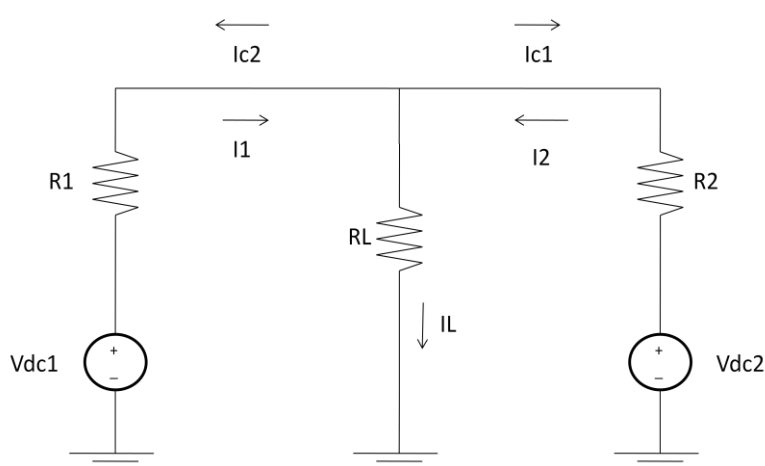
2.1 – Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, μελετάμε και αναλύουμε την ύπαρξη των κυκλοφορούντων ρευμάτων σε διάφορες τοπολογίες των χαμηλής τάσης και συνεχούς ρεύματος μικροδικτύων (LVDC Micro-grids) με τη βοήθεια των νόμων του Kirchhoff. Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι αρχικά, η επιβεβαίωση της ύπαρξης των κυκλοφορούντων ρευμάτων στην εκάστοτε τοπολογία και η εύρεση των συνθηκών που οδηγούν στη δημιουργία αυτών. Ακόμη, στόχος μας είναι η ποσοτικοποίηση τόσο των κυκλοφορούντων ρευμάτων, όσο και γενικά των ρευμάτων του κυκλώματος, μέσω της μοντελοποίησης της εκάστοτε τοπολογίας, με τη βοήθεια των νόμων του Kirchhoff.

2.2 – Μονοπολικές (Unipolar) συνδεσμολογίες

2.2.1 - Εισαγωγή

Στις μονοπολικές συνδεσμολογίες έχουμε την ύπαρξη θετικού και αρνητικού πόλου, ενώ απουσιάζει ο ουδέτερος. Έτσι, όπως γίνεται αντιληπτό, οι διάφορες πηγές τάσης που συνδέονται στον ζυγό του φορτίου, έχουν την ίδια πολικότητα. Επομένως, τα ρεύματα ρέουν από τις πηγές, που τροφοδοτούν το φορτίο, προς αυτό. Η ύπαρξη των κυκλοφορούντων ρευμάτων έγκειται στο γεγονός ότι μέρος αυτών των ρευμάτων που θα έπρεπε να τροφοδοτούν το φορτίο εξ' ολοκλήρου, κυκλοφορεί μεταξύ των πηγών όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



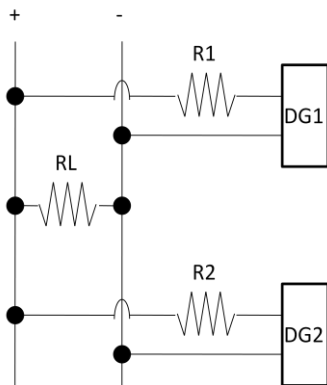
Σχήμα (2.1)- Ροή ρευμάτων γραμμών και κυκλοφορούντων ρευμάτων σε ισοδύναμο κύκλωμα σύνδεσης δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία.

Στο σχήμα (2.1) παρατηρούμε ότι τα ρεύματα I_1 και I_2 με τα οποία οι πηγές V_{dc1} και V_{dc2} τροφοδοτούν το φορτίο, «σπάνε» στο ρεύμα που εν τέλει καταλήγει στο φορτίο και στο ρεύμα που κυκλοφορεί μεταξύ ενός βρόχου που δημιουργείται μεταξύ των πηγών.

Στη συνέχεια, αναλύουμε κάποιες μονοπολικές συνδεσμολογίες, προκειμένου να καθορίσουμε τις συνθήκες ύπαρξης των κυκλοφορούντων ρευμάτων και τη ροή τους στο κύκλωμα. Ακόμη, απώτερος σκοπός είναι η μοντελοποίηση των ρευμάτων των διάφορων τοπολογιών με τρόπο τέτοιο ώστε, να είναι εμφανές ποιο μέρος του ρεύματος κάθε πηγής τελικά τροφοδοτεί το φορτίο και ποιο μέρος αποτελεί το κυκλοφορούν ρεύμα. Η παραπάνω διαδικασία θα έχει ως αποτέλεσμα, τόσο την ποσοτικοποίηση των κυκλοφορούντων ρευμάτων σε κάθε τοπολογία, όσο και την ανάπτυξη μεθόδων για την καταστολή τους.

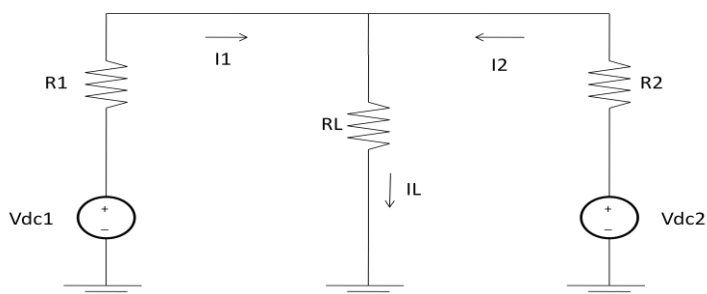
2.2.2 – Σύνδεση δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Two terminal DC unipolar connection)

Η συνδεσμολογία που εξετάζουμε εδώ είναι αυτή του παρακάτω σχήματος:



Σχήμα (2.2)- Τοπολογία σύνδεσης δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Two terminal DC unipolar connection).

Το ισοδύναμο κύκλωμα αυτής της συνδεσμολογίας είναι το εξής:



Σχήμα (2.3)-Ισοδύναμο κύκλωμα της τοπολογίας σύνδεσης δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Two terminal DC unipolar connection).

2.2.2.1 - Μαθηματική έκφραση των ρευμάτων I_1 και I_2 του δικτύου

Εφαρμόζοντας την αρχή της επαλληλίας στο κύκλωμα του σχήματος (2.3), προκύπτουν μέσω του Νόμου Τάσεων Kirchhoff (N.T.K.) οι εξής σχέσεις:

$$V_{dc1} = I_1 * R_1 + I_L * R_L \quad (1)$$

$$V_{dc2} = I_2 * R_2 + I_L * R_L \quad (2)$$

$$\text{Από Νόμο Ρευμάτων Kirchhoff (N.P.K.) έχω: } I_1 + I_2 = I_L \quad (3)$$

Από τις σχέσεις (1) και (3) προκύπτει:

$$V_{dc1} = I_1 * R_1 + I_1 * R_L + I_2 * R_L$$

Λύνοντας ως προς I_2 προκύπτει:

$$I_2 * R_L = V_{dc1} - I_1 * (R_1 + R_L) \Rightarrow I_2 = \frac{V_{dc1} - I_1 * (R_1 + R_L)}{R_L} \quad (4)$$

Από τις σχέσεις (2) και (3) προκύπτει:

$$V_{dc2} = I_2 * R_2 + I_1 * R_L + I_2 * R_L$$

Λύνοντας ως προς I_1 προκύπτει:

$$I_1 * R_L = V_{dc2} - I_2 * (R_2 + R_L) \Rightarrow I_1 = \frac{V_{dc2} - I_2 * (R_2 + R_L)}{R_L} \quad (5)$$

Αντικαθιστώντας στην σχέση (5) το I_2 με τη σχέση (4) έχω:

$$\begin{aligned} I_1 * R_L &= V_{dc2} - \frac{V_{dc1} - I_1 * (R_1 + R_L)}{R_L} * (R_2 + R_L) \Rightarrow \\ \Rightarrow I_1 * R_L^2 &= V_{dc2} * R_L - [V_{dc1} - I_1 * (R_1 + R_L)] * (R_2 + R_L) \Rightarrow \\ \Rightarrow I_1 * (R_1 * R_2 + R_1 * R_L + R_2 * R_L) &= V_{dc1} * (R_2 + R_L) - V_{dc2} * R_L \Rightarrow \\ \Rightarrow I_1 &= \frac{V_{dc1} * (R_2 + R_L) - V_{dc2} * R_L}{R_1 * R_2 + R_1 * R_L + R_2 * R_L} \quad (A) \end{aligned}$$

Αντίστοιχα, αντικαθιστώντας στην σχέση (4) το I_1 με τη σχέση (5) έχω:

$$\begin{aligned} I_2 * R_L &= V_{dc1} - \frac{V_{dc2} - I_2 * (R_2 + R_L)}{R_L} * (R_1 + R_L) \Rightarrow \\ \Rightarrow I_2 * R_L^2 &= V_{dc1} * R_L - [V_{dc2} - I_2 * (R_2 + R_L)] * (R_1 + R_L) \Rightarrow \\ \Rightarrow I_2 * (R_1 * R_2 + R_1 * R_L + R_2 * R_L) &= V_{dc2} * (R_1 + R_L) - V_{dc1} * R_L \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow I_2 = \frac{V_{dc2} * (R_1 + R_L) - V_{dc1} * R_L}{R_1 * R_2 + R_1 * R_L + R_2 * R_L} \quad (B)$$

Οι σχέσεις (A) και (B), δίνουν τα ρεύματα I_1 και I_2 συναρτήσει των αντιστάσεων των γραμμών, του φορτίου και της τάσης των πηγών.

2.2.2.2 - Μαθηματική έκφραση των κυκλοφορούντων ρευμάτων

Όπως φαίνεται στο σχήμα (2.1), η ύπαρξη κυκλοφορούντων ρευμάτων δημιουργεί έναν βρόχο μεταξύ των δύο πηγών, ο οποίος διαρρέεται από ρεύμα I_{c12} .

Από Ν.Τ.Κ. έχω για το ρεύμα I_{c12} :

$$\begin{aligned} V_{dc1} - I_{c12} * R_1 - I_{c12} * R_2 - V_{dc2} &= 0 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow I_{c12} &= \frac{V_{dc1} - V_{dc2}}{R_1 + R_2} \end{aligned}$$

Αυτό είναι το κυκλοφορούν ρεύμα του κυκλώματος που ρέει από την πηγή V_{dc1} , προς την πηγή V_{dc2} . Αντίστοιχα έχω το κυκλοφορούν ρεύμα I_{c21} που ρέει από την πηγή V_{dc2} προς την πηγή V_{dc1} :

$$\begin{aligned} V_{dc2} - I_{c21} * R_2 - I_{c21} * R_1 - V_{dc1} &= 0 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow I_{c21} &= \frac{V_{dc2} - V_{dc1}}{R_1 + R_2} \end{aligned}$$

Όπως ήταν αναμενόμενο, παρατηρούμε ότι: $I_{c12} = -I_{c21}$.

Βλέπουμε ότι η μοναδική συνθήκη ικανή να δημιουργήσει κυκλοφορούντα ρεύματα στην τοπολογία, είναι η διαφορά μεταξύ των τάσεων τροφοδοσίας του φορτίου.

2.2.2.3 - Η παρουσία των κυκλοφορούντων ρευμάτων στα ρεύματα I_1 και I_2

Επιστρέφοντας στις σχέσεις (A) και (B), καθώς ισχύει $R_L \gg R_1$ και $R_L \gg R_2$ το γινόμενο $R_1 * R_2$ μπορεί να παραληφθεί. Επομένως οι σχέσεις παίρνουν τη μορφή:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{V_{dc1} * (R_2 + R_L) - V_{dc2} * R_L}{R_L * (R_1 + R_2)} \\ I_2 &= \frac{V_{dc2} * (R_1 + R_L) - V_{dc1} * R_L}{R_L * (R_1 + R_2)} \end{aligned}$$

Δουλεύοντας τις σχέσεις προκύπτει:

$$I_1 = \frac{V_{dc1} * R_2}{R_L * (R_1 + R_2)} + \frac{V_{dc1} - V_{dc2}}{R_1 + R_2} = I_{1L} + I_{c12}$$

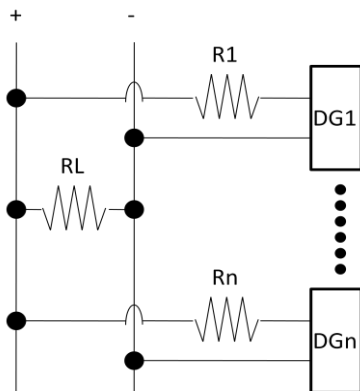
$$I_2 = \frac{V_{dc2} * R_1}{R_L * (R_1 + R_2)} + \frac{V_{dc2} - V_{dc1}}{R_1 + R_2} = I_{2L} + I_{c21}$$

Παρατηρούμε ότι ο β' όρος του αθροίσματος κάθε ρεύματος, αντιστοιχεί στο κυκλοφορούν ρεύμα που καταναλώνεται στον βρόχο που δημιουργείται μεταξύ των πηγών. Ο α' όρος αντιστοιχεί στο ρεύμα που καταναλώνεται στο φορτίο.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση αυτό που παρατηρούμε είναι ότι για να αποφύγουμε την δημιουργία κυκλοφορούντων ρευμάτων, θα πρέπει οι τάσεις των πηγών να είναι ίσες $V_{dc1} = V_{dc2}$. Ακόμη, βλέπουμε ότι το κυκλοφορούν ρεύμα ρέει από την πηγή με την υψηλότερη τάση εξόδου προς αυτή με την χαμηλότερη τάση εξόδου.

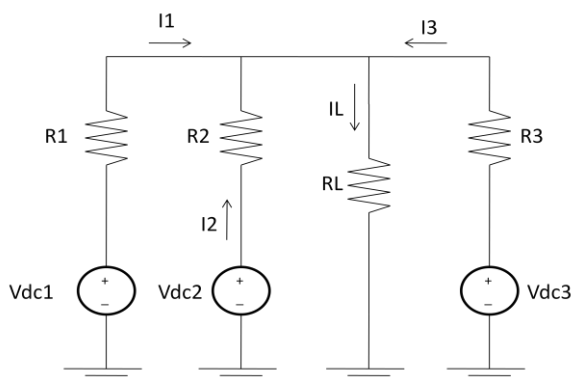
2.2.2.4 - Γενίκευση για περισσότερες από δύο πηγές: Σύνδεση n πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (n terminal DC unipolar connection)

Η συνδεσμολογία που εξετάζουμε εδώ, είναι μια γενίκευση της τοπολογίας «two terminal DC unipolar connection» για n πηγές και φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα (2.4)- Τοπολογία σύνδεσης n πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Two terminal DC unipolar connection).

Έστω ότι στην προηγούμενη τοπολογία των δύο πηγών προσθέτουμε μια τρίτη πηγή V_{dc3} . Το ισοδύναμο κύκλωμα που προκύπτει είναι το παρακάτω:



Σχήμα (2.5)-Ισοδύναμο κύκλωμα της τοπολογίας σύνδεσης τριών πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Three terminal DC unipolar connection).

Εφαρμόζοντας την αρχή της επαλληλίας στο κύκλωμα του σχήματος (2.5), προκύπτουν μέσω του Νόμου Τάσεων Kirchhoff (N.T.K.) οι εξής σχέσεις:

$$V_{dc1} = I_1 * R_1 + I_L * R_L \quad (1)$$

$$V_{dc1} = I_1 * R_1 - I_3 * R_3 + V_{dc3} \quad (2)$$

$$V_{dc2} = I_2 * R_2 - I_3 * R_3 + V_{dc3} \quad (3)$$

$$\text{Από Νόμο Ρευμάτων Kirchhoff (N.P.K.) έχω: } I_1 + I_2 + I_3 = I_L \quad (4)$$

Επιλύοντας την σχέση (2) ως προς $I_1 * R_1$ και αντικαθιστώντας στην σχέση (1) προκύπτει η σχέση:

$$V_{dc1} = V_{dc1} - V_{dc3} + I_3 * R_3 + I_L * R_L \quad (5)$$

Από την σχέση (5) αντικαθιστώ το I_L στη σχέση (5). Η σχέση πλέον έχει τη μορφή:

$$V_{dc1} = V_{dc1} - V_{dc3} + I_3 * R_3 + (I_1 + I_2 + I_3) * R_L \quad (6)$$

Επιλύοντας τις σχέσεις (2) και (3) ως προς I_1 και I_2 αντίστοιχα, αντικαθιστώ στη σχέση (6) και έχω τη σχέση:

$$V_{dc1} = V_{dc1} - V_{dc3} + I_3 * R_3 + \left(\frac{V_{dc1} - V_{dc3} + I_3 * R_3}{R_1} + \frac{V_{dc2} - V_{dc3} + I_3 * R_3}{R_2} + I_3 \right) * R_L$$

Επιλύοντας ως προς I_3 προκύπτει:

$$I_3 = \frac{V_{dc3} * R_1 * R_2}{R_L * (R_1 * R_2 + R_2 * R_3 + R_1 * R_3)} + \frac{(V_{dc3} - V_{dc1}) * R_2}{R_1 * R_2 + R_2 * R_3 + R_1 * R_3} + \frac{(V_{dc3} - V_{dc2}) * R_1}{R_1 * R_2 + R_2 * R_3 + R_1 * R_3}$$

Παρατηρούμε ότι έχουμε μία σχέση για το ρεύμα I_3 συναρτήσει μόνο των αντιστάσεων και των τάσεων των πηγών. Αντικαθιστώντας το I_3 στις σχέσεις (2) και (3) προκύπτουν αντίστοιχα σχέσεις για τα ρεύματα I_1 και I_2 συναρτήσει μόνο των αντιστάσεων και των τάσεων των πηγών. Πιο συγκεκριμένα έχουμε:

$$I_1 = \frac{V_{dc1} * R_3 * R_2}{R_L * (R_1 * R_2 + R_2 * R_3 + R_1 * R_3)} + \frac{(V_{dc1} - V_{dc3}) * R_2}{R_1 * R_2 + R_2 * R_3 + R_1 * R_3} + \frac{(V_{dc1} - V_{dc2}) * R_3}{R_1 * R_2 + R_2 * R_3 + R_1 * R_3}$$

$$I_2 = \frac{V_{dc2} * R_1 * R_3}{R_L * (R_1 * R_2 + R_2 * R_3 + R_1 * R_3)} + \frac{(V_{dc2} - V_{dc1}) * R_3}{R_1 * R_2 + R_2 * R_3 + R_1 * R_3} + \frac{(V_{dc2} - V_{dc3}) * R_1}{R_1 * R_2 + R_2 * R_3 + R_1 * R_3}$$

Αυτές είναι οι σχέσεις που προέκυψαν για τα ρεύματα του κυκλώματος. Παρατηρούμε ότι όπως και πριν, τα ρεύματα αποτελούνται από έναν όρο που δίνει το ρεύμα, με το οποίο κάθε πηγή τροφοδοτεί το φορτίο:

$$I_{1L} = \frac{V_{dc1} * R_3 * R_2}{R_L * (R_1 * R_2 + R_2 * R_3 + R_1 * R_3)}$$

$$I_{2L} = \frac{V_{dc2} * R_1 * R_3}{R_L * (R_1 * R_2 + R_2 * R_3 + R_1 * R_3)}$$

$$I_{3L} = \frac{V_{dc3} * R_1 * R_2}{R_L * (R_1 * R_2 + R_2 * R_3 + R_1 * R_3)}$$

και από μία σειρά όρων που αντιστοιχούν στα κυκλοφορούντα ρεύματα μεταξύ των πηγών:

$$I_{c1} = I_{c12} + I_{c13} = \frac{(V_{dc1} - V_{dc2}) * R_3}{R_1 * R_2 + R_2 * R_3 + R_1 * R_3} + \frac{(V_{dc1} - V_{dc3}) * R_2}{R_1 * R_2 + R_2 * R_3 + R_1 * R_3}$$

$$I_{c2} = I_{c21} + I_{c23} = \frac{(V_{dc2} - V_{dc1}) * R_3}{R_1 * R_2 + R_2 * R_3 + R_1 * R_3} + \frac{(V_{dc2} - V_{dc3}) * R_1}{R_1 * R_2 + R_2 * R_3 + R_1 * R_3}$$

$$I_{c3} = I_{c31} + I_{c32} = \frac{(V_{dc3} - V_{dc1}) * R_2}{R_1 * R_2 + R_2 * R_3 + R_1 * R_3} + \frac{(V_{dc3} - V_{dc2}) * R_1}{R_1 * R_2 + R_2 * R_3 + R_1 * R_3}$$

Όπως βλέπουμε, όταν το φορτίο τροφοδοτείται από περισσότερες από δύο πηγές, τότε κυκλοφορούντα ρεύματα αναπτύσσονται μεταξύ όλων των πηγών. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, αναπτύσσονται κυκλοφορούντα ρεύματα μεταξύ των πηγών $V_{dc1} - V_{dc2}$, $V_{dc1} - V_{dc3}$ και $V_{dc2} - V_{dc3}$. Έτσι έχουμε τα κυκλοφορούντα ρεύματα I_{c12} , I_{c21} , I_{c13} , I_{c31} , I_{c23} και I_{c32} .

Γίνεται αντιληπτό από τις σχέσεις, ότι μεταξύ των κυκλοφορούντων ρευμάτων ισχύει:

$$I_{c12} = -I_{c21}$$

$$I_{c13} = -I_{c31}$$

$$I_{c23} = -I_{c32}$$

Το άθροισμα των κυκλοφορούντων ρευμάτων της μίας πηγής προς τις άλλες δύο, μας δίνει το συνολικό κυκλοφορούν ρεύμα που παράγει η πηγή στο κύκλωμα.

Γενικεύοντας για n πηγές, με βάση τις σχέσεις που έχουμε για τις δύο και τις τρεις πηγές έχουμε τις γενικές σχέσεις των ρευμάτων για n πηγές.

Έστω τυχαία πηγή τάσης V_{dcj} . Το ρεύμα I_j της πηγής δίνεται απ'τον παρακάτω τύπο:

$$I_j = \frac{V_{dcj} * (R_1 * R_2 * \dots * R_n) * \frac{1}{R_j}}{R_L * (R_1 * R_2 * \dots * R_n) * \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}\right)} + \sum_{m=1 \text{ και } m \neq j}^n \frac{(V_{dcj} - V_{dc m}) * (R_1 * R_2 * \dots * R_n) * \frac{1}{R_j + R_m}}{(R_1 * R_2 * \dots * R_n) * \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}\right)}$$

Ο α' όρος του αθροίσματος:

$$I_{jL} = \frac{V_{dcj} * (R_1 * R_2 * \dots * R_n) * \frac{1}{R_j}}{R_L * (R_1 * R_2 * \dots * R_n) * \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}\right)}$$

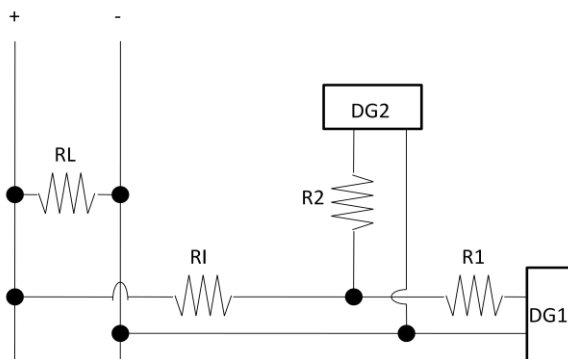
αντιπροσωπεύει το ρεύμα με το οποίο η πηγή V_{dcj} τροφοδοτεί το φορτίο, ενώ ο β' όρος του αθροίσματος:

$$I_{jc} = \sum_{m=1 \text{ και } m \neq j}^n \frac{(V_{dcj} - V_{dc m}) * (R_1 * R_2 * \dots * R_n) * \frac{1}{R_j + R_m}}{(R_1 * R_2 * \dots * R_n) * \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}\right)}$$

Αντιπροσωπεύει τα κυκλοφορούντα ρεύματα που δημιουργούνται απ'την πηγή V_{dcj} προς όλες τις υπόλοιπες πηγές.

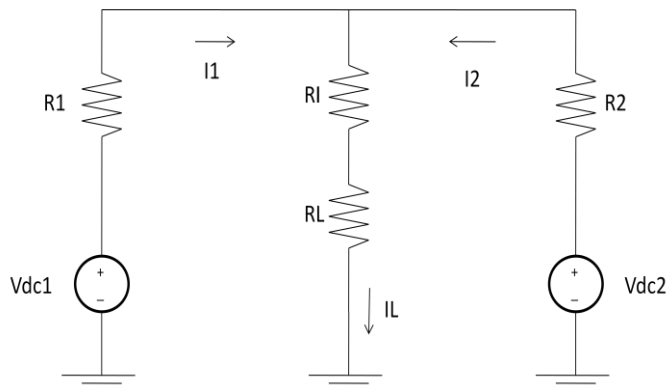
2.2.3.1 – Κοινή σύνδεση δύο παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources)

Η συνδεσμολογία που εξετάζουμε εδώ είναι αυτή του παρακάτω σχήματος:



Σχήμα (2.6)- Τοπολογία κοινής σύνδεσης δύο παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources).

Το ισοδύναμο κύκλωμα αυτής της συνδεσμολογίας είναι το εξής:



Σχήμα (2.7)-Ισοδύναμο κύκλωμα τοπολογίας κοινής σύνδεσης δύο παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources).

Παρατηρώντας το ισοδύναμο κύκλωμα της συγκεκριμένης τοπολογίας στο σχήμα (2.7), γίνεται αντιληπτό ότι η μόνη διαφορά της τοπολογίας αυτής, με την προηγούμενη τοπολογία της σύνδεσης δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Two terminal DC unipolar connection), είναι μία επιπλέον εν σειρά αντίσταση στην αντίσταση που αντιστοιχεί στο φορτίο R_L . Επομένως οι σχέσεις είναι παρόμοιες με αυτές της προηγούμενης τοπολογίας, με τη διαφορά ότι στη θέση του R_L , θα έχουμε $R'_{Lo\lambda} = R_L + R_1$.

Άρα τα ρεύματα I_1 , I_2 δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$I_1 = \frac{V_{dc1} * R_2}{R'_{Lo\lambda} * (R_1 + R_2)} + \frac{V_{dc1} - V_{dc2}}{R_1 + R_2}$$

$$I_2 = \frac{V_{dc2} * R_1}{R'_{Lo\lambda} * (R_1 + R_2)} + \frac{V_{dc2} - V_{dc1}}{R_1 + R_2}$$

Όπου,

$$I_{c12} = \frac{V_{dc1} - V_{dc2}}{R_1 + R_2}$$

$$I_{c21} = \frac{V_{dc2} - V_{dc1}}{R_1 + R_2}$$

Ισχύει και εδώ ότι: $I_{c12} = -I_{c21}$.

2.2.3.2 – Γενίκευση για περισσότερες από δύο πηγές: Κοινή σύνδεση η παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with n parallel voltage sources)

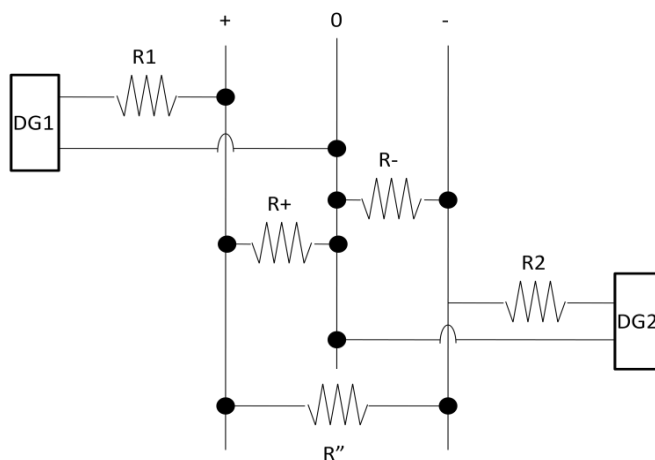
Γενικεύοντας για n πηγές, έστω τυχαία πηγή τάσης V_{dcj} . Το ρεύμα I_j της πηγής δίνεται απ'τον παρακάτω τύπο:

$$I_j = \frac{V_{dcj} * (R_1 * R_2 * \dots * R_n) * \frac{1}{R_j}}{R'_{Lo\lambda} * (R_1 * R_2 * \dots * R_n) * \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}\right)} + \sum_{m=1 \text{ και } m \neq j}^n \frac{(V_{dcj} - V_{dcm}) * (R_1 * R_2 * \dots * R_n) * \frac{1}{R_j + R_m}}{(R_1 * R_2 * \dots * R_n) * \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}\right)}$$

2.3 – Διπολικές (Bipolar) συνδεσμολογίες

2.3.1 - Εισαγωγή

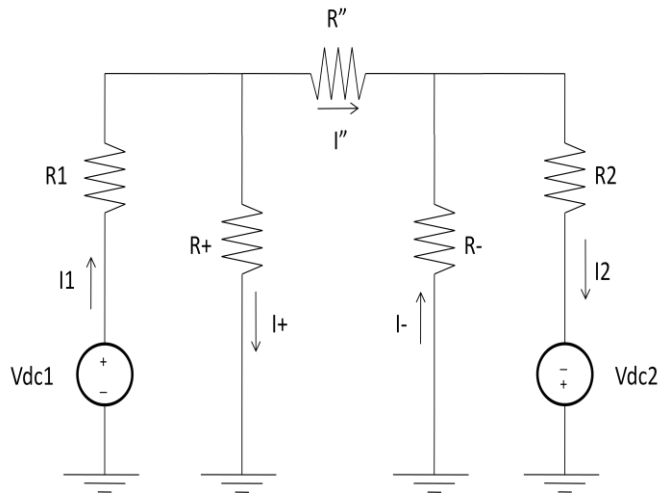
Η διαφορά των διπολικών συνδεσμολογιών με τις μονοπολικές, είναι η ύπαρξη ουδετέρου αγωγού. Αυτή η διαφοροποίηση, έχει ως αποτέλεσμα, την ύπαρξη πηγών αντίθετης πολικότητας, οι οποίες τροφοδοτούν φορτία τα οποία μπορεί να έχουν συνδεθεί μεταξύ δύο οποιονδήποτε αγωγών, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα (2.8)- Διπολική συνδεσμολογία.

Η διαφοροποίηση αυτή προκαλεί και μια διαφοροποίηση στον τρόπο με τον οποίο τα κυκλοφορούντα ρεύματα αναπτύσσονται και ρέουν στο κύκλωμα. Είναι βέβαιο, ότι οι συνθήκες ύπαρξης των κυκλοφορούντων είναι διαφορετικές από αυτές που είχαμε στις μονοπολικές συνδεσμολογίες. Εξ' ορίσμού έχουμε $V_{dc1} \neq V_{dc2}$, οπότε περιμένουμε μία διαφορετική σχέση μεταξύ των τάσεων των πηγών.

Παρακάτω παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα της τοπολογίας του σχήματος (2.8):



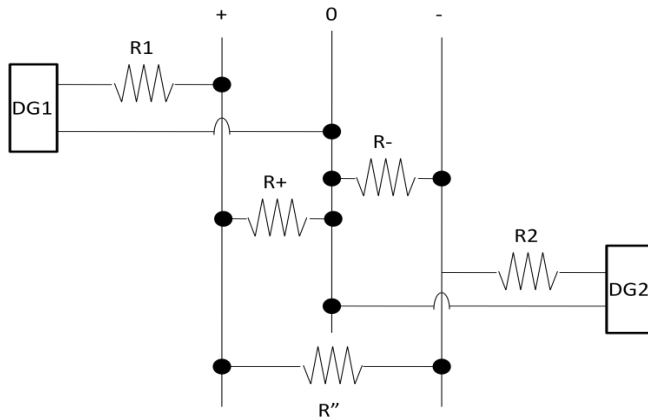
Σχήμα (2.9)- Ισοδύναμο κύκλωμα διπολική συνδεσμολογίας του σχήματος (n.8).

Βλέποντας την φορά των ρευμάτων που προκαλεί η αντίθετη πολικότητα των πηγών στο σχήμα (2.9), αντιλαμβανόμαστε ότι η ροή των κυκλοφορούντων ρευμάτων στο κύκλωμα είναι διαφορετική απ' ό,τι στις μονοπολικές συνδεσμολογίες. Στη σύνδεση δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία με $V_{dc1} > V_{dc2}$ για παράδειγμα, είδαμε ότι το κυκλοφορούν �εύμα I_{c12} είναι ουσιαστικά ένα ρεύμα που ρέει από την πηγή V_{dc1} προς την πηγή V_{dc2} με φορά αντίθετη του ρεύματος I_2 . Γίνεται αντιληπτό, ότι η έννοια του κυκλοφορούντος ρεύματος έγκειται στην ύπαρξη και ροή ενός ρεύματος, το οποίο ξεκινάει από τη μία πηγή τάσης και έχει φορά που αντιτίθεται στη φορά του ρεύματος της άλλης πηγής.

Στη συνέχεια, αναλύουμε κάποιες διπολικές συνδεσμολογίες, προκειμένου να καθορίσουμε τις συνθήκες ύπαρξης των κυκλοφορούντων ρευμάτων και τη ροή τους στο κύκλωμα. Ακόμη, απώτερος σκοπός είναι η μοντελοποίηση των ρευμάτων των διάφορων τοπολογιών με τρόπο τέτοιο ώστε, να είναι εμφανές ποιο μέρος του ρεύματος κάθε πηγής τελικά τροφοδοτεί το φορτίο και ποιο μέρος αποτελεί το κυκλοφορούν ρεύμα. Η παραπάνω διαδικασία θα έχει ως αποτέλεσμα, τόσο την ποσοτικοποίηση των κυκλοφορούντων ρευμάτων σε κάθε τοπολογία, όσο και την ανάπτυξη μεθόδων για την καταστολή τους.

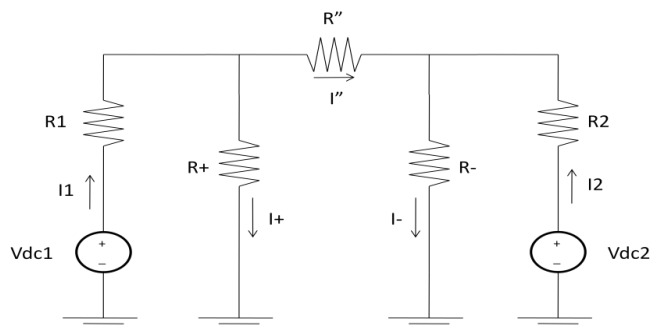
2.3.2- Σύνδεση δύο πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου (DC bipolar connection)

Η συνδεσμολογία που εξετάζουμε εδώ είναι αυτή του παρακάτω σχήματος:



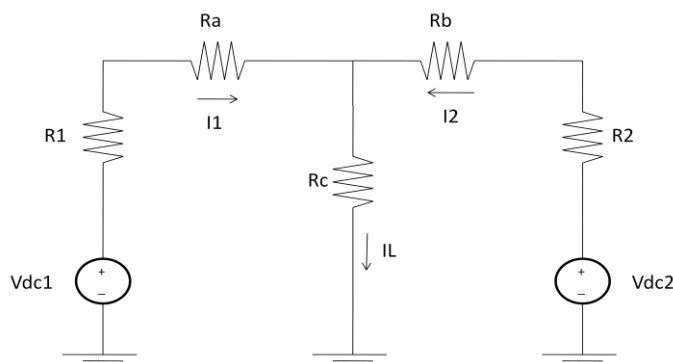
Σχήμα (2.10)- Τοπολογία σύνδεσης δύο πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου (DC bipolar connection).

Το ισοδύναμο κύκλωμα αυτής της συνδεσμολογίας είναι το εξής:



Σχήμα (2.11)-Ισοδύναμο κύκλωμα τοπολογίας σύνδεσης δύο πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου (DC bipolar connection).

Αρχικά, μετατρέπουμε το τρίγωνο των αντιστάσεων R'' , R^+ , R^- σε αστέρα. Το νέο ισοδύναμο κύκλωμα είναι το παρακάτω:



Σχήμα (2.12)-Ισοδύναμο κύκλωμα τοπολογίας σύνδεσης δύο πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου (DC bipolar connection) μετά τον μετασχηματισμό του τριγώνου σε αστέρα.

Οι σχέσεις που συνδέουν τις νέες αντιστάσεις R_a , R_b , R_c , με τις αντιστάσεις R'' , R^+ , R^- είναι οι εξής:

$$R_a = \frac{R'' * R^+}{R'' + R^+ + R^-}$$

$$R_b = \frac{R'' * R^-}{R'' + R^+ + R^-}$$

$$R_c = \frac{R^+ * R^-}{R'' + R^+ + R^-}$$

Εφαρμόζοντας την αρχή της επαλληλίας στο κύκλωμα του σχήματος (2.12), προκύπτουν μέσω του Νόμου Τάσεων Kirchhoff (Ν.Τ.Κ.) οι εξής σχέσεις:

$$V_{dc1} = I_1 * R_1 + I_1 * R_a + I_L * R_c \quad (1)$$

$$V_{dc2} = I_2 * R_2 + I_2 * R_b + I_L * R_c \quad (2)$$

$$\text{Από Νόμο Ρευμάτων Kirchhoff (Ν.Ρ.Κ.) έχω: } I_1 + I_2 = I_L \quad (3)$$

Από τις σχέσεις (1) και (3) προκύπτει:

$$V_{dc1} = I_1 * R_1 + I_1 * R_a + I_1 * R_c + I_2 * R_c$$

Λύνοντας ως προς I_2 προκύπτει:

$$I_2 * R_c = V_{dc1} - I_1 * (R_1 + R_a + R_c) \Rightarrow I_2 = \frac{V_{dc1} - I_1 * (R_1 + R_a + R_c)}{R_c} \quad (4)$$

Από τις σχέσεις (2) και (3) προκύπτει:

$$V_{dc2} = I_2 * R_2 + I_2 * R_b + I_1 * R_c + I_2 * R_c$$

Λύνοντας ως προς I_1 προκύπτει:

$$I_1 * R_c = V_{dc2} - I_2 * (R_2 + R_b + R_c) \Rightarrow I_1 = \frac{V_{dc2} - I_2 * (R_2 + R_b + R_c)}{R_c} \quad (5)$$

Αντικαθιστώντας στην σχέση (5) το I_2 με τη σχέση (4) έχω:

$$I_1 * R_c = V_{dc2} - \frac{V_{dc1} - I_1 * (R_1 + R_a + R_c)}{R_c} * (R_2 + R_b + R_c) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I_1 * R_c^2 = V_{dc2} * R_c - [V_{dc1} - I_1 * (R_1 + R_a + R_c)] * (R_2 + R_b + R_c) \Rightarrow$$

$$\begin{aligned}
\Rightarrow I_1 * R_c^2 &= V_{dc2} * R_c - V_{dc1} * R_2 - V_{dc1} * R_b - V_{dc1} * R_c + I_1 * (R_1 + R_a + R_c) * \\
&\quad * (R_2 + R_b + R_c) \Leftrightarrow \\
\Rightarrow -I_1 * R_c^2 + I_1 * (R_1 + R_a + R_c) * (R_2 + R_b + R_c) &= \\
&= -V_{dc2} * R_c + V_{dc1} * R_2 + V_{dc1} * R_b + V_{dc1} * R_c \Leftrightarrow \\
\Rightarrow I_1 &= \frac{V_{dc1} * (R_2 + R_b) + R_c * (V_{dc1} - V_{dc2})}{R_1 * (R_b + R_c) + R_2 * (R_a + R_c) + R_a * R_b + R_a * R_c + R_b * R_c} \quad (A)
\end{aligned}$$

Αντίστοιχα, αντικαθιστώντας στην σχέση (4) το I_1 με τη σχέση (5) έχω:

$$\begin{aligned}
I_2 * R_c &= V_{dc1} - \frac{V_{dc2} - I_2 * (R_2 + R_b + R_c)}{R_c} * (R_1 + R_a + R_c) \Leftrightarrow \\
\Rightarrow I_2 * R_c^2 &= V_{dc1} * R_c - [V_{dc2} - I_2 * (R_2 + R_b + R_c)] * (R_1 + R_a + R_c) \Leftrightarrow \\
\Rightarrow I_2 * R_c^2 &= V_{dc1} * R_c - V_{dc2} * R_1 - V_{dc2} * R_a - V_{dc2} * R_c + I_2 * (R_2 + R_b + R_c) * \\
&\quad * (R_1 + R_a + R_c) \Leftrightarrow \\
\Rightarrow -I_2 * R_c^2 + I_2 * (R_2 + R_b + R_c) * (R_1 + R_a + R_c) &= \\
&= -V_{dc1} * R_c + V_{dc2} * R_1 + V_{dc2} * R_a + V_{dc2} * R_c \Leftrightarrow \\
\Rightarrow I_2 &= \frac{V_{dc2} * (R_1 + R_a) + R_c * (V_{dc2} - V_{dc1})}{R_1 * (R_b + R_c) + R_2 * (R_a + R_c) + R_a * R_b + R_a * R_c + R_b * R_c} \quad (B)
\end{aligned}$$

Οι σχέσεις (A) και (B), δίνουν τα ρεύματα I_1 και I_2 συναρτήσει των αντιστάσεων των γραμμών, του φορτίου και της τάσης των πηγών.

Επειδή οι αντιστάσεις φορτίου είναι πολύ μεγαλύτερες απ' τις αντιστάσεις γραμμών, ισχύει ότι $R_a, R_b, R_c \gg R_1, R_2$.

Άρα απλοποιώντας τους παραπάνω τύπους προκύπτουν οι εξής τύποι για τα ρεύματα I_1 και I_2 :

$$\begin{aligned}
I_1 &= \frac{V_{dc1} * R_b + R_c * (V_{dc1} - V_{dc2})}{R_a * R_b + R_a * R_c + R_b * R_c} \\
I_2 &= \frac{V_{dc2} * R_a + R_c * (V_{dc2} - V_{dc1})}{R_a * R_b + R_a * R_c + R_b * R_c}
\end{aligned}$$

Παρατηρώντας τους τύπους για τα ρεύματα, βλέπουμε ότι παρουσιάζεται μια διαφορά μεταξύ των τάσεων η οποία όπως προαναφέραμε δεν είναι αυτή που προκαλεί τα κυκλοφορούντα ρεύματα καθώς εξ'ορισμού έχουμε $V_{dc1} \neq V_{dc2}$. Γνωρίζοντας ότι αυτό που προκαλεί την δημιουργία κυκλοφορούντων ρευμάτων είναι η «ανισσοροπία» των τάσεων των πηγών και δεδομένου ότι οι πηγές είναι αντίθετης πολικότητας, η συνθήκη η οποία διασφαλίζει την μη ύπαρξη κυκλοφορούντων ρευμάτων είναι η εξής:

$$|V_{dc1}| = |V_{dc2}|$$

Θεωρώντας την V_{dc1} θετικής πολικότητας και την V_{dc2} αρνητικής έχω:

$$V_{dc1} = -V_{dc2} \Leftrightarrow V_{dc1} + V_{dc2} = 0$$

Πρέπει επομένως να φέρω τους τύπους των ρευμάτων σε μορφή που να συμπεριλαμβάνουν το άθροισμα των τάσεων V_{dc1} και V_{dc2} .

Με την κατάλληλη επεξεργασία, οι τύποι των ρευμάτων I_1 και I_2 παίρνουν την παρακάτω μορφή:

$$I_1 = \frac{V_{dc1} * (R_b + 2 * R_c) - R_c * (V_{dc1} + V_{dc2})}{R_a * R_b + R_a * R_c + R_b * R_c}$$

$$I_2 = \frac{V_{dc2} * (R_a + 2 * R_c) - R_c * (V_{dc2} + V_{dc1})}{R_a * R_b + R_a * R_c + R_b * R_c}$$

Σε αυτήν την μορφή τα ρεύματα I_1 και I_2 αποτελούνται από το άθροισμα δύο όρων. Ο α' όρος αντιστοιχεί στο ρεύμα που τροφοδοτεί κάθε πηγή τα φορτία, ενώ ο β' αντιστοιχεί στο κυκλοφορούν ρεύμα που αναπτύσσεται μεταξύ των δύο πηγών. Πιο συγκεκριμένα έχουμε:

$$I_1 = I_{1L} + I_{c12} = \frac{V_{dc1} * (R_b + 2 * R_c)}{R_a * R_b + R_a * R_c + R_b * R_c} - \frac{R_c * (V_{dc1} + V_{dc2})}{R_a * R_b + R_a * R_c + R_b * R_c}$$

$$I_2 = I_{2L} + I_{c21} = \frac{V_{dc2} * (R_a + 2 * R_c)}{R_a * R_b + R_a * R_c + R_b * R_c} - \frac{R_c * (V_{dc2} + V_{dc1})}{R_a * R_b + R_a * R_c + R_b * R_c}$$

Αντικαθιστώντας τις αντιστάσεις της συνδεδεμολογίας τριγώνου, R_b, R_c , με τις αντιστάσεις R'', R^+, R^- οι σχέσεις που δίνουν τα ρεύματα της συγκεκριμένης τοπολογίας είναι οι παρακάτω:

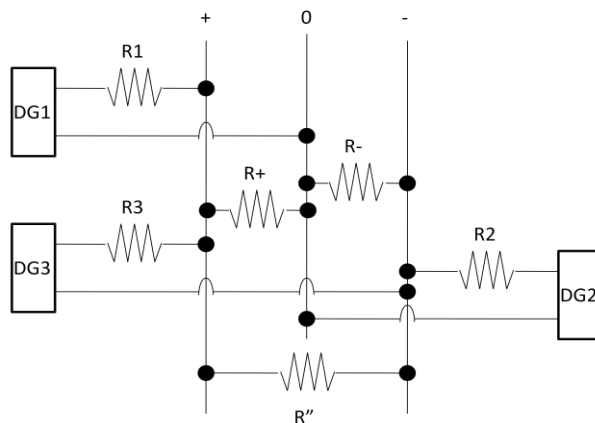
$$I_1 = \frac{V_{dc1}}{R^+} + \frac{2 * V_{dc1}}{R''} - \frac{(V_{dc1} + V_{dc2})}{R''}$$

$$I_2 = \frac{V_{dc2}}{R^-} + \frac{2 * V_{dc2}}{R''} - \frac{(V_{dc2} + V_{dc1})}{R''}$$

Ο όρος που περιέχει το άθροισμα των τάσεων των πηγών V_{dc1} και V_{dc2} δίνει το κυκλοφορούν ρεύμα μεταξύ των δύο πηγών, ενώ οι άλλοι δύο όροι δίνουν το ρεύμα με το οποίο η κάθε πηγή τροφοδοτεί το φορτίο.

2.3.3- Σύνδεση τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (DC bipolar connection with 1 more voltage source connected between + - poles)

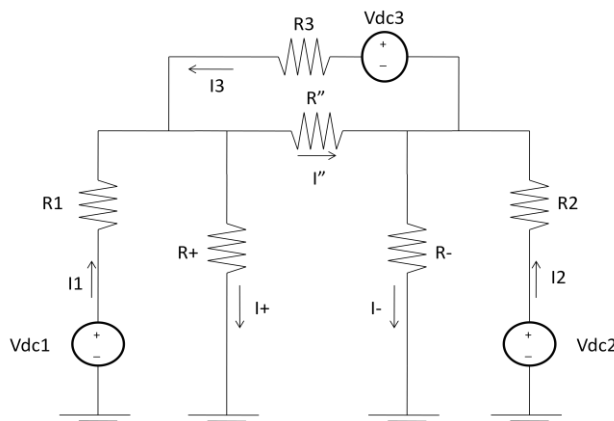
Η συνδεσμολογία που εξετάζουμε εδώ είναι αυτή του παρακάτω σχήματος:



Σχήμα (2.13)- Τοπολογία σύνδεσης τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (DC bipolar connection with 1 more voltage source connected between + - poles).

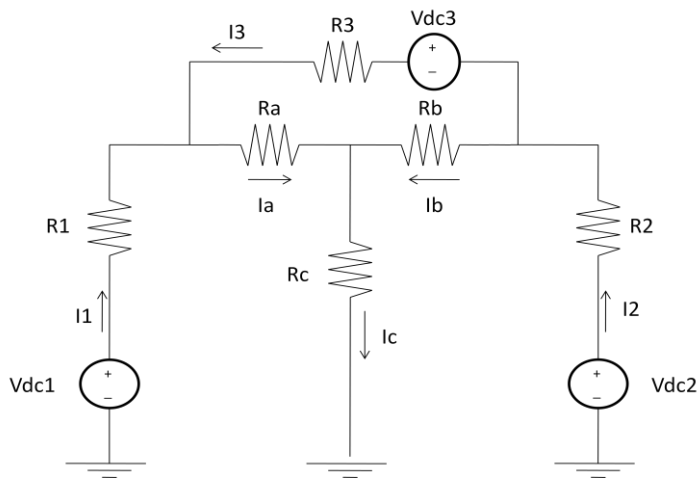
Η διαφορά με την προηγούμενη διπολική συνδεσμολογία είναι η ύπαρξη μίας ακόμη πηγής τάσης V_{dc3} , η οποία τροφοδοτεί φορτίο συνδεδεμένο μεταξύ θετικού και αρνητικού πόλου. Με βάση τη σύνδεση των πηγών, αντιλαμβανόμαστε ότι η V_{dc3} ουσιαστικά τροφοδοτεί το φορτίο R'' με τάση που ισούται με το άθροισμα των απόλυτων τιμών των V_{dc1} και V_{dc2} . Μέσω της συνδεσμολογίας αυτής επιτυγχάνεται η τροφοδότηση μεγαλύτερου φορτίου μέσω της πηγής τάσης V_{dc3} .

Το ισοδύναμο κύκλωμα αυτής της συνδεσμολογίας είναι το εξής:



Σχήμα (2.14)- Ισοδύναμο κύκλωμα τοπολογίας σύνδεσης τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (DC bipolar connection with 1 more voltage source connected between + - poles).

Αρχικά, μετατρέπουμε το τρίγωνο των αντιστάσεων R'' , R^+ , R^- σε αστέρα. Το νέο ισοδύναμο κύκλωμα είναι το παρακάτω:



Σχήμα (2.15)- Ισοδύναμο κύκλωμα τοπολογίας σύνδεσης τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (DC bipolar connection with 1 more voltage source connected between + - poles) μετά τον μετασχηματισμό του τριγώνου σε αστέρα.

Οι σχέσεις που συνδέουν τις νέες αντιστάσεις R_a , R_b , R_c , με τις αντιστάσεις R'' , R^+ , R^- είναι οι εξής:

$$R_a = \frac{R'' * R^+}{R'' + R^+ + R^-}$$

$$R_b = \frac{R'' * R^-}{R'' + R^+ + R^-}$$

$$R_c = \frac{R^+ * R^-}{R'' + R^+ + R^-}$$

Λόγω της πολυπλοκότητας των πράξεων, στη συνέχεια, κάνουμε τις εξής παραδοχές:

- 1) Οι αντιστάσεις των γραμμών είναι ίσες μεταξύ τους, $R_1 = R_2 = R_3 = r$
- 2) Οι αντιστάσεις των φορτίων είναι ίσες μεταξύ τους, $R_a = R_b = R_c = R$

Με βάση τις παραδοχές αυτές, η σχέση που συνδέει τις αντιστάσεις φορτίου συνδεδεμένες σε αστέρα, με τις αντίστοιχες σε συνδεσμολογία τριγώνου παίρνει τη μορφή:

$$R'' = R^+ = R^- = 3 * R$$

Με αυτές τις παραδοχές, προχωράμε στην ανάλυση του κυκλώματος.

Εφαρμόζοντας την αρχή της επαλληλίας στο κύκλωμα του σχήματος (2.15), προκύπτουν μέσω του Νόμου Τάσεων Kirchhoff (N.T.K.) οι εξής σχέσεις:

$$V_{dc1} = I_1 * r + I_a * R - I_b * R - I_2 * r + V_{dc2} \quad (1)$$

$$V_{dc2} = I_2 * r + I_b * R + I_c * R \quad (2)$$

$$V_{dc3} = I_3 * r + I_a * R - I_b * R \quad (3)$$

Από Νόμο Ρευμάτων Kirchhoff (N.P.K.) έχω:

$$I_a = I_1 + I_3 \quad (4)$$

$$I_b = I_2 - I_3 \quad (5)$$

$$I_c = I_1 + I_2 \quad (6)$$

Από τις σχέσεις (4), (5) και (6) αντικαθιστώ, στις σχέσεις (1), (2) και (3), τα ρεύματα I_a , I_b , I_c . Προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$V_{dc1} = V_{dc2} + I_1 * (r + R) - I_2 * (r + R) + I_3 * 2 * R \quad (7)$$

$$V_{dc2} = I_1 * R + I_2 * (r + 2 * R) - I_3 * R \quad (8)$$

$$V_{dc3} = I_1 * R - I_2 * R + I_3 * (r + 2 * R) \quad (9)$$

Με αφαίρεση κατά μέλη των εξισώσεων (9) και (8) και επιλύοντας ως προς I_3 έχουμε:

$$\begin{aligned} V_{dc3} - V_{dc2} &= -I_2 * (r + 3 * R) + I_3 * (r + 3 * R) \Rightarrow \\ \Rightarrow I_3 &= \frac{V_{dc3} - V_{dc2}}{r + 3 * R} + I_2 \quad (A) \end{aligned}$$

Πολλαπλασιάζοντας τα μέλη της σχέσης (8) με τον αριθμό 2 και προσθέτοντας κατά μέλη με την σχέση (7), έχουμε επιλύοντας ως προς I_1 :

$$\begin{aligned} 2 * V_{dc2} - V_{dc1} &= V_{dc2} + I_1 * (r + 3 * R) + I_2 * (r + 3 * R) \Rightarrow \\ \Rightarrow I_1 &= \frac{V_{dc1} + V_{dc2}}{r + 3 * R} - I_2 \quad (B) \end{aligned}$$

Αντικαθιστώντας τα ρεύματα I_3 και I_1 της σχέσης (9), με αυτά των σχέσεων (A) και (B) και επιλύοντας τη σχέση ως προς I_2 , έχουμε:

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{V_{dc3}}{r} - \frac{R * (V_{dc1} + V_{dc2})}{r * (r + 3 * R)} - \frac{(r + 2 * R) * (V_{dc3} - V_{dc2})}{r * (r + 3 * R)} \Rightarrow \\ \Rightarrow I_2 &= \frac{V_{dc3} * (r + 3 * R) - R * (V_{dc1} + V_{dc2}) - (r + 2 * R) * (V_{dc3} - V_{dc2})}{r * (r + 3 * R)} \Rightarrow \\ \Rightarrow I_2 &= \frac{r * V_{dc2} - R * V_{dc1} + R * V_{dc2} + R * V_{dc3}}{r * (r + 3 * R)} \Rightarrow \\ \Rightarrow I_2 &= \frac{V_{dc2}}{(r + 3 * R)} + \frac{R * (V_{dc3} + V_{dc2} - V_{dc1})}{r * (r + 3 * R)} \end{aligned}$$

Αυτή είναι η εξίσωση του ρεύματος I_2 της τοπολογίας, συναρτήσκει μόνο των τάσεων και των αντιστάσεων του κυκλώματος.

Αντικαθιστώντας το I_2 στις σχέσεις (A) και (B) προκύπτουν οι εξισώσεις των ρευμάτων I_3 και I_1 αντίστοιχα:

$$I_3 = \frac{V_{dc3}}{(r + 3 * R)} + \frac{R * (V_{dc3} + V_{dc2} - V_{dc1})}{r * (r + 3 * R)}$$

$$I_1 = \frac{V_{dc1}}{(r + 3 * R)} - \frac{R * (V_{dc3} + V_{dc2} - V_{dc1})}{r * (r + 3 * R)}$$

Αυτό που παρατηρούμε, είναι ότι και στις τρεις εξισώσεις εμφανίζεται ο όρος:

$$\frac{R * (V_{dc3} + V_{dc2} - V_{dc1})}{r * (r + 3 * R)}$$

Ο όρος αυτός συμπεριλαμβάνει τις τάσεις όλων των πηγών και μηδενίζεται όταν υπάρχει «ισορροπία» μεταξύ των τάσεων των πηγών. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρώντας την τοπολογία του σχήματος (2.13), αντιλαμβανόμαστε ότι η τιμή της V_{dc3} θα πρέπει να είναι ίση με το με το άθροισμα των απόλυτων τιμών των V_{dc1} και V_{dc2} . Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι $V_{dc1} > 0$ και $V_{dc2} < 0$, ο όρος αυτός αντικατοπτρίζει το γεγονός αυτό. Κατ'αυτὸν τὸν τρόπο γίνεται αντιληπτό ότι ο όρος αυτός αντιστοιχεί στο κυκλοφορούν ρεύμα της τοπολογίας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στη συγκεκριμένη τοπολογία, δεν υπάρχουν κυκλοφορούντα ρεύματα που αναπτύσσονται μεταξύ δύο κάθε φορά πηγών, αλλά ένα κυκλοφορούν ρεύμα που ρέει στο κύκλωμα, επιβαρύνοντας τις γραμμές και η δημιουργία του οφείλεται σε μία συνθήκη που εξαρτάται από τις τρεις πηγές της τοπολογίας.

Επομένως έχουμε το κυκλοφορούν ρεύμα της τοπολογίας:

$$I_c = \frac{R * (V_{dc3} + V_{dc2} - V_{dc1})}{r * (r + 3 * R)}$$

Τα ρεύματα των πηγών που συνεισφέρουν στην τροφοδότηση των φορτίων δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$I_{1L} = \frac{V_{dc1}}{(r + 3 * R)}$$

$$I_{2L} = \frac{V_{dc2}}{(r + 3 * R)}$$

$$I_{3L} = \frac{V_{dc3}}{(r + 3 * R)}$$

2.4- Συμπεράσματα

Αυτό που παρατηρούμε γενικότερα σε όλες τις συνδεσμολογίες, είναι ότι η «ανισορροπία» μεταξύ των τάσεων των πηγών, όπως αυτή «μεταφράζεται» σε κάθε τοπολογία, προκαλεί τη δημιουργία κυκλοφορούντων ρευμάτων.

Πιο συγκεκριμένα, στις μονοπολικές συνδεσμολογίες, όπου οι πηγές έχουν την ίδια πολικότητα, η δημιουργία κυκλοφορούντων ρευμάτων οφείλεται στην ανισότητα μεταξύ των τάσεων των πηγών. Κατ'αυτόν τον τρόπο, δημιουργούνται βρόγχοι μεταξύ των πηγών, στους οποίους κυκλοφορεί μέρος του ρεύματος που παράγουν οι πηγές. Το ρεύμα αυτό επιβαρύνει τις γραμμές αφού ουσιαστικά κυκλοφορεί χωρίς να αποδίδει ισχύ σε κάποιο φορτίο.

Στις διπολικές πηγές, όπου οι πηγές έχουν αντίθετες μεταξύ τους πολικότητες, οι συνθήκες δημιουργίας των κυκλοφορούντων ρευμάτων αναφέρονται στις διαφορές των απόλυτων τιμών των τάσεων των πηγών. Ωστόσο, το αποτέλεσμα είναι το ίδιο, καθώς και σε αυτήν την περίπτωση έχουμε την κυκλοφορία ρεύματος στο κύκλωμα το οποίο δεν καταναλώνεται σε κάποιο φορτίο, αλλά απλά επιβαρύνει τις γραμμές του κυκλώματος.

Κεφάλαιο 3

Καταστολή των κυκλοφορούντων ρευμάτων μέσω της μεθόδου *Droop Index*

Σε αυτό το κεφάλαιο, γνωρίζοντας πλέον τις συνθήκες δημιουργίας κυκλοφορούντων ρευμάτων σε κάθε τοπολογία που εξετάζονται, εφαρμόζεται ο πρωτογενής παθητικός έλεγχος Droop (Droop Control) με τη χρήση κατάλληλου δείκτη DI (Droop Index).

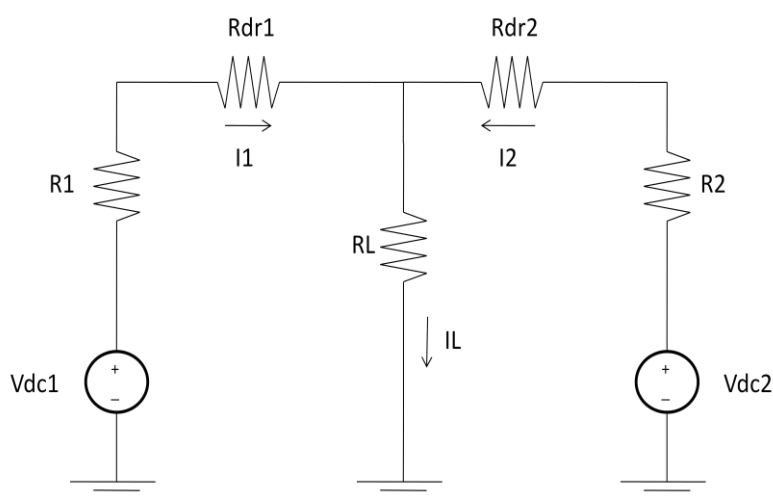
3.1 – Εισαγωγή

Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που έχουμε να αντιμετωπίσουμε στα χαμηλής τάσης και συνεχούς ρεύματος μικροδίκτυα (LVDC MGs), είναι η ύπαρξη των κυκλοφορούντων ρευμάτων. Τα ρεύματα αυτά είναι ουσιαστικά, ρεύματα παραγόμενα απ' τις πηγές, τα οποία δεν καταλήγουν στο φορτίο αλλά κυκλοφορούν στο δίκτυο, προκαλώντας μεγάλες απώλειες και επιβαρύνοντας τις γραμμές.

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι για την καταστολή αυτών των ρευμάτων και την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού. Όπως έχει προαναφερθεί, υπάρχουν πολλαπλά επίπεδα ελέγχου και αρκετές μέθοδοι σε κάθε επίπεδο, που οδηγούν στην καταστολή των κυκλοφορούντων ρευμάτων. Μία μέθοδος πρωταρχικού ελέγχου για την αντιμετώπιση του φαινομένου των κυκλοφορούντων ρευμάτων είναι ο έλεγχος Droop μέσω του δείκτη Droop Index (DI).

3.2 – Ο έλεγχος Droop μέσω της μεθόδου Droop Index

Ο έλεγχος Droop επιτυγχάνει την καταστολή των κυκλοφορούντων ρευμάτων μέσω του διαμοιρασμού του φορτίου (current sharing) μεταξύ των διάφορων πηγών με παθητικό τρόπο (passive load sharing), καθώς δεν χρειάζεται κάποιο είδος «επικοινωνίας» μεταξύ των πηγών. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει την προσθήκη μίας αντίστασης μεταβλητής τιμής στην γραμμή κάθε πηγής. Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται πως τοποθετούνται οι αντιστάσεις Droop R_{dr1} και R_{dr2} , σε μονοπολική συνδεσμολογία σύνδεσης δύο πηγών συνεχούς τάσης.



Σχήμα (3.1)- Εφαρμογή ελέγχου Droop σε ισοδύναμο κύκλωμα σύνδεσης δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία.

Με βάση την θεωρητική ανάλυση που κάναμε για τις συνθήκες δημιουργίας των κυκλοφορούντων ρευμάτων, διαπιστώσαμε ότι η «ανισορροπία» μεταξύ των τάσεων των πηγών είναι αυτή που προκαλεί την ύπαρξη τους. Επιλέγοντας τις κατάλληλες τιμές για τις αντιστάσεις Droop, είναι δυνατόν να φέρουμε τις τάσεις των διαφόρων πηγών στο ίδιο

επίπεδο, καταστέλοντας έτσι τα κυκλοφορούντα ρεύματα. Ωστόσο, η προσθήκη αντιστάσεων στο κύκλωμα θα προκαλέσει επιπλέον απώλειες στις γραμμές. Σε πολλές περιπτώσεις, η προσθήκη αντιστάσεων Droop τιμής τέτοιας ώστε να μηδενίζονται τα κυκλοφορούντα ρεύματα, προκαλεί απώλειες μεγαλύτερες από αυτές που είχαμε με την παρουσία των κυκλοφορούντων ρευμάτων. Επομένως, αυτό που χρειαζόμαστε για την σωστή εφαρμογή του ελέγχου Droop, είναι ένας δείκτης που θα λαμβάνει υπ' όψη του τόσο τα κυκλοφορούντα ρεύματα, όσο και τις απώλειες γραμμών του δικτύου.

Ο δείκτης αυτός ονομάζεται Droop Index (DI) και είναι ο εξής:

$$DI = \frac{1}{2} * (|I_c| * N_i + P_{loss} * N_p)$$

Όπου, I_c : τα κυκλοφορούντα ρεύματα του δικτύου

P_{loss} : οι απώλειες γραμμών του δικτύου

N_i : συντελεστής κανονικοποίησης των κυκλοφορούντων ρευμάτων

N_p : συντελεστής κανονικοποίησης των απωλειών των γραμμών

Οι απώλειες γραμμών P_{loss} δίνονται απ' την σχέση:

$$P_{loss} = I_1^2 * (R_1 + R_{dr1}) + I_2^2 * (R_2 + R_{dr2}) + \dots + I_n^2 * (R_n + R_{drn})$$

Η κανονικοποίηση των κυκλοφορούντων ρευμάτων και των απωλειών των γραμμών του δικτύου, γίνονται με βάση τις μέγιστες τιμές τους. Δηλαδή για τους δύο συντελεστές ισχύει:

$$N_i = \frac{1}{|I_{cmax}|}$$

$$N_p = \frac{1}{P_{lossmax}}$$

Η κανονικοποίηση των κυκλοφορούντων ρευμάτων και των απωλειών γραμμών ως προς τις μέγιστες τιμές τους, μας επιτρέπει ουσιαστικά να λαμβάνουμε υπ' όψη για κάθε τιμή των αντιστάσεων Droop το ποσοστό των κυκλοφορούντων ρευμάτων και των απωλειών γραμμών που έχουμε στο κύκλωμα, με βάση τις μέγιστες τιμές τους. Κατ' αυτόν τον τρόπο, ο δείκτης Droop Index, μας δίνει κάθε φορά, για τις διάφορες τιμές των αντιστάσεων Droop, έναν καθαρό αριθμό που δείχνει το επίπεδο των κυκλοφορούντων ρευμάτων και των απωλειών γραμμών στο δίκτυο.

Με βάση τις συνθήκες ύπαρξης κυκλοφορούντων ρευμάτων στο δίκτυο, μπορούμε να καταλήξουμε σε σχέσεις μεταξύ των αντιστάσεων Droop συναρτήσει μίας μόνο κοινής αντίστασης Droop. Επομένως, ο δείκτης DI μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει μίας μόνο αντίστασης Droop σε κάθε τοπολογία. Έτσι, μπορούμε να μεταβάλλουμε την συγκεκριμένη αντίσταση Droop εντός ενός επιθυμητού εύρους τιμών, καταλήγοντας σε διαφορετικές τιμές του DI. Η τιμή της αντίστασης Droop που θα οδηγήσει στο ελάχιστο DI, είναι αυτή που θα προσθέσουμε στο δίκτυο. Στη συνέχεια, από τις σχέσεις μεταξύ των αντιστάσεων Droop,

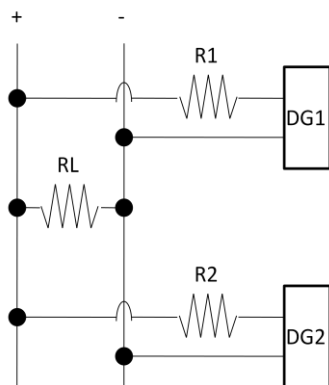
βρίσκουμε τις τιμές των υπολοίπων αντιστάσεων Droop, που αντιστοιχούν στις άλλες γραμμές.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις των ρευμάτων που προέκυψαν από την θεωρητική ανάλυση των διαφόρων τοπολογιών στο προηγούμενο κεφάλαιο, θα προχωρήσουμε στην εφαρμογή του ελέγχου Droop μέσω της μεθόδου Droop Index για κάθε μία τοπολογία.

3.3 – Μονοπολικές (Unipolar) συνδεσμολογίες

3.3.1.1 – Σύνδεση δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Two terminal DC unipolar connection)

Η συνδεσμολογία που εξετάζουμε εδώ είναι αυτή του παρακάτω σχήματος:



Σχήμα (3.2)- Τοπολογία σύνδεσης δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Two terminal DC unipolar connection).

Το ισοδύναμο κύκλωμα της συγκεκριμένης τοπολογίας, με εφαρμογή του ελέγχου Droop, είναι αυτό του σχήματος (3.1).

Ο δείκτης DI δίνεται από τη σχέση:

$$DI = \frac{1}{2} * (|I_c| * N_i + P_{loss} * N_p)$$

Όπου, I_c : το κυκλοφορούν ρεύμα του δικτύου

P_{loss} : οι απώλειες γραμμών του δικτύου

N_i : συντελεστής κανονικοποίησης των κυκλοφορούντων ρευμάτων

N_p : συντελεστής κανονικοποίησης των απωλειών των γραμμών

Με βάση τις εξισώσεις των ρευμάτων που προέκυψαν από την θεωρητική ανάλυση της τοπολογίας στο προηγούμενο κεφάλαιο, το κυκλοφορούν ρεύμα του δικτύου δίνεται από τη σχέση:

$$I_{c12} = \frac{V_{dc1} - V_{dc2}}{(R_1 + R_{dr1}) + (R_2 + R_{dr2})}$$

Οι απώλειες γραμμών P_{loss} δίνονται απ'την σχέση:

$$P_{loss} = I_1^2 * (R_1 + R_{dr1}) + I_2^2 * (R_2 + R_{dr2})$$

Όπου,

$$I_1 = \frac{V_{dc1} * (R_2 + R_{dr2} + R_L) - V_{dc2} * R_L}{R_L * [(R_1 + R_{dr1}) + (R_2 + R_{dr2})]}$$

$$I_2 = \frac{V_{dc2} * (R_1 + R_{dr1} + R_L) - V_{dc1} * R_L}{R_L * [(R_1 + R_{dr1}) + (R_2 + R_{dr2})]}$$

Η κανονικοποίηση των κυκλοφορούντων ρευμάτων και των απωλειών των γραμμών του δικτύου, γίνονται με βάση τις μέγιστες τιμές τους. Δηλαδή για τους δύο συντελεστές ισχύει:

$$N_i = \frac{1}{|I_{cmax}|}$$

$$N_p = \frac{1}{P_{lossmax}}$$

Επομένως το DI δίνεται απ'τη σχέση:

$$DI = \frac{1}{2} * \left\{ \left| \frac{V_{dc1} - V_{dc2}}{(R_1 + R_{dr1}) + (R_2 + R_{dr2})} \right| * N_i + \left[\left(\frac{V_{dc1} * (R_2 + R_{dr2} + R_L) - V_{dc2} * R_L}{R_L * ((R_1 + R_{dr1}) + (R_2 + R_{dr2}))} \right)^2 * (R_1 + R_{dr1}) + \left(\frac{V_{dc2} * (R_1 + R_{dr1} + R_L) - V_{dc1} * R_L}{R_L * ((R_1 + R_{dr1}) + (R_2 + R_{dr2}))} \right)^2 * (R_2 + R_{dr2}) \right] * N_p \right\}$$

Όπως αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα, μπορούμε να βρούμε μια σχέση που να συνδέει τις R_{dr1} και R_{dr2} , μέσω της συνθήκης ύπαρξης κυκλοφορούντων ρευμάτων.

Για να μην έχουμε κυκλοφορούντα ρεύματα, θα πρέπει $V_{dc1} = V_{dc2}$.

Εφαρμόζοντας την αρχή της επαλληλίας στο κύκλωμα του σχήματος (3.1), προκύπτουν μέσω του Νόμου Τάσεων Kirchhoff (N.T.K.) οι εξής σχέσεις:

$$V_{dc1} = I_1 * (R_1 + R_{dr1}) + I_L * R_L$$

$$V_{dc2} = I_2 * (R_2 + R_{dr2}) + I_L * R_L$$

Άρα με βάση την ισότητα $V_{dc1} = V_{dc2}$ ισχύει ότι:

$$\begin{aligned} I_1 * (R_1 + R_{dr1}) + I_L * R_L &= I_2 * (R_2 + R_{dr2}) + I_L * R_L \Rightarrow \\ \Rightarrow I_1 * (R_1 + R_{dr1}) &= I_2 * (R_2 + R_{dr2}) \Rightarrow \\ \Rightarrow (R_1 + R_{dr1}) &= y * (R_2 + R_{dr2}) \end{aligned}$$

Όπου,

$$y = \frac{I_2}{I_1} = \frac{R_{dr1} + R_1}{R_{dr2} + R_2}$$

Επειδή γενικότερα οι αντιστάσεις των γραμμών R_1, R_2 είναι αρκετά μικρότερες των αντιστάσεων Droop R_{dr1}, R_{dr2} , που προστίθενται στο κύκλωμα, ισχύει ότι:

$$y = \frac{R_{dr1}}{R_{dr2}}$$

Ακόμη, σύμφωνα με την βιβλιογραφία, προκειμένου να επιτευχθεί ο επιθυμητός διαμοιρασμός του φορτίου κατά την εφαρμογή του ελέγχου Droop στην συγκεκριμένη τοπολογία, θα πρέπει να ισχύει:

$$\frac{R_{dr1}}{R_{dr2}} = \frac{R_1}{R_2}$$

Επομένως έχουμε:

$$y = \frac{R_1}{R_2}$$

Ακόμη ορίζουμε τα παρακάτω μεγέθη:

$$m = R_2 + R_{dr2}$$

$$x = \frac{V_{dc1}}{V_{dc2}} \Rightarrow V_{dc1} = x * V_{dc2}$$

Τώρα, το DI παίρνει την εξής μορφή:

$$DI = \frac{1}{2} * \left\{ \left| \frac{x * V_{dc2} - V_{dc2}}{y * m + m} \right| * N_i + \left[\left(\frac{x * V_{dc2} * (m + R_L) - V_{dc2} * R_L}{R_L * (y * m + m)} \right)^2 * y * m + \left(\frac{V_{dc2} * (y * m + R_L) - x * V_{dc2} * R_L}{R_L * (y * m + m)} \right)^2 * m \right] * N_p \right\}$$

Παρατηρώ ότι οι μόνοι άγνωστοί στην παραπάνω εξίσωση είναι το R_{dr2} και οι συντελεστές κανονικοποίησης.

Για τον προσδιορισμό των $|I_{cmax}|$ και $P_{lossmax}$, χρησιμοποιώ τις σχέσεις:

$$|I_c| = \left| \frac{x * V_{dc2} - V_{dc2}}{y * m + m} \right|$$

$$P_{loss} = \left(\frac{x * V_{dc2} * (m + R_L) - V_{dc2} * R_L}{R_L * (y * m + m)} \right)^2 * y * m + \left(\frac{V_{dc2} * (y * m + R_L) - x * V_{dc2} * R_L}{R_L * (y * m + m)} \right)^2 * m$$

Μεταβάλλοντας την R_{dr2} εντός του επιθυμητού εύρους τιμών, καταλήγουμε σε διαφορετικές τιμές των $|I_c|$ και P_{loss} . Επιλέγουμε τις μεγαλύτερες τιμές των δύο μεγεθών και προσδιορίζουμε τους συντελεστές N_i και N_p .

Στη συνέχεια, με γνωστά τα N_i και N_p , μεταβάλλουμε την αντίσταση Droop R_{dr2} εντός του επιθυμητού εύρους τιμών, καταλήγοντας σε διαφορετικές τιμές του DI. Η τιμή της αντίστασης Droop R_{dr2} , που θα οδηγήσει στο ελάχιστο DI, είναι αυτή που θα προσθέσουμε στο δίκτυο.

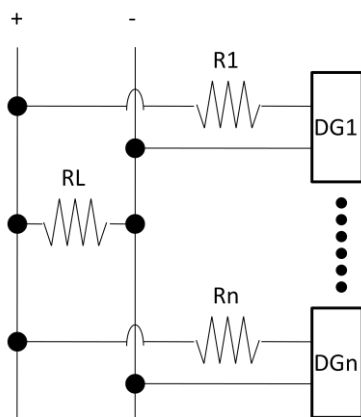
Στη συνέχεια μέσω της σχέσης:

$$y = \frac{R_{dr1}}{R_{dr2}}$$

Βρίσκουμε την τιμή της αντίστασης Droop R_{dr1} . Έτσι έχουμε τις τιμές των αντιστάσεων Droop που πρέπει να τοποθετηθούν στο κύκλωμα, ώστε να έχω το βέλτιστο συνδυασμό κυκλοφορούντων ρευμάτων και απωλειών των γραμμών.

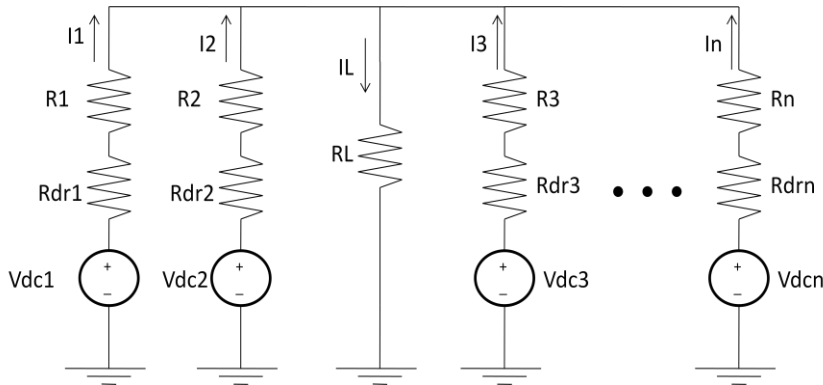
3.3.1.2 - Γενίκευση για περισσότερες από δύο πηγές: Σύνδεση n πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (n terminal DC unipolar connection)

Η συνδεσμολογία που εξετάζουμε εδώ, είναι μια γενίκευση της τοπολογίας «two terminal DC unipolar connection» για n πηγές και φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα (3.3)- Τοπολογία σύνδεσης n πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Two terminal DC unipolar connection).

Το ισοδύναμο κύκλωμα της συγκεκριμένης τοπολογίας, με εφαρμογή του ελέγχου Droop, δίνεται παρακάτω στο σχήμα (3.4).



Σχήμα (3.4)- Ισοδύναμο κύκλωμα τοπολογίας σύνδεσης n πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Two terminal DC unipolar connection) με εφαρμογή ελέγχου Droop.

Ο δείκτης DI δίνεται από τη σχέση:

$$DI = \frac{1}{2} * (|I_c| * N_i + P_{loss} * N_p)$$

Όπου, I_c : το κυκλοφορούν ρεύμα του δικτύου

P_{loss} : οι απώλειες γραμμών του δικτύου

N_i : συντελεστής κανονικοποίησης των κυκλοφορούντων ρευμάτων

N_p : συντελεστής κανονικοποίησης των απωλειών των γραμμών

Στην περίπτωση των δύο πηγών, στον όρο $|I_c|$, συμπεριλάβαμε το κυκλοφορούν ρεύμα μεταξύ των δύο πηγών V_{dc1} και V_{dc2} . Εδώ, στον όρο $|I_c|$, θα πρέπει να συμπεριλάβουμε τα κυκλοφορούντα ρεύματα που αναπτύσσονται μεταξύ όλων των πηγών. Πιο συγκεκριμένα, για n πηγές θα αναπτυχθούν κυκλοφορούντα ρεύματα μεταξύ της πηγής $V_{dc1} - V_{dc2}$, $V_{dc1} - V_{dc3}$, ..., $V_{dc1} - V_{dcn}$, $V_{dc2} - V_{dc3}$, $V_{dc2} - V_{dc4}$, ..., $V_{dc2} - V_{dcn}$, κ.ο.κ.

Αυτό που πρέπει να προσέξουμε είναι να μην υπολογίσουμε στον προσδιορισμό του DI δύο φορές το ίδιο κυκλοφορούν ρεύμα. Για παράδειγμα, αν συμπεριλάβουμε στον όρο $|I_c|$, το κυκλοφορούν ρεύμα I_{c1j} , όπου $j > 1$, δεν πρέπει να συμπεριληφθεί ο όρος I_{c11} .

Επομένως για τον όρο $|I_c|$ ισχύει:

$$|I_c| = \left[\sum_{i=1}^{n-1} \left(\sum_{j=1+1}^n |I_{cij}| \right) \right]$$

Όσον αφορά στις απώλειες των γραμμών έχουμε:

$$P_{loss} = I_1^2 * (R_1 + R_{dr1}) + I_2^2 * (R_2 + R_{dr2}) + \dots + I_n^2 * (R_n + R_{drn})$$

Η κανονικοποίηση των κυκλοφορούντων ρευμάτων και των απωλειών των γραμμών του δικτύου, γίνονται με βάση τις μέγιστες τιμές τους. Δηλαδή για τους δύο συντελεστές ισχύει:

$$N_i = \frac{1}{|I_{cmax}|}$$

$$N_p = \frac{1}{P_{lossmax}}$$

Με βάση τη θεωρητική ανάλυση της τοπολογίας που έγινε σε προηγούμενο κεφάλαιο, το ρεύμα I_j της πηγής V_{dcj} δίνεται απ' τον παρακάτω τύπο:

$$I_j = \frac{V_{dcj} * ((R_1 + R_{dr1}) * (R_2 + R_{dr2}) * \dots * (R_n + R_{drn})) * \frac{1}{R_j + R_{drj}}}{R_L * ((R_1 + R_{dr1}) * (R_2 + R_{dr2}) * \dots * (R_n + R_{drn})) * \left(\frac{1}{R_1 + R_{dr1}} + \frac{1}{R_2 + R_{dr2}} + \dots + \frac{1}{R_n + R_{drn}} \right)} +$$

$$+ \sum_{m=1}^n \text{και } m \neq j \frac{(V_{dcj} - V_{dcm}) * ((R_1 + R_{dr1}) * (R_2 + R_{dr2}) * \dots * (R_n + R_{drn})) * \frac{1}{(R_j + R_{drj}) + (R_m + R_{drm})}}{((R_1 + R_{dr1}) * (R_2 + R_{dr2}) * \dots * (R_n + R_{drn})) * \left(\frac{1}{R_1 + R_{dr1}} + \frac{1}{R_2 + R_{dr2}} + \dots + \frac{1}{R_n + R_{drn}} \right)}$$

Κάθε επιμέρους όρος του αθροίσματος:

$$\sum_{m=1}^n \text{και } m \neq j \frac{(V_{dcj} - V_{dcm}) * ((R_1 + R_{dr1}) * (R_2 + R_{dr2}) * \dots * (R_n + R_{drn})) * \frac{1}{(R_j + R_{drj}) + (R_m + R_{drm})}}{((R_1 + R_{dr1}) * (R_2 + R_{dr2}) * \dots * (R_n + R_{drn})) * \left(\frac{1}{R_1 + R_{dr1}} + \frac{1}{R_2 + R_{dr2}} + \dots + \frac{1}{R_n + R_{drn}} \right)}$$

δίνει το κυκλοφορούν ρεύμα μεταξύ της πηγής V_{dcj} και της πηγής V_{dcm} .

Προκειμένου, να βρω το ελάχιστο DI, θα πρέπει να το εκφράσω, όπως και παραπάνω συναρτήσει μίας μόνο αντίστασης R_{drj} . Έτσι, μεταβάλλοντας την τιμή της εντός του επιθυμητού εύρους, θα βρω την τιμή που ελαχιστοποιεί το DI. Αυτή είναι η R_{drj} που θα προστεθεί στην γραμμή j . Στη συνέχεια, μέσω των σχέσεων που συνδέουν τις R_{dr} , θα βρω και τις υπόλοιπες.

Όπως είδαμε στη θεωρητική ανάλυση, η συνθήκη για τη μη ύπαρξη κυκλοφορούντων ρευμάτων μεταξύ δύο τυχαίων πηγών, είναι ίδια όπως και στην τοπολογία όπου υπάρχουν μόνο δύο πηγές στο κύκλωμα. Επομένως οι σχέσεις που χρησιμοποιήσαμε για να μετατρέψουμε το DI συναρτήσει μόνο της R_{dr2} , μπορούν να χρησιμοποιηθούν και εδώ για 2 τυχαίες πηγές ώστε να μετραπεί η εξίσωση που δίνει το DI συναρτήσει μόνο της R_{drj} .

Πιο συγκεκριμένα έχουμε:

$$y_1 = \frac{R_{dr1} + R_1}{R_{drj} + R_j} = \frac{R_1}{R_j} = \frac{R_{dr1}}{R_{drj}}$$

$$y_2 = \frac{R_{dr2} + R_2}{R_{drj} + R_j} = \frac{R_2}{R_j} = \frac{R_{dr2}}{R_{drj}}$$

$$y_n = \frac{R_{drn} + R_n}{R_{drj} + R_j} = \frac{R_n}{R_j} = \frac{R_{drn}}{R_{drj}}$$

Με τον τρόπο αυτό, όλες οι αντιστάσεις $Droop R_{dr}$, έχουν εκφραστεί συναρτήσει της R_{dr2} και ενός συντελεστή y . Ο συντελεστής y είναι γνωστός, αφού τα μεγέθη των αντιστάσεων R είναι γνωστά.

Ακόμη, όπως και πριν, για να απλοποιήσουμε τις πράξεις, ορίζουμε τα παρακάτω μεγέθη:

$$m = R_j + R_{drj}$$

$$x_1 = \frac{V_{dc1}}{V_{dcj}} \Rightarrow V_{dc1} = x_1 * V_{dcj}$$

.

.

.

$$x_n = \frac{V_{dcn}}{V_{dcj}} \Rightarrow V_{dcn} = x_n * V_{dcj}$$

Παρατηρώ ότι πλέον οι μόνοι άγνωστοι στην εξίσωση για το DI είναι το R_{drj} και οι συντελεστές κανονικοποίησης.

Για τον προσδιορισμό των $|I_{cmax}|$ και $P_{lossmax}$ μεταβάλλοντας την R_{drj} εντός του επιθυμητού εύρους τιμών, καταλήγουμε σε διαφορετικές τιμές των $|I_c|$ και P_{loss} . Επιλέγουμε τις μεγαλύτερες τιμές των δύο μεγεθών και προσδιορίζουμε τους συντελεστές N_i και N_p .

Στη συνέχεια, με γνωστά τα N_i και N_p , μεταβάλλουμε την αντίσταση $Droop R_{drj}$ εντός του επιθυμητού εύρους τιμών, καταλήγοντας σε διαφορετικές τιμές του DI. Η τιμή της αντίστασης $Droop R_{drj}$, που θα οδηγήσει στο ελάχιστο DI, είναι αυτή που θα προσθέσουμε στο δίκτυο.

Στη συνέχεια μέσω συντελεστών y , βρίσκουμε τις τιμές των υπόλοιπων αντιστάσεων $Droop R_{dr}$. Έτσι έχουμε τις τιμές των αντιστάσεων $Droop$ που πρέπει να τοποθετηθούν στο κύκλωμα, ώστε να έχω το βέλτιστο συνδυασμό κυκλοφορούντων ρευμάτων και απωλειών των γραμμών.

Χρησιμοποιώντας το παράδειγμα που χρησιμοποιήσαμε στην θεωρητική ανάλυση της συγκεκριμένης τοπολογίας, όπου $n = 3$, ώστε η εξίσωση του DI και πιο συγκεκριμένα ο όρος $|I_c|$ που αναφέρεται στα κυκλοφορούντα ρεύματα της τοπολογίας, να γίνει πιο κατανοητή έχουμε την εξής σχέση:

$$DI = \frac{1}{2} * \{(|I_{c12}| + |I_{c13}| + |I_{c23}|) * N_i + [I_1^2 * (R_1 + R_{dr1}) + I_2^2 * (R_2 + R_{dr2}) + I_3^2 * (R_3 + R_{dr3})] * N_p\}$$

Εφαρμόζουμε τις εξισώσεις των ρευμάτων και μετατρέπουμε την εξίσωση του DI σε συνάρτηση μόνο μίας αντίστασης $Droop R_{dr}$, μέσω των συντελεστών y . Επιλέγουμε τυχαία την αντίσταση R_{dr2} . Ακόμη, χρησιμοποιώντας τους συντελεστές x , μετατρέπουμε όλες τις τάξεις σε συνάρτηση της V_{dc2} . Ορίζοντας,

$$m = R_2 + R_{dr2}$$

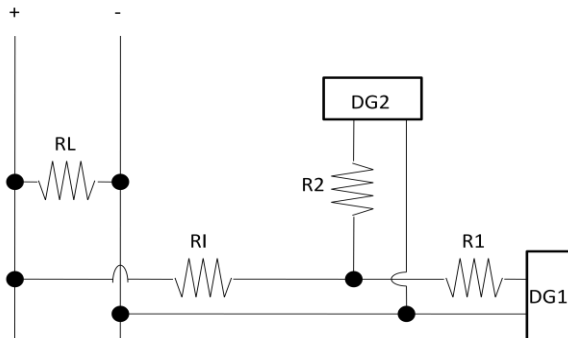
η εξίσωση παίρνει τη μορφή:

$$DI = \frac{1}{2} * \left\{ \left(\frac{V_{dc2} * |x_1 - 1| * m * y_3}{m^2 * (y_1 + y_3 + y_1 * y_3)} + \frac{V_{dc2} * |x_1 - x_3| * m}{m^2 * (y_1 + y_3 + y_1 * y_3)} + \frac{V_{dc2} * |1 - x_3| * m * y_1}{m^2 * (y_1 + y_3 + y_1 * y_3)} \right) * N_i + \left[\left(\frac{x_1 * V_{dc2} * m^2 * y_3}{R_L * m^2 * (y_1 + y_3 + y_1 * y_3)} + \frac{V_{dc2} * |x_1 - 1| * m * y_3}{m^2 * (y_1 + y_3 + y_1 * y_3)} + \frac{V_{dc2} * |x_1 - x_3| * m}{m^2 * (y_1 + y_3 + y_1 * y_3)} \right)^2 * m * y_1 + \left(\frac{V_{dc2} * m^2 * y_3 * y_1}{R_L * m^2 * (y_1 + y_3 + y_1 * y_3)} - \frac{V_{dc2} * |x_1 - 1| * m * y_3}{m^2 * (y_1 + y_3 + y_1 * y_3)} + \frac{V_{dc2} * |1 - x_3| * m * y_1}{m^2 * (y_1 + y_3 + y_1 * y_3)} \right)^2 * m + \left(\frac{x_3 * V_{dc2} * m^2 * y_1}{R_L * m^2 * (y_1 + y_3 + y_1 * y_3)} - \frac{V_{dc2} * |x_1 - x_3| * m}{m^2 * (y_1 + y_3 + y_1 * y_3)} - \frac{V_{dc2} * |1 - x_3| * m * y_1}{m^2 * (y_1 + y_3 + y_1 * y_3)} \right)^2 * m * y_3 \right] * N_p \}$$

Για τον προσδιορισμό των $|I_{cmax}|$ και $P_{lossmax}$ εργαζόμαστε με τον τρόπο που αναφέρεται παραπάνω. Στη συνέχεια, με γνωστά τα N_i και N_p βρίσκουμε την τιμή της R_{dr2} που ελαχιστοποιεί τον δείκτη DI και τις τιμές των υπόλοιπων αντιστάσεων $Droop R_{dr1}$ και R_{dr3} , που τοποθετούνται στην τοπολογία, με τη μέθοδο που έχουμε αναλύσει.

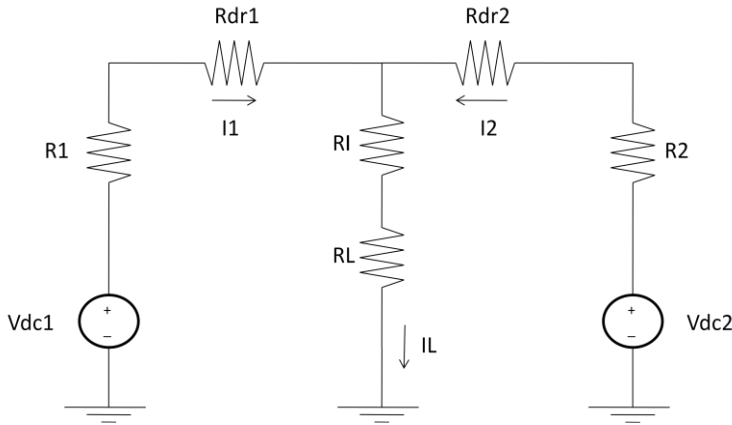
3.3.2.1 – Κοινή σύνδεση δύο παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources)

Η συνδεσμολογία που εξετάζουμε εδώ είναι αυτή του παρακάτω σχήματος:



Σχήμα (3.5)- Τοπολογία κοινής σύνδεσης δύο παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources).

Το ισοδύναμο κύκλωμα αυτής της συνδεσμολογίας είναι το εξής:



Σχήμα (3.6)-Ισοδύναμο κύκλωμα τοπολογίας κοινής σύνδεσης δύο παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources) με εφαρμογή ελέγχου Droop.

Παρατηρώντας το ισοδύναμο κύκλωμα της συγκεκριμένης τοπολογίας στο σχήμα (3.6), γίνεται αντιληπτό ότι η μόνη διαφορά της τοπολογίας αυτής, με την προηγούμενη τοπολογία της σύνδεσης δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Two terminal DC unipolar connection), είναι μία επιπλέον εν σειρά αντίσταση στην αντίσταση που αντιστοιχεί στο φορτίο R_L . Επομένως οι σχέσεις είναι παρόμοιες με αυτές της προηγούμενης τοπολογίας, με τη διαφορά ότι στη θέση του R_L , θα έχουμε $R'_{Lo\lambda} = R_L + R_L$.

Τώρα, το DI παίρνει την εξής μορφή:

$$DI = \frac{1}{2} * \left\{ \left| \frac{x * V_{dc2} - V_{dc2}}{y * m + m} \right| * N_i + \left[\left(\frac{x * V_{dc2} * (m + R_L) - V_{dc2} * R'_{Lo\lambda}}{R'_{Lo\lambda} * (y * m + m)} \right)^2 * y * m + \left(\frac{V_{dc2} * (y * m + R_L) - x * V_{dc2} * R'_{Lo\lambda}}{R'_{Lo\lambda} * (y * m + m)} \right)^2 * m \right] * N_p \right\}$$

Στη συνέχεια εργαζόμαστε με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που εργαστήκαμε και στην τοπολογία της σύνδεσης δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Two terminal DC unipolar connection).

Παρατηρώ ότι οι μόνοι άγνωστοι στην παραπάνω εξίσωση είναι το R_{dr2} και οι συντελεστές κανονικοποίησης.

Για τον προσδιορισμό των $|I_{cmax}|$ και $P_{lossmax}$, χρησιμοποιώ τις σχέσεις:

$$|I_c| = \left| \frac{x * V_{dc2} - V_{dc2}}{y * m + m} \right|$$

$$P_{loss} = \left(\frac{x * V_{dc2} * (m + R'_{Lo\lambda}) - V_{dc2} * R'_{Lo\lambda}}{R'_{Lo\lambda} * (y * m + m)} \right)^2 * y * m + \left(\frac{V_{dc2} * (y * m + R'_{Lo\lambda}) - x * V_{dc2} * R'_{Lo\lambda}}{R'_{Lo\lambda} * (y * m + m)} \right)^2 * m$$

Μεταβάλλοντας την R_{dr2} εντός του επιθυμητού εύρους τιμών, καταλήγουμε σε διαφορετικές τιμές των $|I_c|$ και P_{loss} . Επιλέγουμε τις μεγαλύτερες τιμές των δύο μεγεθών και προσδιορίζουμε τους συντελεστές N_i και N_p .

Στη συνέχεια, με γνωστά τα N_i και N_p , μεταβάλλουμε την αντίσταση Droop R_{dr2} εντός του επιθυμητού εύρους τιμών, καταλήγοντας σε διαφορετικές τιμές του DI. Η τιμή της αντίστασης Droop R_{dr2} , που θα οδηγήσει στο ελάχιστο DI, είναι αυτή που θα προσθέσουμε στο δίκτυο.

Στη συνέχεια μέσω της σχέσης:

$$y = \frac{R_{dr1}}{R_{dr2}}$$

Βρίσκουμε την τιμή της αντίστασης Droop R_{dr1} . Έτσι έχουμε τις τιμές των αντιστάσεων Droop που πρέπει να τοποθετηθούν στο κύκλωμα, ώστε να έχω το βέλτιστο συνδυασμό κυκλοφορούντων ρευμάτων και απωλειών των γραμμών.

3.3.2.2 – Γενίκευση για περισσότερες από δύο πηγές: Κοινή σύνδεση n παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources)

Γενικεύοντας για n πηγές, οι σχέσεις είναι παρόμοιες με αυτές της προηγούμενης τοπολογίας, με τη διαφορά ότι στη θέση του R_L , θα έχουμε $R'_{Lo\lambda} = R_L + R_l$.

Έτσι, για τον όρο $|I_c|$ και τις απώλειες των γραμμών ισχύει:

$$|I_c| = \left[\sum_{i=1}^{n-1} \left(\sum_{j=1+1}^n |I_{cij}| \right) \right]$$

$$P_{loss} = I_1^2 * (R_1 + R_{dr1}) + I_2^2 * (R_2 + R_{dr2}) + \dots + I_n^2 * (R_n + R_{drn})$$

Όπου τώρα για το ρεύμα I_j της πηγής V_{dcj} , ισχύει:

$$I_j = \frac{V_{dcj} * ((R_1 + R_{dr1}) * (R_2 + R_{dr2}) * \dots * (R_n + R_{drn})) * \frac{1}{R_j + R_{drj}}}{R'_{Lo\lambda} * ((R_1 + R_{dr1}) * (R_2 + R_{dr2}) * \dots * (R_n + R_{drn})) * \left(\frac{1}{R_1 + R_{dr1}} + \frac{1}{R_2 + R_{dr2}} + \dots + \frac{1}{R_n + R_{drn}} \right)} + \sum_{m=1 \text{ και } m \neq j}^n \frac{(V_{dcj} - V_{dcm}) * ((R_1 + R_{dr1}) * (R_2 + R_{dr2}) * \dots * (R_n + R_{drn})) * \frac{1}{(R_j + R_{drj}) + (R_m + R_{drm})}}{((R_1 + R_{dr1}) * (R_2 + R_{dr2}) * \dots * (R_n + R_{drn})) * \left(\frac{1}{R_1 + R_{dr1}} + \frac{1}{R_2 + R_{dr2}} + \dots + \frac{1}{R_n + R_{drn}} \right)}$$

Κάθε επιμέρους όρος του αθροίσματος:

$$\sum_{m=1 \text{ και } m \neq j}^n \frac{(V_{dcj} - V_{dcm}) * ((R_1 + R_{dr1}) * (R_2 + R_{dr2}) * \dots * (R_n + R_{drn})) * \frac{1}{(R_j + R_{drj}) + (R_m + R_{drm})}}{((R_1 + R_{dr1}) * (R_2 + R_{dr2}) * \dots * (R_n + R_{drn})) * \left(\frac{1}{R_1 + R_{dr1}} + \frac{1}{R_2 + R_{dr2}} + \dots + \frac{1}{R_n + R_{drn}} \right)}$$

δίνει το κυκλοφορούν ρεύμα μεταξύ της πηγής V_{dcj} και της πηγής V_{dcm} .

Κάθε επιμέρους όρος του αθροίσματος:

$$\sum_{m=1 \text{ και } m \neq j}^n \frac{(V_{dcj} - V_{dcm}) * ((R_1 + R_{dr1}) * (R_2 + R_{dr2}) * \dots * (R_n + R_{drn})) * \frac{1}{(R_j + R_{drj}) + (R_m + R_{drm})}}{((R_1 + R_{dr1}) * (R_2 + R_{dr2}) * \dots * (R_n + R_{drn})) * \left(\frac{1}{R_1 + R_{dr1}} + \frac{1}{R_2 + R_{dr2}} + \dots + \frac{1}{R_n + R_{drn}} \right)}$$

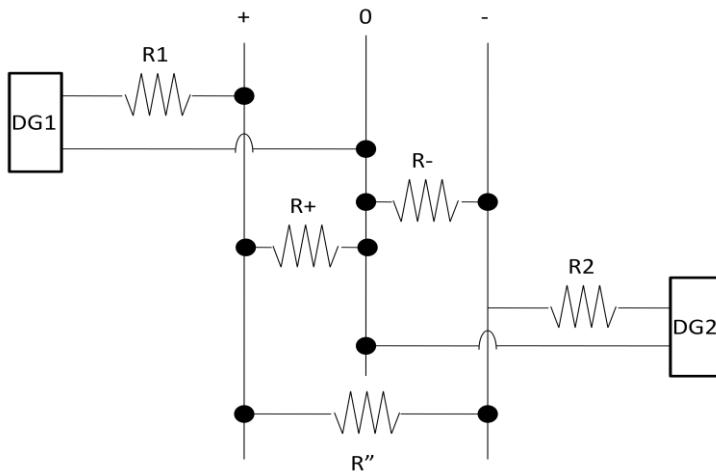
δίνει το κυκλοφορούν ρεύμα μεταξύ της πηγής V_{dcj} και της πηγής V_{dcm} .

Στη συνέχεια, για να βρούμε τις αντιστάσεις Droop που πρέπει να τοποθετηθούν στο κύκλωμα, εργαζόμαστε με τον ίδιο τρόπο που εργαστήκαμε στην τοπολογία σύνδεσης n πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (n terminal DC unipolar connection).

3.3 – Διπολικές (Bipolar) συνδεσμολογίες

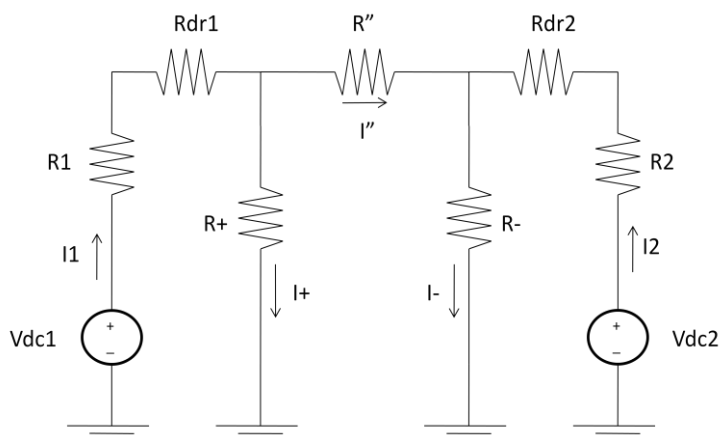
3.3.1- Σύνδεση δύο πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου (DC bipolar connection)

Η συνδεσμολογία που εξετάζουμε εδώ είναι αυτή του παρακάτω σχήματος:



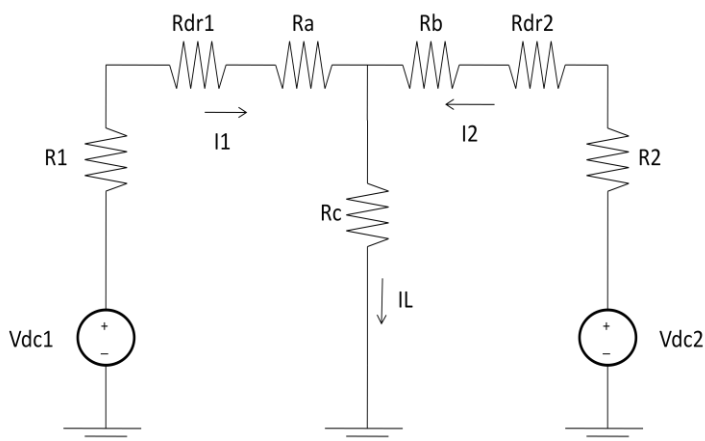
Σχήμα (3.7)- Τοπολογία σύνδεσης δύο πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου (DC bipolar connection).

Το ισοδύναμο κύκλωμα αυτής της συνδεσμολογίας είναι το εξής:



Σχήμα (3.8)-Ισοδύναμο κύκλωμα τοπολογίας σύνδεσης δύο πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου (DC bipolar connection) με εφαρμογή ελέγχου Droop.

Αρχικά, μετατρέπουμε το τρίγωνο των αντιστάσεων R'' , R^+ , R^- σε αστέρα. Το νέο ισοδύναμο κύκλωμα είναι το παρακάτω:



Σχήμα (3.9)-Ισοδύναμο κύκλωμα τοπολογίας σύνδεσης δύο πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου (DC bipolar connection) μετά τον μετασχηματισμό του τριγώνου σε αστέρα, με εφαρμογή ελέγχου Droop.

Οι σχέσεις που συνδέουν τις νέες αντιστάσεις R_a , R_b , R_c , με τις αντιστάσεις R'' , R^+ , R^- είναι οι εξής:

$$R_a = \frac{R'' * R^+}{R'' + R^+ + R^-}$$

$$R_b = \frac{R'' * R^-}{R'' + R^+ + R^-}$$

$$R_c = \frac{R^+ * R^-}{R'' + R^+ + R^-}$$

Ο δείκτης DI δίνεται από τη σχέση:

$$DI = \frac{1}{2} * (|I_c| * N_i + P_{loss} * N_p)$$

Όπου,

I_c : το κυκλοφορούν ρεύμα του δικτύου

P_{loss} : οι απώλειες γραμμών του δικτύου

N_i : συντελεστής κανονικοποίησης των κυκλοφορούντων ρευμάτων

N_p : συντελεστής κανονικοποίησης των απωλειών των γραμμών

Με βάση τις εξισώσεις των ρευμάτων που προέκυψαν από την θεωρητική ανάλυση της τοπολογίας στο προηγούμενο κεφάλαιο, το κυκλοφορούν ρεύμα του δικτύου δίνεται από τη σχέση:

$$I_{c12} = - \frac{R_c * (V_{dc1} + V_{dc2})}{(R_1 + R_{dr1}) * (R_b + R_c) + (R_2 + R_{dr2}) * (R_a + R_c) + R_a * R_b + R_a * R_c + R_b * R_c}$$

Οι απώλειες γραμμών P_{loss} δίνονται απ'την σχέση:

$$P_{loss} = I_1^2 * (R_1 + R_{dr1}) + I_2^2 * (R_2 + R_{dr2})$$

Όπου,

$$I_1 = \frac{V_{dc1} * (R_2 + R_b) + 2 * V_{dc1} * R_c - R_c * (V_{dc1} + V_{dc2})}{(R_1 + R_{dr1}) * (R_b + R_c) + (R_2 + R_{dr2}) * (R_a + R_c) + R_a * R_b + R_a * R_c + R_b * R_c}$$

$$I_2 = \frac{V_{dc2} * (R_1 + R_a) + 2 * V_{dc2} * R_c - R_c * (V_{dc2} + V_{dc1})}{(R_1 + R_{dr1}) * (R_b + R_c) + (R_2 + R_{dr2}) * (R_a + R_c) + R_a * R_b + R_a * R_c + R_b * R_c}$$

Η κανονικοποίηση των κυκλοφορούντων ρευμάτων και των απωλειών των γραμμών του δικτύου, γίνονται με βάση τις μέγιστες τιμές τους. Δηλαδή για τους δύο συντελεστές ισχύει:

$$N_i = \frac{1}{|I_{cmax}|}$$

$$N_p = \frac{1}{P_{lossmax}}$$

Επομένως το DI δίνεται απ'τη σχέση:

$$DI = \frac{1}{2} * \left\{ \left| - \frac{R_c * (V_{dc1} + V_{dc2})}{(R_1 + R_{dr1}) * (R_b + R_c) + (R_2 + R_{dr2}) * (R_a + R_c) + R_a * R_b + R_a * R_c + R_b * R_c} \right| * N_i + \right. \\ \left. \left[\left(\frac{V_{dc1} * (R_2 + R_b) + 2 * V_{dc1} * R_c - R_c * (V_{dc1} + V_{dc2})}{(R_1 + R_{dr1}) * (R_b + R_c) + (R_2 + R_{dr2}) * (R_a + R_c) + R_a * R_b + R_a * R_c + R_b * R_c} \right)^2 * (R_1 + R_{dr1}) + \right. \right. \\ \left. \left. \left(\frac{V_{dc2} * (R_1 + R_a) + 2 * V_{dc2} * R_c - R_c * (V_{dc2} + V_{dc1})}{(R_1 + R_{dr1}) * (R_b + R_c) + (R_2 + R_{dr2}) * (R_a + R_c) + R_a * R_b + R_a * R_c + R_b * R_c} \right)^2 * (R_2 + R_{dr2}) \right] * N_p \right\}$$

Έχοντας κάνει τη θεωρητική ανάλυση της τοπολογίας, είδαμε ότι η συνθήκη που πρέπει να ικανοποιείται προκειμένου να μην υπάρχουν κυκλοφορούντα ρεύματα είναι η εξής:

$$V_{dc1} = -V_{dc2} \Leftrightarrow V_{dc1} + V_{dc2} = 0$$

Εφαρμόζοντας την αρχή της επαλληλίας στο κύκλωμα του σχήματος (3.9), προκύπτουν μέσω του Νόμου Τάσεων Kirchhoff (N.T.K.) οι εξής σχέσεις:

$$V_{dc1} = I_1 * R_1 + I_1 * R_{dr1} + I_1 * R_a + I_L * R_c$$

$$V_{dc2} = I_2 * R_2 + I_2 * R_{dr2} + I_2 * R_b + I_L * R_c$$

$$\text{Από Νόμο Ρευμάτων Kirchhoff (N.P.K.) έχω: } I_1 + I_2 = I_L$$

Αντικαθιστώντας στην παραπάνω συνθήκη, προκύπτει ότι:

$$I_1 * R_1 + I_1 * R_{dr1} + I_1 * R_a + I_L * R_c + I_2 * R_2 + I_2 * R_{dr2} + I_2 * R_b + I_L * R_c = 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow I_1 * (R_1 + R_{dr1}) = -I_1 * R_a - 2 * I_1 * R_c - I_2 * (R_2 + R_{dr2}) - I_2 * R_b - 2 * I_2 * R_c \Rightarrow \\ \Rightarrow (R_1 + R_{dr1}) = -R_a - 2 * R_c + y * (R_2 + R_{dr2}) + y * R_b + 2 * y * R_c \Rightarrow \\ \Rightarrow (R_1 + R_{dr1}) = y * [(R_2 + R_{dr2}) + R_b + 2 * R_c] - R_a - 2 * R_c$$

Όπου,

$$y = -\frac{I_2}{I_1} = \frac{(R_2 + R_{dr2} + R_b + 2 * R_c)}{(R_1 + R_{dr1} + R_a + 2 * R_c)}$$

Επειδή γενικότερα οι αντιστάσεις των γραμμών R_1 , R_2 είναι αρκετά μικρότερες των αντιστάσεων Dropout R_{dr1} , R_{dr2} , που προστίθενται στο κύκλωμα, ισχύει ότι:

$$R_{dr1} = y * (R_{dr2} + R_b + 2 * R_c) - R_a - 2 * R_c$$

$$y = \frac{(R_{dr1} + R_a + 2 * R_c)}{(R_{dr2} + R_b + 2 * R_c)}$$

Αντίστοιχα με την μονοπολική τοπολογία σύνδεσης 2 πηγών, όπου προκειμένου να εξασφαλίσουμε τον διαμοιρασμό του φορτίο έχουμε:

$$y = \frac{R_{dr1}}{R_{dr2}} = \frac{R_1}{R_2}$$

Έτσι κι εδώ για τον ίδιο λόγο έχουμε:

$$y = \frac{(R_{dr1} + R_a + 2 * R_c)}{(R_{dr2} + R_b + 2 * R_c)} = \frac{(R_1 + R_a + 2 * R_c)}{(R_2 + R_b + 2 * R_c)}$$

Ακόμη ορίζουμε τα παρακάτω μεγέθη:

$$m = R_2 + R_{dr2}$$

$$x = \frac{V_{dc1}}{V_{dc2}} \Rightarrow V_{dc1} = x * V_{dc2}$$

Τώρα, το DI παίρνει την εξής μορφή:

$$DI = \frac{1}{2} * \left\{ \left| - \frac{R_c * (x * V_{dc2} + V_{dc2})}{[y * (m + R_b + 2 * R_c) - R_a - 2 * R_c] * (R_b + R_c) + m * (R_a + R_c) + R_a * R_b + R_a * R_c + R_b * R_c} \right| * N_i + \left[\left(\frac{x * V_{dc2} * (R_2 + R_b) + 2 * x * V_{dc2} * R_c - R_c * (x * V_{dc2} + V_{dc2})}{[y * (m + R_b + 2 * R_c) - R_a - 2 * R_c] * (R_b + R_c) + m * (R_a + R_c) + R_a * R_b + R_a * R_c + R_b * R_c} \right)^2 * [y * (m + R_b + 2 * R_c) - R_a - 2 * R_c] + \left(\frac{V_{dc2} * (R_1 + R_a) + 2 * V_{dc2} * R_c - R_c * (V_{dc2} + x * V_{dc2})}{[y * (m + R_b + 2 * R_c) - R_a - 2 * R_c] * (R_b + R_c) + m * (R_a + R_c) + R_a * R_b + R_a * R_c + R_b * R_c} \right)^2 * m \right] * N_p \right\}$$

Για τον προσδιορισμό των $|I_{cmax}|$ και $P_{lossmax}$, χρησιμοποιώ τις σχέσεις:

$$|I_c| = \left| - \frac{R_c * (x * V_{dc2} + V_{dc2})}{[y * (m + R_b + 2 * R_c) - R_a - 2 * R_c] * (R_b + R_c) + m * (R_a + R_c) + R_a * R_b + R_a * R_c + R_b * R_c} \right|$$

$$P_{loss} = \left(\frac{x * V_{dc2} * (R_2 + R_b) + 2 * x * V_{dc2} * R_c - R_c * (x * V_{dc2} + V_{dc2})}{[y * (m + R_b + 2 * R_c) - R_a - 2 * R_c] * (R_b + R_c) + m * (R_a + R_c) + R_a * R_b + R_a * R_c + R_b * R_c} \right)^2 * [y * (m + R_b + 2 * R_c) - R_a - 2 * R_c] + \left(\frac{V_{dc2} * (R_1 + R_a) + 2 * V_{dc2} * R_c - R_c * (V_{dc2} + x * V_{dc2})}{[y * (m + R_b + 2 * R_c) - R_a - 2 * R_c] * (R_b + R_c) + m * (R_a + R_c) + R_a * R_b + R_a * R_c + R_b * R_c} \right)^2 * m$$

Μεταβάλλοντας την R_{dr2} εντός του επιθυμητού εύρους τιμών, καταλήγουμε σε διαφορετικές τιμές των $|I_c|$ και P_{loss} . Επιλέγουμε τις μεγαλύτερες τιμές των δύο μεγεθών και προσδιορίζουμε τους συντελεστές N_i και N_p .

Στη συνέχεια, με γνωστά τα N_i και N_p , μεταβάλλουμε την αντίσταση Droop R_{dr2} εντός του επιθυμητού εύρους τιμών, καταλήγοντας σε διαφορετικές τιμές του DI. Η τιμή της αντίστασης Droop R_{dr2} , που θα οδηγήσει στο ελάχιστο DI, είναι αυτή που θα προσθέσουμε στο δίκτυο.

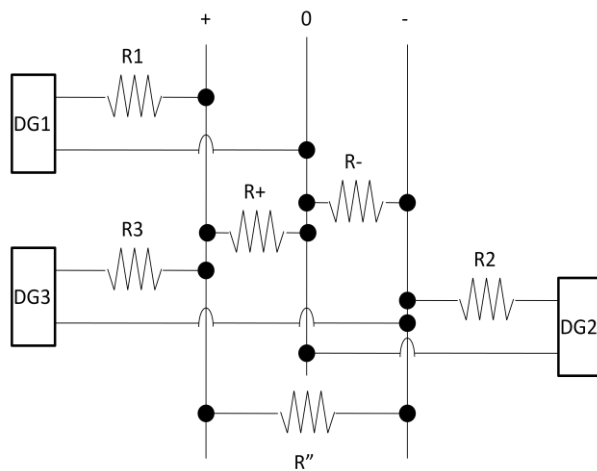
Στη συνέχεια μέσω της σχέσης:

$$y = \frac{(R_{dr2} + R_b + 2 * R_c)}{(R_{dr1} + R_a + 2 * R_c)}$$

Βρίσκουμε την τιμή της αντίστασης Droop R_{dr1} . Έτσι έχουμε τις τιμές των αντιστάσεων Droop που πρέπει να τοποθετηθούν στο κύκλωμα, ώστε να έχω το βέλτιστο συνδυασμό κυκλοφορούντων ρευμάτων και απωλειών των γραμμών.

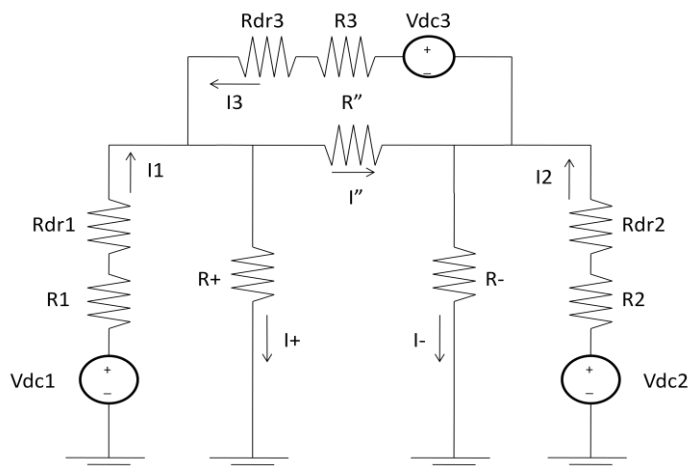
3.3.2- Σύνδεση τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (DC bipolar connection with 1 more voltage source connected between + - poles)

Η συνδεσμολογία που εξετάζουμε εδώ είναι αυτή του παρακάτω σχήματος:



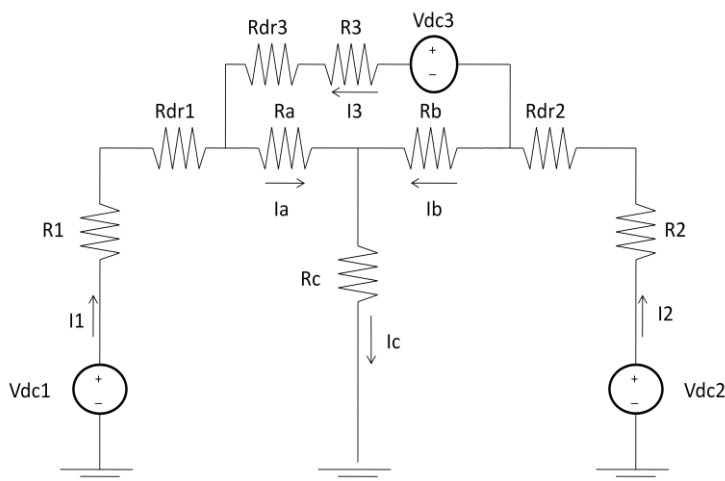
Σχήμα (3.10)- Τοπολογία σύνδεσης τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (DC bipolar connection with 1 more voltage source connected between + - poles).

Το ισοδύναμο κύκλωμα αυτής της συνδεσμολογίας είναι το εξής:



Σχήμα (3.11)- Ισοδύναμο κύκλωμα τοπολογίας σύνδεσης τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (DC bipolar connection with 1 more voltage source connected between + - poles) με εφαρμογή ελέγχου Droop.

Αρχικά, μετατρέπουμε το τρίγωνο των αντιστάσεων R'' , R^+ , R^- σε αστέρα. Το νέο ισοδύναμο κύκλωμα είναι το παρακάτω:



Σχήμα (3.12)- Ισοδύναμο κύκλωμα τοπολογίας σύνδεσης τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (DC bipolar connection with 1 more voltage source connected between + - poles) μετά τον μετασχηματισμό του τριγώνου σε αστέρα, με εφαρμογή ελέγχου Droop.

Οι σχέσεις που συνδέουν τις νέες αντιστάσεις R_a , R_b , R_c , με τις αντιστάσεις R'' , R^+ , R^- είναι οι εξής:

$$R_a = \frac{R'' * R^+}{R'' + R^+ + R^-}$$

$$R_b = \frac{R'' * R^-}{R'' + R^+ + R^-}$$

$$R_c = \frac{R^+ * R^-}{R'' + R^+ + R^-}$$

Λόγω της πολυπλοκότητας των πράξεων, στη συνέχεια, κάνουμε τις εξής παραδοχές:

- 1) Οι αντιστάσεις των γραμμών είναι ίσες μεταξύ τους, $R_1 = R_2 = R_3 = r$
- 2) Οι αντιστάσεις των φορτίων είναι ίσες μεταξύ τους, $R_a = R_b = R_c = R$

Με βάση τις παραδοχές αυτές, η σχέση που συνδέει τις αντιστάσεις φορτίου συνδεδεμένες σε αστέρα, με τις αντίστοιχες σε συνδεσμολογία τριγώνου παίρνει τη μορφή:

$$R'' = R^+ = R^- = 3 * R$$

Από την συνθήκη ύπαρξης κυκλοφορούντων ρευμάτων στην τοπολογία, θα προχωρήσουμε στην εύρεση μιας σχέσης που θα συνδέει μεταξύ τους τις αντιστάσεις Dgroup.

Εφαρμόζοντας την αρχή της επαλληλίας στο κύκλωμα του σχήματος (3.12), προκύπτουν μέσω του Νόμου Τάσεων Kirchhoff (N.T.K.) οι εξής σχέσεις:

$$V_{dc1} = I_1 * r + I_1 * R_{dr1} + I_a * R + I_c * R \quad (1)$$

$$V_{dc2} = I_2 * r + I_2 * R_{dr2} + I_b * R + I_c * R \quad (2)$$

$$V_{dc3} = I_3 * r + I_3 * R_{dr3} + I_a * R - I_b * R \quad (3)$$

Από Νόμο Ρευμάτων Kirchhoff (N.P.K.) έχω:

$$I_a = I_1 + I_3 \quad (4)$$

$$I_b = I_2 - I_3 \quad (5)$$

$$I_c = I_1 + I_2 \quad (6)$$

Από τις σχέσεις (4), (5) και (6) αντικαθιστώ, στις σχέσεις (1), (2) και (3), τα ρεύματα I_a , I_b , I_c . Προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$V_{dc1} = I_1 * (r + R_{dr1} + 2 * R) + I_2 * R + I_3 * R$$

$$V_{dc2} = I_1 * R + I_2 * (r + R_{dr2} + 2 * R) - I_3 * R$$

$$V_{dc3} = I_1 * R - I_2 * R * r + I_3 * (r + R_{dr3} + 2 * R)$$

Για να αποφύγουμε την ύπαρξη κυκλοφορούντων ρευμάτων στο κύκλωμα πρέπει να ισχύει:

$$V_{dc3} + V_{dc2} - V_{dc1} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I_1 * R - I_2 * R * r + I_3 * (r + R_{dr3} + 2 * R) + I_1 * R + I_2 * (r + R_{dr2} + 2 * R) -$$

$$- I_3 * R - I_1 * (r + R_{dr1} + 2 * R) - I_2 * R - I_3 * R = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow -I_1 * (r + R_{dr1}) + I_2 * (r + R_{dr2}) + I_3 * (r + R_{dr3}) = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow (r + R_{dr1}) + y_2 * (r + R_{dr2}) - y_3 * (r + R_{dr3}) = 0 \quad (A)$$

Όπου,

$$y_2 = -\frac{I_2}{I_1}$$

$$y_3 = -\frac{I_3}{I_1}$$

Αν θεωρήσουμε ότι θέλουμε να αντικαταστήσουμε όλες τις αντιστάσεις Droop συναρτήσει μόνο της R_{dr1} , παρατηρούμε ότι από μόνη της η παραπάνω συνθήκη δεν μπορεί να επιτύχει κάτι τέτοιο. Χρειαζόμαστε άλλη μία συνθήκη.

Στην πράξη, κατά την διπολική συνδεσμολογία, επιθυμούμε οι πηγές αντίθετης πολικότητας που συνδέονται σε θετικό-ουδέτερο και αρνητικό-ουδέτερο, να έχουν ίσο κατ' απόλυτη τιμή μέτρο. Ακόμη, όπως είδαμε στην αντίστοιχη διπολική συνδεσμολογία, όπου δεν υπάρχει πηγή μεταξύ θετικού-αρνητικού πόλου, αυτή είναι η συνθήκη για να μην έχουμε κυκλοφορούντα ρεύματα στο κύκλωμα. Επομένως, χρησιμοποιούμε την συνθήκη:

$$V_{dc1} + V_{dc2} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I_1 * (r + R_{dr1} + 2 * R) + I_2 * R + I_3 * R + I_1 * R + I_2 * (r + R_{dr2} + 2 * R) - I_3 * R \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I_1 * (r + R_{dr1} + 3 * R) + I_2 * (r + R_{dr2} + 3 * R) = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow -\frac{I_2}{I_1} = \frac{(r + R_{dr1} + 3 * R)}{(r + R_{dr2} + 3 * R)}$$

Επειδή οι αντιστάσεις $R_{dr1}, R_{dr2} \gg r$, η σχέση παίρνει τη μορφή:

$$-\frac{I_2}{I_1} = \frac{(R_{dr1} + 3 * R)}{(R_{dr2} + 3 * R)}$$

Προκειμένου να επιτύχουμε τον επιθυμητό διαμοιρασμό φορτίου, πρέπει:

$$\frac{(R_{dr1} + 3 * R)}{(R_{dr2} + 3 * R)} = \frac{(r + 3 * R)}{(r + 3 * R)} = 1 \Rightarrow R_{dr1} = R_{dr2} = R_{dr}$$

Ακόμη, παρατηρούμε ότι :

$$-\frac{I_2}{I_1} = y_2 = 1$$

Αντικαθιστώντας στη σχέση (Α) έχουμε:

$$(r + R_{dr}) + (r + R_{dr}) - y_3 * (r + R_{dr3}) = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow y_3 = \frac{2 * (r + R_{dr})}{(r + R_{dr3})}$$

Επειδή οι αντιστάσεις R_{dr} , $R_{dr3} \gg r$, η σχέση παίρνει τη μορφή:

$$y_3 = \frac{2 * R_{dr}}{R_{dr3}}$$

Προκειμένου να επιτύχουμε τον επιθυμητό διαμοιρασμό φορτίου, πρέπει:

$$\frac{2 * R_{dr}}{R_{dr3}} = \frac{2 * r}{r} = 2 \Rightarrow R_{dr3} = R_{dr}$$

Βλέπουμε ότι όλες οι αντιστάσεις D_{roop} , είναι μεταξύ τους ίσες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τόσο οι αντιστάσεις γραμμών, όσο και οι αντιστάσεις φορτίου, είναι μεταξύ τους ίσες.

Με βάση τα παραπάνω, ο δείκτης DI δίνεται από τη σχέση:

$$DI = \frac{1}{2} * (|I_c| * N_i + P_{loss} * N_p)$$

Όπου,

I_c : το κυκλοφορούν ρεύμα του δικτύου

P_{loss} : οι απώλειες γραμμών του δικτύου

N_i : συντελεστής κανονικοποίησης των κυκλοφορούντων ρευμάτων

N_p : συντελεστής κανονικοποίησης των απωλειών των γραμμών

Με βάση τις εξισώσεις των ρευμάτων που προέκυψαν από την θεωρητική ανάλυση της τοπολογίας στο προηγούμενο κεφάλαιο, το κυκλοφορούν ρεύμα του δικτύου δίνεται από τη σχέση:

$$I_c = \frac{R * (V_{dc3} + V_{dc2} - V_{dc1})}{(r + R_{dr}) * (r + R_{dr} + 3 * R)}$$

Οι απώλειες γραμμών P_{loss} δίνονται απ'την σχέση:

$$P_{loss} = I_1^2 * (r + R_{dr}) + I_2^2 * (r + R_{dr}) + I_3^2 * (r + R_{dr})$$

Όπου,

$$I_1 = \frac{V_{dc1}}{(r + R_{dr} + 3 * R)} - \frac{R * (V_{dc3} + V_{dc2} - V_{dc1})}{(r + R_{dr}) * (r + R_{dr} + 3 * R)}$$

$$I_2 = \frac{V_{dc2}}{(r + R_{dr} + 3 * R)} + \frac{R * (V_{dc3} + V_{dc2} - V_{dc1})}{(r + R_{dr}) * (r + R_{dr} + 3 * R)}$$

$$I_3 = \frac{V_{dc3}}{(r + R_{dr} + 3 * R)} + \frac{R * (V_{dc3} + V_{dc2} - V_{dc1})}{(r + R_{dr}) * (r + R_{dr} + 3 * R)}$$

Η κανονικοποίηση των κυκλοφορούντων ρευμάτων και των απωλειών των γραμμών του δικτύου, γίνονται με βάση τις μέγιστες τιμές τους. Δηλαδή για τους δύο συντελεστές ισχύει:

$$N_i = \frac{1}{|I_{cmax}|}$$

$$N_p = \frac{1}{P_{lossmax}}$$

Ακόμη ορίζουμε τα παρακάτω μεγέθη:

$$m = r + R_{dr}$$

$$x_1 = \frac{V_{dc1}}{V_{dc2}} \Rightarrow V_{dc1} = x_1 * V_{dc2}$$

$$x_3 = \frac{V_{dc3}}{V_{dc2}} \Rightarrow V_{dc3} = x_3 * V_{dc2}$$

Έτσι, η εξίσωση για τον δείκτη DI παίρνει τη μορφή:

$$\begin{aligned} DI = & \frac{1}{2} * \left\{ \left| \frac{R * (x_3 * V_{dc2} + V_{dc2} - x_1 * V_{dc2})}{m * (m + 3 * R)} \right| * N_i + \right. \\ & + \left[\left(\frac{x_1 * V_{dc2}}{(m + 3 * R)} - \frac{R * (x_3 * V_{dc2} + V_{dc2} - x_1 * V_{dc2})}{m * (m + 3 * R)} \right)^2 * m + \right. \\ & + \left(\frac{V_{dc2}}{(m + 3 * R)} + \frac{R * (x_3 * V_{dc2} + V_{dc2} - x_1 * V_{dc2})}{m * (m + 3 * R)} \right)^2 * m + \\ & \left. \left. + \left(\frac{x_3 * V_{dc2}}{(m + 3 * R)} + \frac{R * (x_3 * V_{dc2} + V_{dc2} - x_1 * V_{dc2})}{m * (m + 3 * R)} \right)^2 * m \right] * N_p \right\} \end{aligned}$$

Για τον προσδιορισμό των $|I_{cmax}|$ και $P_{lossmax}$, χρησιμοποιώ τις σχέσεις:

$$|I_c| = \left| \frac{R * (x_3 * V_{dc2} + V_{dc2} - x_1 * V_{dc2})}{m * (m + 3 * R)} \right|$$

$$\begin{aligned} P_{loss} = & \left(\frac{x_1 * V_{dc2}}{(m + 3 * R)} - \frac{R * (x_3 * V_{dc2} + V_{dc2} - x_1 * V_{dc2})}{m * (m + 3 * R)} \right)^2 * m + \\ & + \left(\frac{V_{dc2}}{(m + 3 * R)} + \frac{R * (x_3 * V_{dc2} + V_{dc2} - x_1 * V_{dc2})}{m * (m + 3 * R)} \right)^2 * m + \\ & + \left(\frac{x_3 * V_{dc2}}{(m + 3 * R)} + \frac{R * (x_3 * V_{dc2} + V_{dc2} - x_1 * V_{dc2})}{m * (m + 3 * R)} \right)^2 * m \end{aligned}$$

Μεταβάλλοντας την R_{dr} εντός του επιθυμητού εύρους τιμών, καταλήγουμε σε διαφορετικές τιμές των $|I_c|$ και P_{loss} . Επιλέγουμε τις μεγαλύτερες τιμές των δύο μεγεθών και προσδιορίζουμε τους συντελεστές N_i και N_p .

Στη συνέχεια, με γνωστά τα N_i και N_p , μεταβάλλουμε την αντίσταση Droop R_{dr} εντός του επιθυμητού εύρους τιμών, καταλήγοντας σε διαφορετικές τιμές του DI. Η τιμή της αντίστασης Droop R_{dr} , που θα οδηγήσει στο ελάχιστο DI, είναι αυτή που θα προσθέσουμε στο δίκτυο.

Υπενθυμίζουμε ότι:

$$R_{dr1} = R_{dr2} = R_{dr3} = R_{dr}$$

3.4- Συμπεράσματα

Όπως προαναφέραμε, ο έλεγχος Droop βασίζεται στον διαμοιρασμό του φορτίου. Το γεγονός αυτό γίνεται εμφανές μέσω των σχέσεων μεταξύ των λόγων των αντιστάσεων γραμμών και των αντιστάσεων Droop. Χωρίς αυτές τις σχέσεις, οι οποίες προκύπτουν από το γεγονός ότι θέλουμε το φορτίο να μοιράζεται όσο το δυνατόν πιο ίσα μεταξύ των πηγών, ο υπολογισμός των διαφόρων συντελεστών γ δεν θα ήταν δυνατός. Έτσι, η εύρεση σχέσεων που θα συνέδεαν τις διάφορες αντιστάσεις Droop, θα ήταν πολύ πιο πολύπλοκη.

Ακόμη, παρατηρούμε ότι σε όλες τις τοπολογίες που εξετάσαμε, η εφαρμογή του ελέγχου Droop, βασίζεται και στην συνθήκη που πρέπει να ικανοποιείται ώστε να μην έχουμε κυκλοφορούντα ρεύματα. Αν και αυτό δεν αντικατοπτρίζεται άμεσα στην εξίσωση του DI, η συνθήκη αυτή μας δίνει τις σχέσεις μεταξύ των αντιστάσεων Droop και των συντελεστών γ με αποτέλεσμα η επίλυση του προβλήματος να γίνεται ευκολότερη και γρηγορότερη.

Βλέπουμε δηλαδή, ότι οι συντελεστές γ που είναι πολύ σημαντικοί στην εφαρμογή του ελέγχου Droop, προσδιορίζονται μέσω εξισώσεων που προκύπτουν από συνθήκες για τον σωστό διαμοιρασμό του φορτίου και συνδέονται με τις αντιστάσεις Droop, μέσω εξισώσεων που προκύπτουν από συνθήκες για την καταστολή των κυκλοφορούντων ρευμάτων. Κατ' αυτόν τον τρόπο, γίνεται εμφανές ότι ο έλεγχος Droop επιτυγχάνει τόσο την καταστολή των κυκλοφορούντων ρευμάτων, όσο και τον σωστό διαμοιρασμό του φορτίου.

Κεφάλαιο 4

Παρουσίαση των θεωρητικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης

Σε αυτό το κεφάλαιο συγκρίνονται τα αποτελέσματα της θεωρητικής ανάλυσης κάθε τοπολογίας για συγκεκριμένα μεγέθη τάσεων, αντιστάσεων γραμμών και φορτίων με αυτά που προκύπτουν από την προσομοίωση κάθε τοπολογίας με τη χρήση των προγραμμάτων Matlab και Matlab Simulink πριν την εφαρμογή του ελέγχου Droop (Droop Control). Ακόμη, με τη βοήθεια αυτών των προγραμμάτων εφαρμόζεται ο έλεγχος Droop σε όλες τις τοπολογίες που εξετάζονται με σκοπό τον έλεγχο της ορθότητάς του και της αποτελεσματικότητάς του στην αντιμετώπιση του φαινομένου των κυκλοφορούντων ρευμάτων.

4.1 - Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται και συγκρίνονται μεταξύ τους τα αποτελέσματα που προκύπτουν απ' τις θεωρητικές σχέσεις που είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των κυκλωμάτων. Σκοπός μας είναι αρχικά η επαλήθευση των θεωρητικών σχέσεων που αφορούν τα ρεύματα κάθε τοπολογίας, μέσω της προσομοίωσης, η ανάδειξη του προβλήματος των κυκλοφορούντων ρευμάτων σε κάθε τοπολογία και η επίλυση αυτού με τη μέθοδο Droop Index, όπως αυτή εφαρμόζεται σε κάθε τοπολογία.

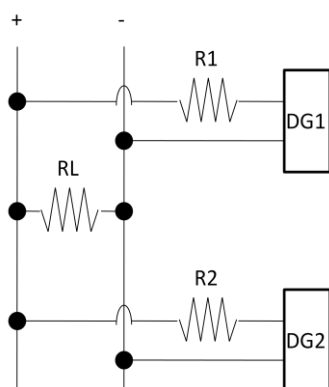
Απ' τα διάφορα επίπεδα τάσης που δίνονται για την λειτουργία των Low Voltage DC μικροδικτύων (LVDC mg) επιλέξαμε ως τάση τροφοδοσίας του φορτίου τα $\pm 326V/652V$. Η τιμή των $326V$ επιλέχθηκε διότι αντιστοιχεί στην μέγιστη τιμή V_{max} της τάσης με ενεργό τιμή $V_{rms} = 230V$. Όλες οι ηλεκτρικές συσκευές που περιέχουν ανορθωτές και τροφοδοτούνται από εναλλασσόμενη τάση με τάση ενεργού τιμής $V_{rms} = 230V$, μπορούν να συνδεθούν σε συνεχή τάση $V_{dc} = 326V$ αν αφαιρεθούν οι διατάξεις των ανορθωτών.

Σημειώνουμε ότι για την προσομοίωση των κυκλωμάτων χρησιμοποιήσαμε το Matlab Simulink.

4.2 – Μονοπολικές (Unipolar) συνδεσμολογίες

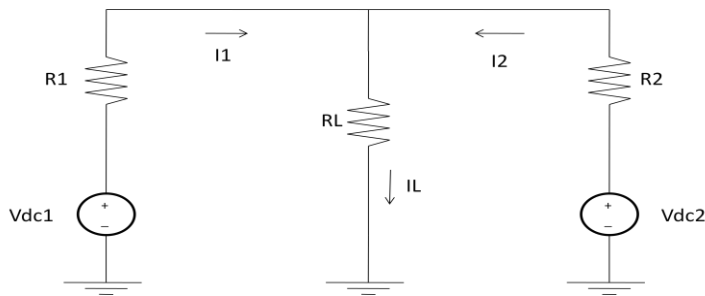
4.2.1 – Σύνδεση δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Two terminal DC unipolar connection)

Η συνδεσμολογία που εξετάζουμε εδώ είναι αυτή του παρακάτω σχήματος:



Σχήμα (4.1)- Τοπολογία σύνδεσης δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Two terminal DC unipolar connection).

Το ισοδύναμο κύκλωμα αυτής της συνδεσμολογίας είναι το εξής:



Σχήμα (4.2)-Ισοδύναμο κύκλωμα της τοπολογίας σύνδεσης δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Two terminal DC unipolar connection).

Αρχικά, παρουσιάζεται η περίπτωση 1 κατά την οποία $V_{dc1} = V_{dc2}$ και στη συνέχεια η περίπτωση 2 κατά την οποία $V_{dc1} \neq V_{dc2}$. Αυτό γίνεται για να γίνει εμφανές το γεγονός ότι η ύπαρξη των κυκλοφορούντων ρευμάτων οφείλεται στη διαφορά μεταξύ των διαφόρων τάσεων που τροφοδοτούν το φορτίο. Ακόμη, έχοντας τα αποτελέσματα και για τις δύο περιπτώσεις, μπορούμε να συγκρίνουμε τις εκάστοτε τιμές των ρευμάτων των γραμμών και του φορτίου, και να διαπιστώσουμε την επιβάρυνση στον διαμοιρασμό του φορτίου των πηγών, που προκαλούν τα κυκλοφορούντα ρεύματα.

4.2.1.1 – Περίπτωση 1^η: $V_{dc1} = V_{dc2}$

Τα μεγέθη που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση του κυκλώματος δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

V_{out}	326 V
V_1	326 V
V_2	326 V
P_L	1006,16 W
R_L	105,625 Ω
R_1	1,4 Ω
R_2	0,8 Ω

Εφαρμόζοντας τους τύπους των ρευμάτων που προέκυψαν απ'την ανάλυση της συγκεκριμένης τοπολογίας, προκύπτουν για τα ρεύματα οι εξής τιμές:

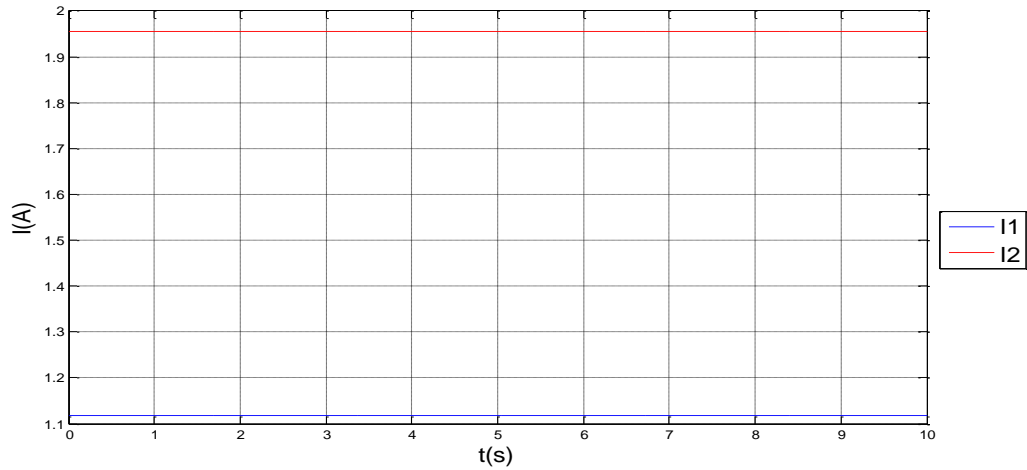
$$I_1 = 1,122A$$

$$I_2 = 1,964A$$

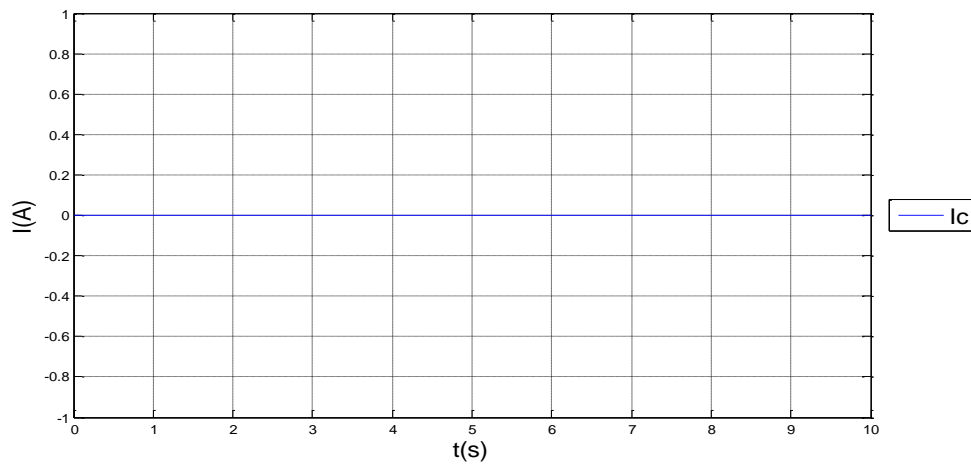
$$I_{c12} = 0A$$

$$|I_1 - I_2| = 0,842A$$

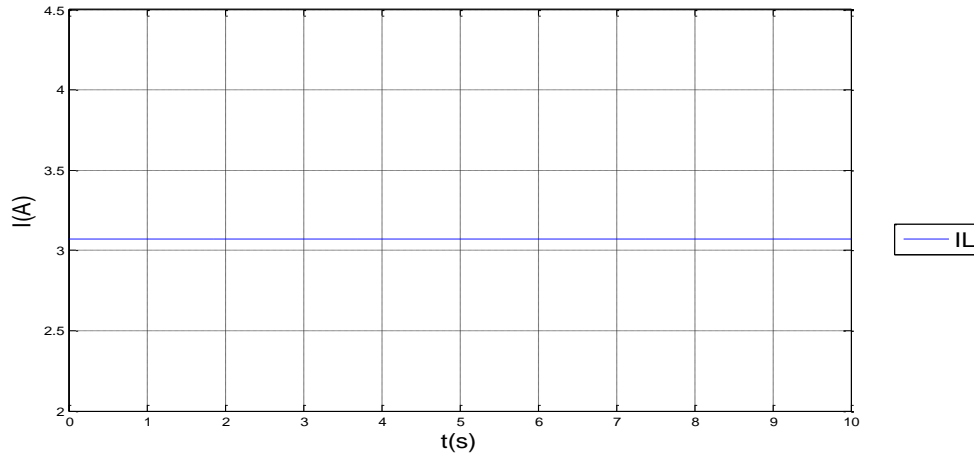
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δίνονται παρακάτω:



Σχήμα (4.3)- Ρεύματα I_1, I_2 της τοπολογίας σύνδεσης δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Two terminal DC unipolar connection) με $V_{dc1} = V_{dc2}$.



Σχήμα (4.4)- Κυκλοφορούν ρεύμα I_c της τοπολογίας σύνδεσης δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Two terminal DC unipolar connection) με $V_{dc1} = V_{dc2}$.



Σχήμα (4.5)- Ρεύμα φορτίου I_L της τοπολογίας σύνδεσης δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Two terminal DC unipolar connection) με $V_{dc1} = V_{dc2}$.

Αρχικά, αυτό που παρατηρούμε είναι ότι οι τιμές των ρευμάτων που υπολογίσαμε, μέσω των θεωρητικών σχέσεων, είναι πολύ κοντά σε αυτές που προκύπτουν απ'την προσομοίωση. Η πολύ μικρή διαφορά οφείλεται στην απλοποίηση που κάναμε στους τύπους των ρευμάτων κατά τη μοντελοποίηση του κυκλώματος.

Όπως βλέπουμε στο σχήμα (4.4), λόγω της ισορροπίας των τάσεων V_{dc1} και V_{dc2} στο κύκλωμα δεν υπάρχουν κυκλοφορούντα ρεύματα.

Παρ'όλ' αυτά, παρατηρούμε στο σχήμα (4.3) ότι υπάρχει διαφορά μεταξύ των ρευμάτων γραμμών I_1, I_2 . Η διαφορά αυτή οφείλεται στη διαφορά μεταξύ των αντιστάσεων γραμμών R_1, R_2 .

4.2.1.2 – Περίπτωση 2^η: $V_{dc1} \neq V_{dc2}$

Τα μεγέθη που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση του κυκλώματος, λαμβάνοντας υπ'όψην το όριο του $\pm 5\%$ στη μεταβολή της τάσης εξόδου, δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

V_{out}	326 V
V_1	335 V
V_2	310 V
P_L	1006,16 W
R_L	105,625 Ω
R_1	1,4 Ω
R_2	0,8 Ω

Εφαρμόζοντας τους τύπους των ρευμάτων που προέκυψαν απ'την ανάλυση της συγκεκριμένης τοπολογίας, προκύπτουν για τα ρεύματα οι εξής τιμές:

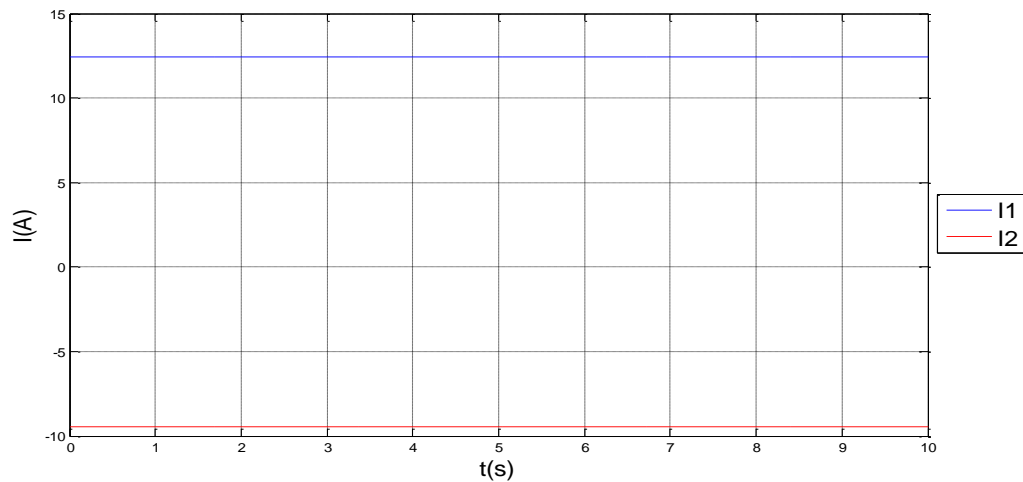
$$I_1 = 12,514A$$

$$I_2 = -9,496A$$

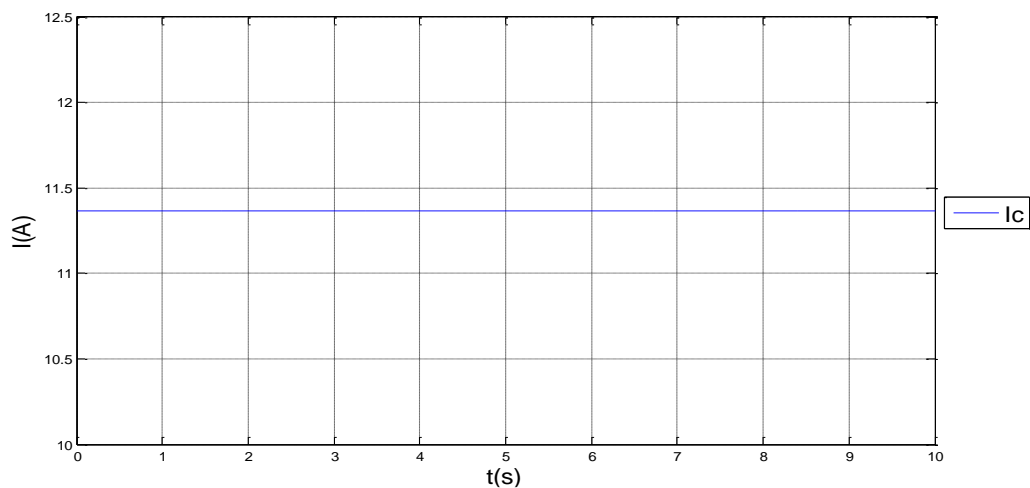
$$I_{c12} = 11,364A$$

$$|I_1 - I_2| = 22,010A$$

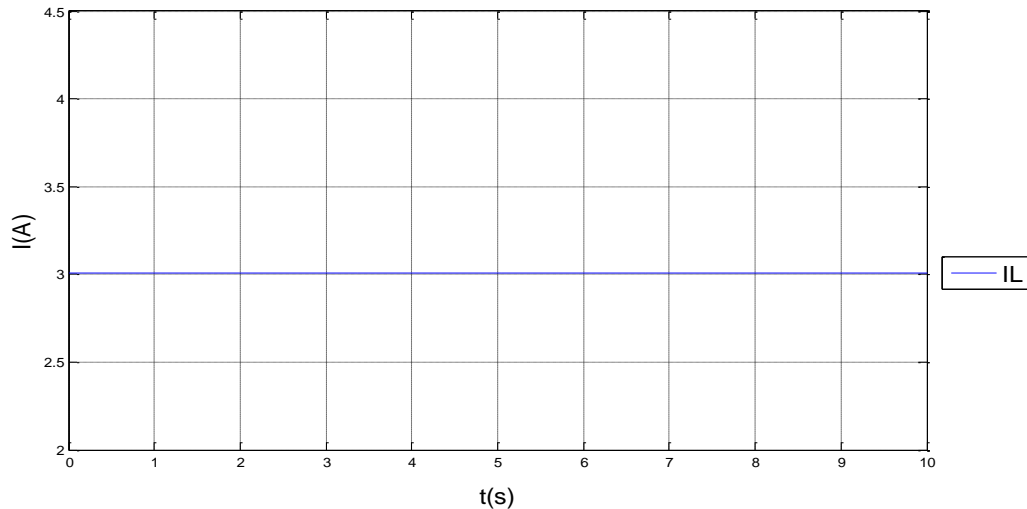
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δίνονται παρακάτω:



Σχήμα (4.6)- Ρεύματα I_1, I_2 της τοπολογίας σύνδεσης δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Two terminal DC unipolar connection) με $V_{dc1} \neq V_{dc2}$.



Σχήμα (4.7)-Κυκλοφορούν ρεύμα I_c της τοπολογίας σύνδεσης δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Two terminal DC unipolar connection) με $V_{dc1} \neq V_{dc2}$.



Σχήμα (4.8)- Ρεύμα φορτίου I_L της τοπολογίας σύνδεσης δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Two terminal DC unipolar connection) με $V_{dc1} \neq V_{dc2}$.

Αρχικά, αυτό που παρατηρούμε είναι ότι οι τιμές των ρευμάτων που υπολογίσαμε, μέσω των θεωρητικών σχέσεων, είναι πολύ κοντά σε αυτές που προκύπτουν απ'την προσομοίωση. Η πολύ μικρή διαφορά οφείλεται στην απλοποίηση που κάναμε στους τύπους των ρευμάτων κατά τη μοντελοποίηση του κυκλώματος.

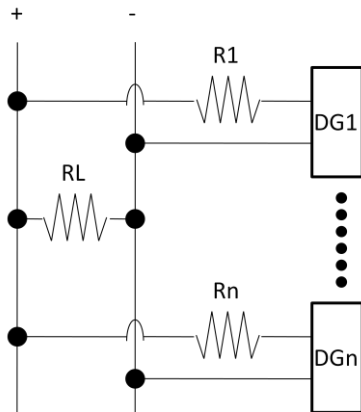
Παρατηρούμε ακόμη ότι, όπως ήταν αναμενόμενο, η ανισορροπία μεταξύ των τάσεων V_{dc1} και V_{dc2} δημιούργησε κυκλοφορούντα ρεύματα στο κύκλωμα, όπως φαίνεται στο σχήμα (4.7). Λαμβάνοντας υπ'όψη ότι στο συγκεκριμένο παράδειγμα επιλέξαμε $V_{dc1} > V_{dc2}$, βλέπουμε ότι $I_{c12} > 0$.

Ακόμη παρατηρούμε ότι από τα $13,849A$ που κυκλοφορούν στη γραμμή 1, μόνο τα $I_L = 3,066A$ αντιστοιχούν στο φορτίο, ενώ τα υπόλοιπα κυκλοφορούν στη γραμμή 2 με αποτέλεσμα το ρεύμα I_2 να παίρνει αρνητική τιμή $I_2 = -7,955A$.

Τέλος, βλέπουμε ότι η ύπαρξη κυκλοφορούντων ρευμάτων, έχει ως αποτέλεσμα την χειροτέρευση του διαμοιρασμού φορτίου (current sharing) μεταξύ των δύο γραμμών, καθώς $|I_1 - I_2| = 23,345A$. Η μεγάλη διαφορά μεταξύ των ρευμάτων γραμμών φαίνεται και απ'το σχήμα (4.6).

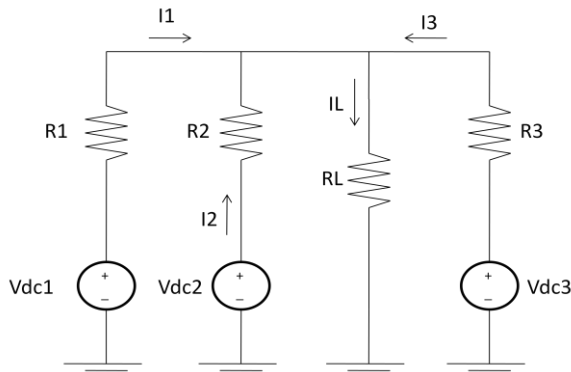
4.2.2 – Σύνδεση n πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (n terminal DC unipolar connection)

Η συνδεσμολογία που εξετάζουμε εδώ, είναι ουσιαστικά μια γενίκευση της τοπολογίας «two terminal DC unipolar connection» για n πηγές και φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα (4.9)- Τοπολογία σύνδεσης n πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Two terminal DC unipolar connection).

Προσομοιώσαμε τη συνδεσμολογία για $n=3$. Επομένως το αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμα είναι το παρακάτω:



Σχήμα (4.10)-Ισοδύναμο κύκλωμα της τοπολογίας σύνδεσης τριών πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Three terminal DC unipolar connection).

Αρχικά, παρουσιάζεται η περίπτωση 1 κατά την οποία $V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc3}$ και στη συνέχεια η περίπτωση 2 κατά την οποία $V_{dc1} \neq V_{dc2} \neq V_{dc3}$. Αυτό γίνεται για να γίνει εμφανές το γεγονός ότι η ύπαρξη των κυκλοφορούντων ρευμάτων οφείλεται στη διαφορά μεταξύ των διαφόρων τάσεων που τροφοδοτούν το φορτίο. Ακόμη, έχοντας τα αποτελέσματα και για τις δύο περιπτώσεις, μπορούμε να συγκρίνουμε τις εκάστοτε τιμές των ρευμάτων των γραμμών και του φορτίου, και να διαπιστώσουμε την επιβάρυνση στον διαμοιρασμό του φορτίου των πηγών, που προκαλούν τα κυκλοφορούντα ρεύματα.

4.2.2.1 – Περίπτωση 2^η: $V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc3}$

Τα μεγέθη που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση του κυκλώματος, δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

V_{out}	326 V
V_1	326 V
V_2	326 V
V_3	326 V
P_L	1006,16 W
R_L	105,625 Ω
R_1	1,1 Ω
R_2	0,7 Ω
R_3	1,2 Ω

Εφαρμόζοντας τους τύπους των ρευμάτων που προέκυψαν απ'την ανάλυση της συγκεκριμένης τοπολογίας, προκύπτουν για τα ρεύματα οι εξής τιμές:

$$I_1 = 0,885A$$

$$I_2 = 1,390A$$

$$I_3 = 0,811A$$

$$I_{c1} = 0A$$

$$I_{c2} = 0A$$

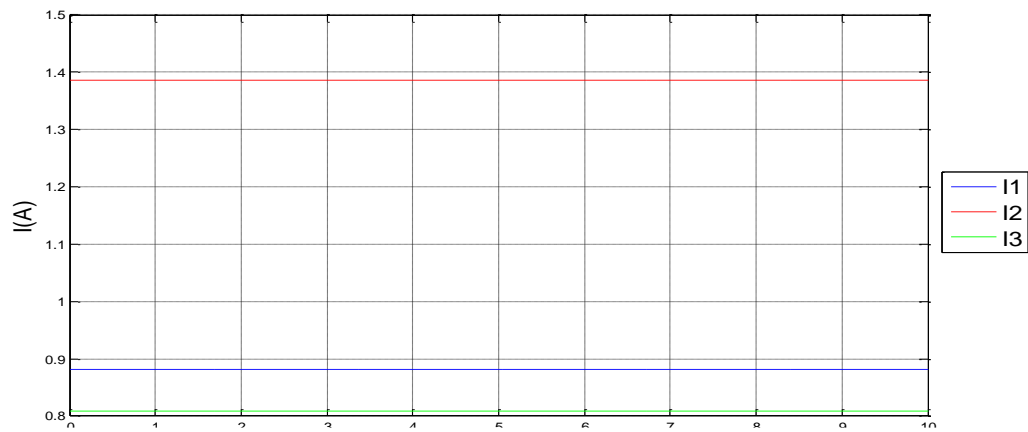
$$I_{c3} = 0A$$

$$|I_1 - I_2| = 0,505A$$

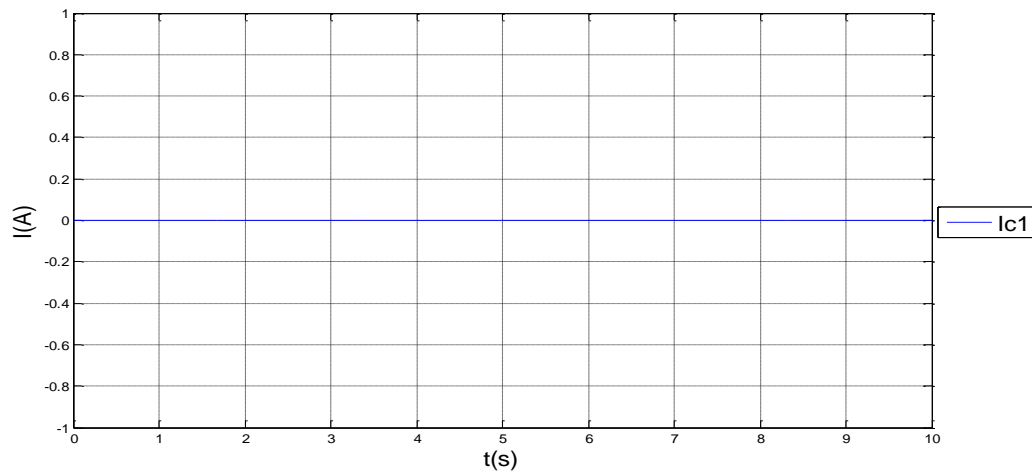
$$|I_1 - I_3| = 0,074A$$

$$|I_2 - I_3| = 0,579A$$

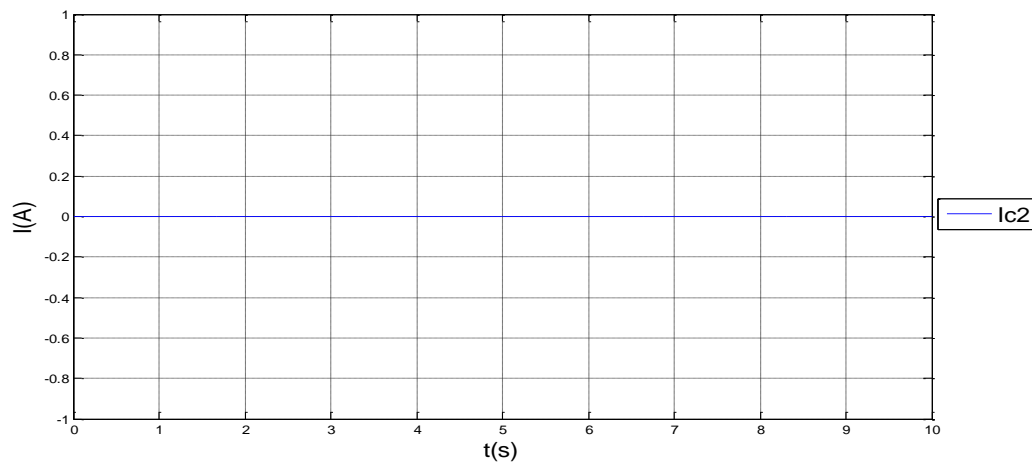
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δίνονται παρακάτω:



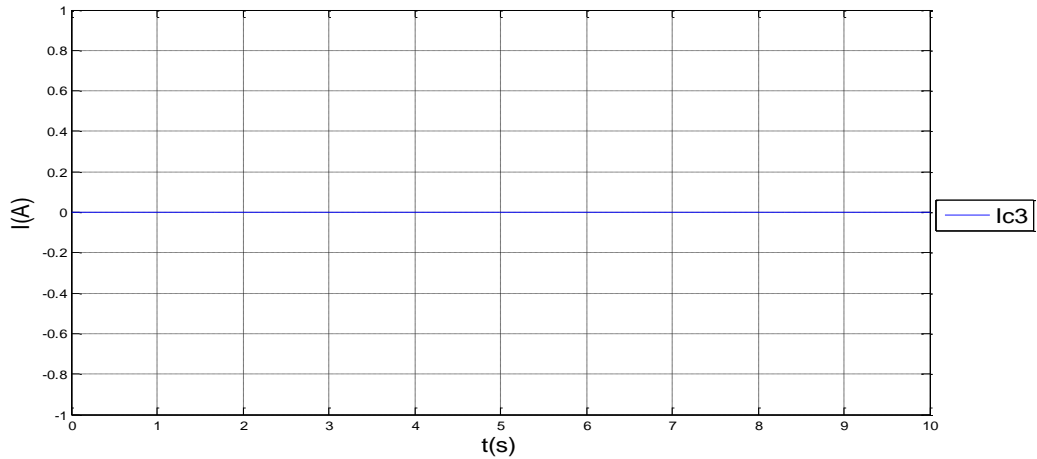
Σχήμα (4.11)- Ρεύματα I_1, I_2, I_3 της τοπολογίας σύνδεσης τριών πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Three terminal DC unipolar connection) με $V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc3}$.



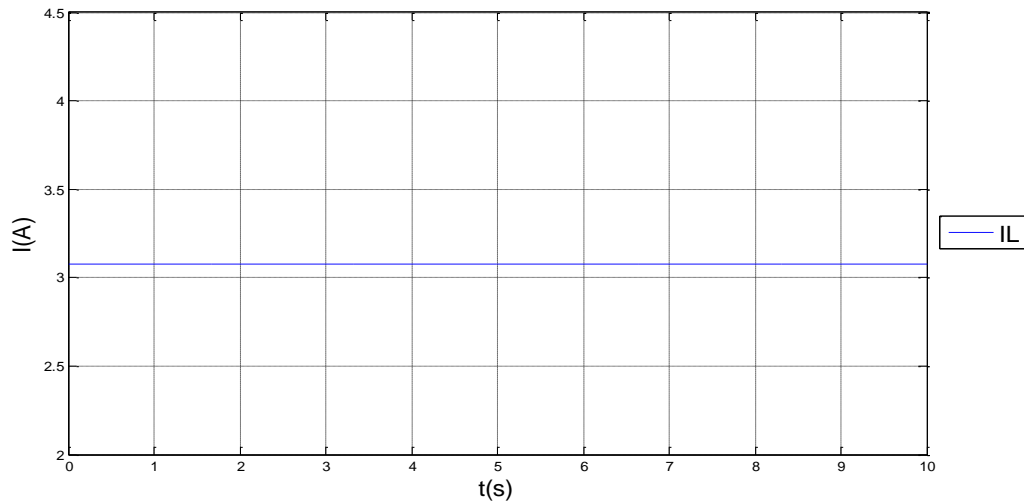
Σχήμα (4.12)- Ρεύμα I_{c1} της τοπολογίας σύνδεσης τριών πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Three terminal DC unipolar connection) με $V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc3}$.



Σχήμα (4.13)- Ρεύμα I_{c2} της τοπολογίας σύνδεσης τριών πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Three terminal DC unipolar connection) με $V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc3}$.



Σχήμα (4.14)- Ρεύμα I_{c3} της τοπολογίας σύνδεσης τριών πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Three terminal DC unipolar connection) με $V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc3}$.



Σχήμα (4.15)- Ρεύμα φορτίου I_L της τοπολογίας σύνδεσης τριών πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Three terminal DC unipolar connection) με $V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc3}$.

Αρχικά, αυτό που παρατηρούμε είναι ότι και σε αυτήν την περίπτωση τα ρεύματα που υπολογίσαμε είναι σχεδόν ίσα με αυτά που προκύπτουν απ'την προσομοίωση. Η διαφορά είναι ακόμη μικρότερη από αυτή των προηγούμενων τοπολογιών, καθώς δεν προχωρήσαμε σε απλοποιήσεις κατά την εύρεση των σχέσεων που δίνουν τα ρεύματα του κυκλώματος.

Ακόμη, βλέπουμε στα σχήματα (4.12), (4.13) και (4.14) ότι στην τοπολογία δε υπάρχουν κυκλοφορούντα ρεύματα, όπως περιμέναμε καθώς $V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc3}$.

Παρ'όλ' αυτά, παρατηρούμε στο σχήμα (4.11) ότι υπάρχει διαφορά μεταξύ των ρευμάτων γραμμών I_1, I_2, I_3 . Η διαφορά αυτή οφείλεται στη διαφορά μεταξύ των αντιστάσεων γραμμών R_1, R_2, R_3 .

4.2.2.2 – Περίπτωση 2^η: $V_{dc1} \neq V_{dc2} \neq V_{dc3}$

Τα μεγέθη που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση του κυκλώματος, λαμβάνοντας υπόψη το όριο του $\pm 5\%$ στη μεταβολή της τάσης εξόδου, δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

V_{out}	326 V
V_1	335 V
V_2	310 V
V_3	320 V
P_L	1006,16 W
R_L	105,625 Ω
R_1	1,1 Ω
R_2	0,7 Ω
R_3	1,2 Ω

Εφαρμόζοντας τους τύπους των ρευμάτων που προέκυψαν από την ανάλυση της συγκεκριμένης τοπολογίας, προκύπτουν για τα ρεύματα οι εξής τιμές:

$$I_1 = 14,732A$$

$$I_2 = -12,671A$$

$$I_3 = 0,966A$$

$$I_{c1} = 13,823A$$

$$I_{c2} = -13,993A$$

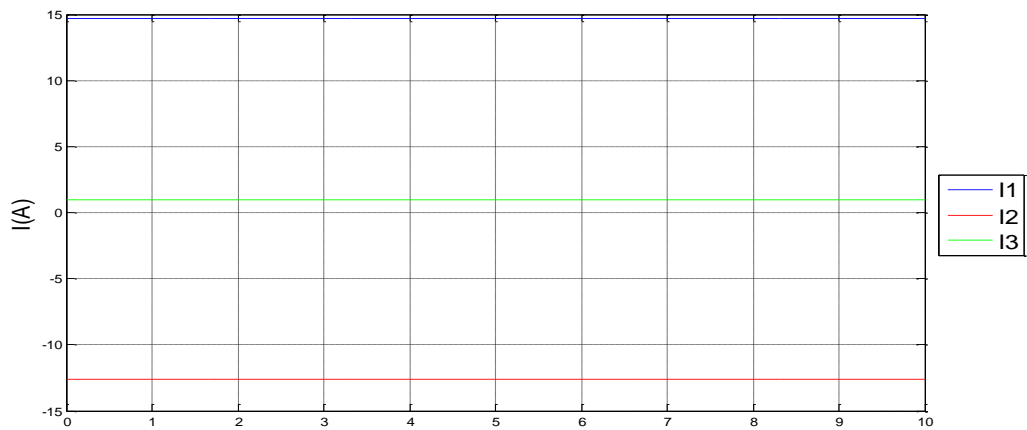
$$I_{c3} = 0,17A$$

$$|I_1 - I_2| = 27,403A$$

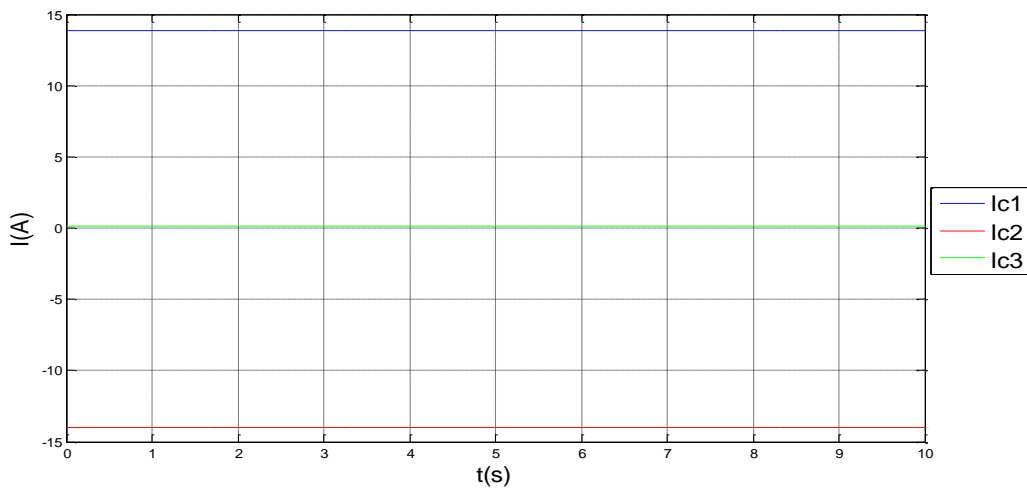
$$|I_1 - I_3| = 13,766A$$

$$|I_2 - I_3| = -13,637A$$

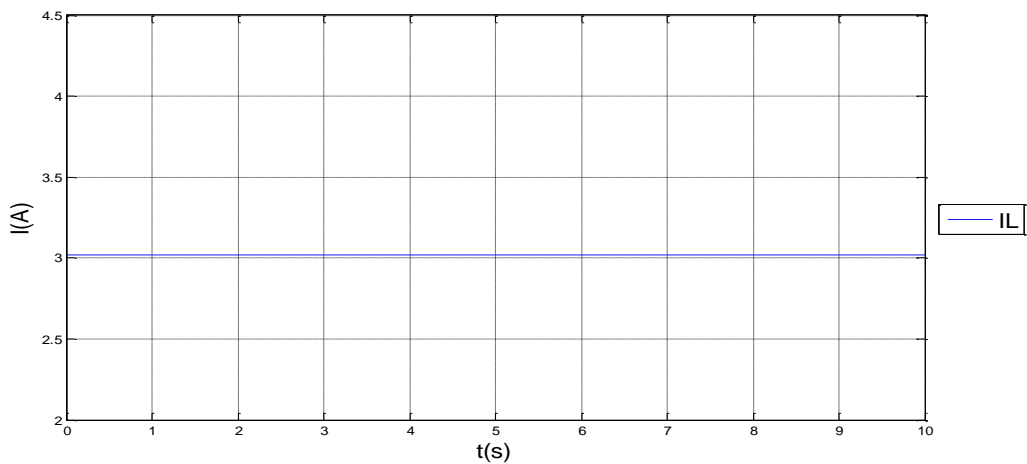
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δίνονται παρακάτω:



Σχήμα (4.16)- Ρεύματα I_1, I_2, I_3 της τοπολογίας σύνδεσης τριών πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Three terminal DC unipolar connection) με $V_{dc1} \neq V_{dc2} \neq V_{dc3}$.



Σχήμα (4.17)- Ρεύματα I_{c1}, I_{c2}, I_{c3} της τοπολογίας σύνδεσης τριών πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Three terminal DC unipolar connection) με $V_{dc1} \neq V_{dc2} \neq V_{dc3}$.



Σχήμα (4.18)- Ρεύμα φορτίου I_L της τοπολογίας σύνδεσης τριών πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Three terminal DC unipolar connection) με $V_{dc1} \neq V_{dc2} \neq V_{dc3}$.

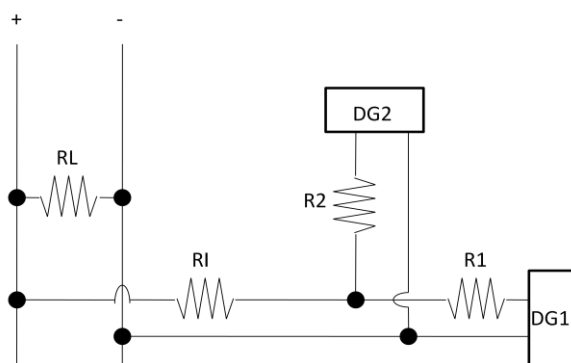
Βλέπουμε ότι και σε αυτήν την περίπτωση τα ρεύματα που υπολογίσαμε μέσω των θεωρητικών σχέσεων είναι πάρα πολύ κοντά με αυτά που προκύπτουν απ'την προσομοίωση. Η διαφορά είναι ακόμη μικρότερη από αυτή των προηγούμενων τοπολογιών, καθώς δεν προχωρήσαμε σε απλοποιήσεις κατά την εύρεση των σχέσεων που δίνουν τα ρεύματα του κυκλώματος.

Παρατηρούμε στο σχήμα (4.17), ότι η ανισοροπία μεταξύ των τάσεων V_{dc1} , V_{dc2} και V_{dc3} δημιουργεί κυκλοφορούντα ρεύματα στο κύκλωμα. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπ'όψην ότι $V_{dc1} > V_{dc3} > V_{dc2}$, βλέπουμε ότι $I_{c1} > I_{c3} > I_{c2}$. Η ύπαρξη κυκλοφορούντων ρευμάτων έχει ως αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος $I_1 = 14,732A$ να κυκλοφορεί μεταξύ των πηγών (βλέπουμε ότι έχουμε ακόμη και αρνητικές τιμές ρευμάτων $I_2 = -12,671A$) ενώ το ρεύμα που καταναλώνεται στο φορτίο μένει στο ίδιο επίπεδο.

Τέλος, βλέπουμε ότι η ύπαρξη κυκλοφορούντων ρευμάτων, έχει ως αποτέλεσμα την χειροτέρευση του διαμοιρασμού φορτίου (current sharing) μεταξύ των τριών γραμμών, όπως φαίνεται και στο σχήμα (4.16). Πιο συγκεκριμένα έχω τις διαφορές $|I_1 - I_2| = 27,403A$, $|I_1 - I_3| = 13,766A$ και $|I_2 - I_3| = -13,637A$.

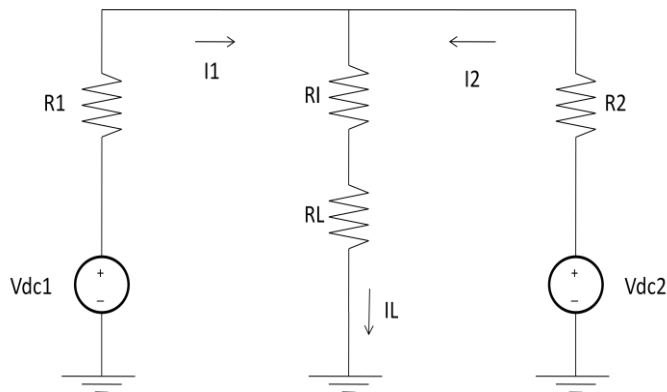
4.2.3 – Κοινή σύνδεση δύο παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources)

Η συνδεσμολογία που εξετάζουμε εδώ είναι αυτή του παρακάτω σχήματος:



Σχήμα (4.19)- Τοπολογία κοινής σύνδεσης δύο παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources).

Το ισοδύναμο κύκλωμα αυτής της συνδεσμολογίας είναι το εξής:



Σχήμα (4.20)-Ισοδύναμο κύκλωμα τοπολογίας κοινής σύνδεσης δύο παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources).

Αρχικά, παρουσιάζεται η περίπτωση 1 κατά την οποία $V_{dc1} = V_{dc2}$ και στη συνέχεια η περίπτωση 2 κατά την οποία $V_{dc1} \neq V_{dc2}$. Αυτό γίνεται για να γίνει εμφανές το γεγονός ότι η ύπαρξη των κυκλοφορούντων ρευμάτων οφείλεται στη διαφορά μεταξύ των διαφόρων τάσεων που τροφοδοτούν το φορτίο. Ακόμη, έχοντας τα αποτελέσματα και για τις δύο περιπτώσεις, μπορούμε να συγκρίνουμε τις εκάστοτε τιμές των ρευμάτων των γραμμών και του φορτίου, και να διαπιστώσουμε την επιβάρυνση στον διαμοιρασμό του φορτίου των πηγών, που προκαλούν τα κυκλοφορούντα ρεύματα.

4.2.3.1 – Περίπτωση 1^η: $V_{dc1} = V_{dc2}$

Τα μεγέθη που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση του κυκλώματος δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

V_{out}	326 V
V_1	326 V
V_2	326 V
P_L	1006,16 W
R_L	105,625 Ω
R_1	0,7 Ω
R_2	0,9 Ω
R_l	1,4 Ω

Εφαρμόζοντας τους τύπους των ρευμάτων που προέκυψαν απ'την ανάλυση της συγκεκριμένης τοπολογίας, προκύπτουν για τα ρεύματα οι εξής τιμές:

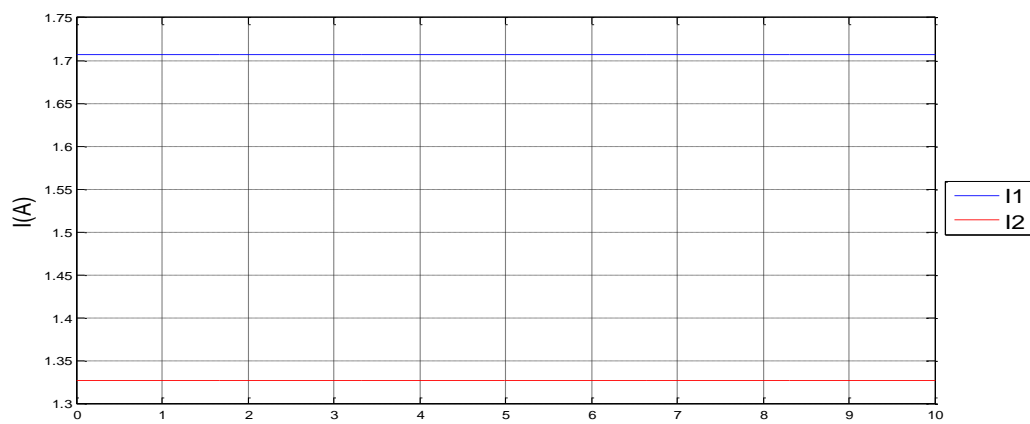
$$I_1 = 1,713A$$

$$I_2 = 1,267A$$

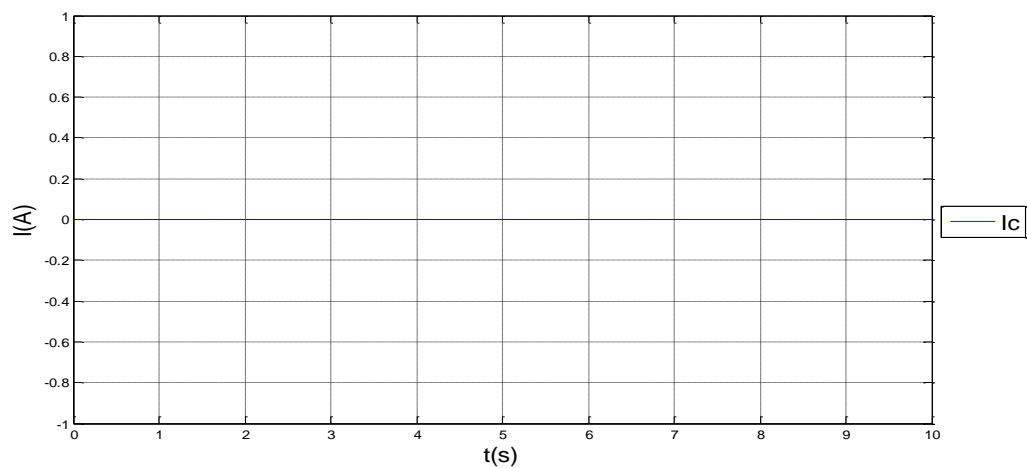
$$I_{c12} = 0A$$

$$|I_1 - I_2| = 0,446A$$

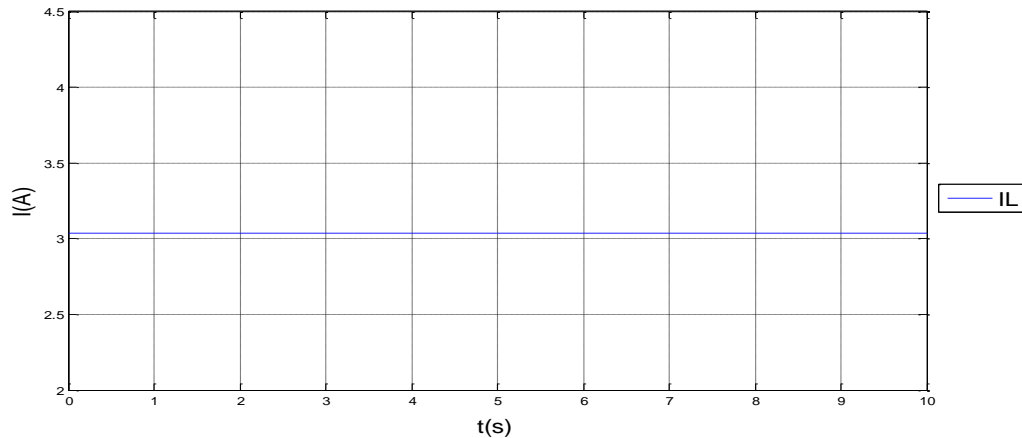
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δίνονται παρακάτω:



Σχήμα (4.21)- Ρεύματα I_1, I_2 της τοπολογίας κοινής σύνδεσης δύο παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources) με $V_{dc1} = V_{dc2}$.



Σχήμα (4.22)-Κυκλοφορούν ρεύμα I_c της τοπολογίας κοινής σύνδεσης δύο παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources) με $V_{dc1} = V_{dc2}$.



Σχήμα (4.23)- Ρεύμα φορτίου I_L της τοπολογίας κοινής σύνδεσης δύο παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources) με $V_{dc1} = V_{dc2}$.

Αρχικά, αυτό που παρατηρούμε είναι ότι οι τιμές των ρευμάτων που υπολογίσαμε, μέσω των θεωρητικών σχέσεων, είναι πολύ κοντά σε αυτές που προκύπτουν απ'την προσομοίωση. Η πολύ μικρή διαφορά οφείλεται στην απλοποίηση που κάναμε στους τύπους των ρευμάτων κατά τη μοντελοποίηση του κυκλώματος.

Όπως βλέπουμε στο σχήμα (4.22), λόγω της ισορροπίας των τάσεων V_{dc1} και V_{dc2} στο κύκλωμα δεν υπάρχουν κυκλοφορούντα ρεύματα.

Παρόλ' αυτά, παρατηρούμε στο σχήμα (4.21) ότι υπάρχει διαφορά μεταξύ των ρευμάτων γραμμών I_1, I_2 . Η διαφορά αυτή οφείλεται στη διαφορά μεταξύ των αντιστάσεων γραμμών R_1, R_2 .

4.2.3.2 – Περίπτωση 2^η: $V_{dc1} \neq V_{dc2}$

Τα μεγέθη που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση του κυκλώματος, λαμβάνοντας υπόψη το όριο του $\pm 5\%$ στη μεταβολή της τάσης εξόδου, δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

V_{out}	326 V
V_1	330 V
V_2	310 V
P_L	1006,16 W
R_L	105,625 Ω
R_1	0,7 Ω
R_2	0,9 Ω
R_l	1,4 Ω

Εφαρμόζοντας τους τύπους των ρευμάτων που προέκυψαν απ'την ανάλυση της συγκεκριμένης τοπολογίας, προκύπτουν για τα ρεύματα οι εξής τιμές:

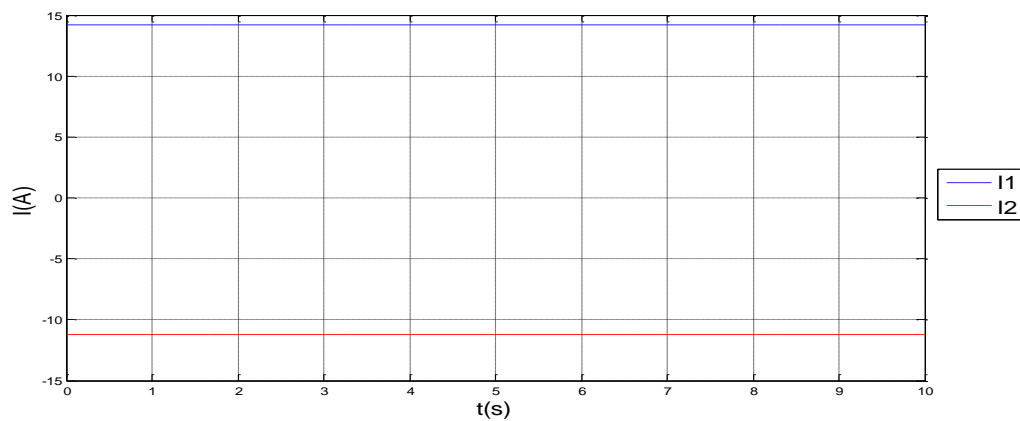
$$I_1 = 14,234A$$

$$I_2 = -11,233A$$

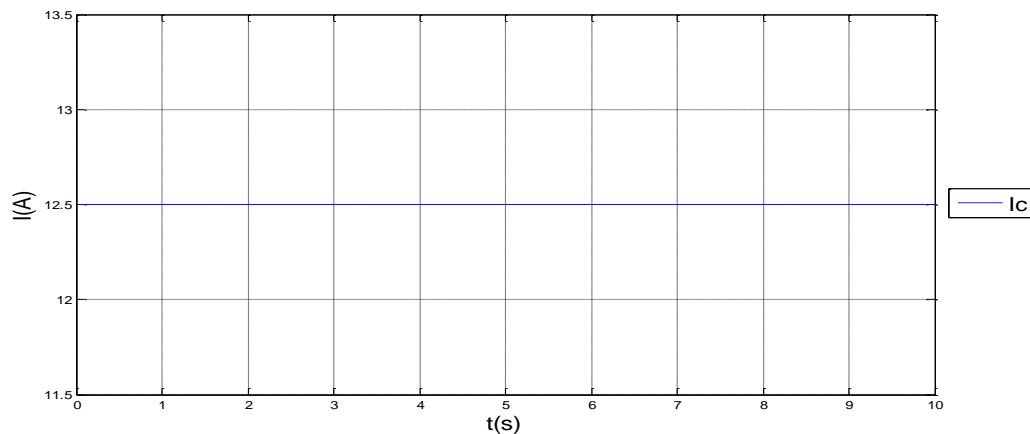
$$I_{c12} = 12,5A$$

$$|I_1 - I_2| = 25,467A$$

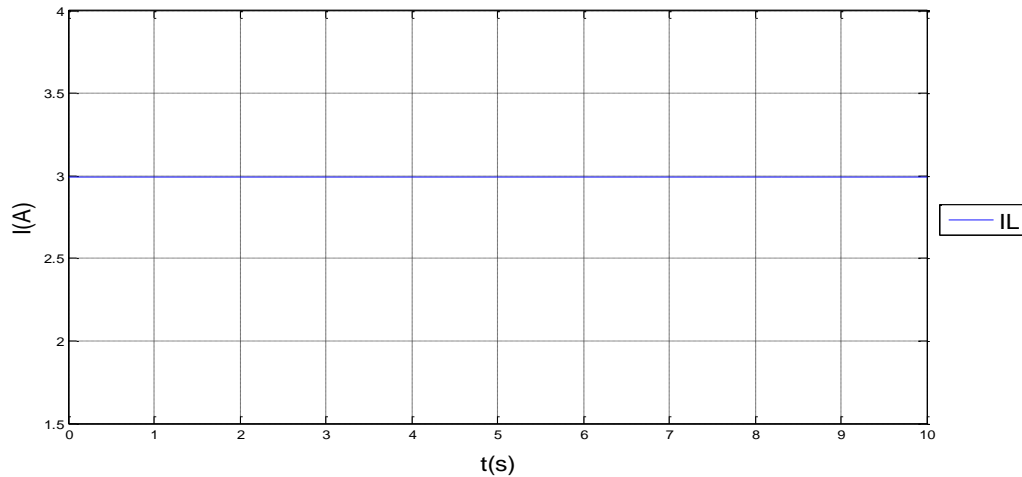
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δίνονται παρακάτω:



Σχήμα (4.24)- Ρεύματα I_1, I_2 της τοπολογίας κοινής σύνδεσης δύο παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources) με $V_{dc1} \neq V_{dc2}$.



Σχήμα (4.25)-Κυκλοφορούν ρεύμα I_c της τοπολογίας κοινής σύνδεσης δύο παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources) με $V_{dc1} \neq V_{dc2}$.



Σχήμα (4.26)- Ρεύμα φορτίου I_L της τοπολογίας κοινής σύνδεσης δύο παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources) με $V_{dc1} \neq V_{dc2}$.

Αρχικά, αυτό που παρατηρούμε είναι ότι οι τιμές των ρευμάτων που υπολογίσαμε, μέσω των θεωρητικών σχέσεων, είναι πολύ κοντά σε αυτές που προκύπτουν απ'την προσομοίωση. Η πολύ μικρή διαφορά οφείλεται στην απλοποίηση που κάναμε στους τύπους των ρευμάτων κατά τη μοντελοποίηση του κυκλώματος.

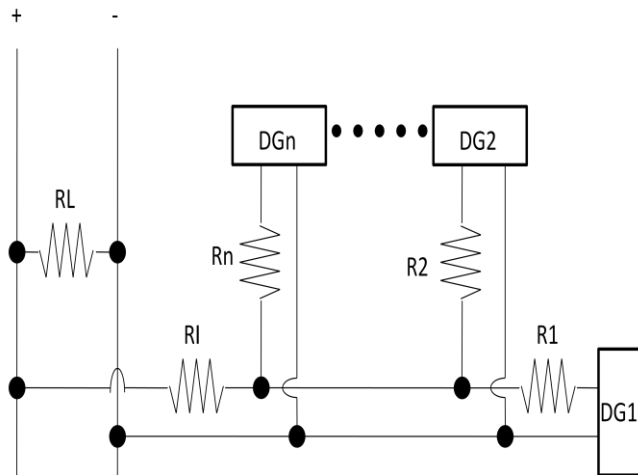
Παρατηρούμε ακόμη ότι, όπως ήταν αναμενόμενο, η ανισορροπία μεταξύ των τάσεων V_{dc1} και V_{dc2} δημιούργησε κυκλοφορούντα ρεύματα στο κύκλωμα, όπως φαίνεται στο σχήμα (4.25). Λαμβάνοντας υπ' όψη ότι στο συγκεκριμένο παράδειγμα επιλέξαμε $V_{dc1} > V_{dc2}$, βλέπουμε ότι $I_{c12} > 0$.

Ακόμη παρατηρούμε ότι από τα $14,234A$ που κυκλοφορούν στη γραμμή 1, μόνο τα $I_L = 3,001A$ αντιστοιχούν στο φορτίο, ενώ τα υπόλοιπα κυκλοφορούν στη γραμμή 2 με αποτέλεσμα το ρεύμα I_2 να παίρνει αρνητική τιμή $I_2 = -11,233A$.

Τέλος, βλέπουμε ότι η ύπαρξη κυκλοφορούντων ρευμάτων, έχει ως αποτέλεσμα την χειροτέρευση του διαμοιρασμού φορτίου (current sharing) μεταξύ των δύο γραμμών, καθώς $|I_1 - I_2| = 25,467A$. Η μεγάλη διαφορά μεταξύ των ρευμάτων γραμμών φαίνεται και απ'το σχήμα (4.24).

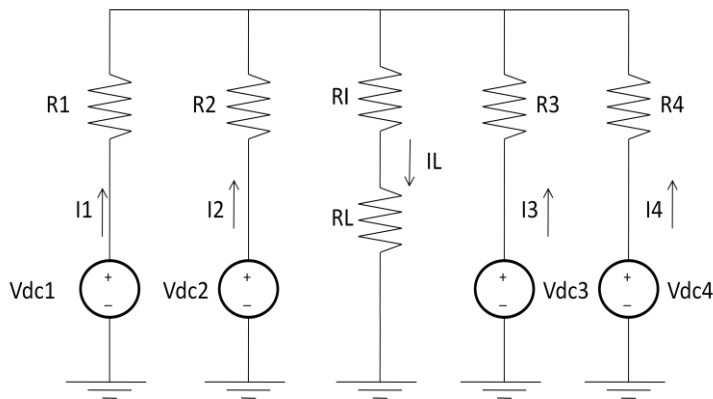
4.2.4 - Κοινή σύνδεση η παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with n parallel voltage sources)

Η συνδεσμολογία που εξετάζουμε εδώ, είναι ουσιαστικά μια γενίκευση της τοπολογίας «one terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources» για n πηγές και φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα (4.27)- Τοπολογία κοινής σύνδεσης η παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with n parallel voltage sources).

Προσομοιώσαμε τη συνδεσμολογία για n=4. Επομένως, το ισοδύναμο κύκλωμα αυτής της συνδεσμολογίας είναι το εξής:



Σχήμα (4.28)- Ισοδύναμο κυκλωμα τοπολογίας κοινής σύνδεσης τεσσάρων παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with four parallel voltage sources).

Αρχικά, παρουσιάζεται η περίπτωση 1 κατά την οποία $V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc3} = V_{dc4}$ και στη συνέχεια η περίπτωση 2 κατά την οποία $V_{dc1} \neq V_{dc2} \neq V_{dc3} \neq V_{dc4}$. Αυτό γίνεται για να γίνει εμφανές το γεγονός ότι η ύπαρξη των κυκλοφορούντων ρευμάτων οφείλεται στη διαφορά μεταξύ των διαφόρων τάσεων που τροφοδοτούν το φορτίο. Ακόμη, έχοντας τα αποτελέσματα και για τις δύο περιπτώσεις, μπορούμε να συγκρίνουμε τις εκάστοτε τιμές

των ρευμάτων των γραμμών και του φορτίου, και να διαπιστώσουμε την επιβάρυνση στον διαμοιρασμό του φορτίου των πηγών, που προκαλούν τα κυκλοφορούντα ρεύματα.

4.2.4.1 – Περίπτωση 1^η: $V_{ac1} = V_{ac2} = V_{ac3} = V_{ac4}$

Τα μεγέθη που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση του κυκλώματος δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

V_{out}	326 V
V_1	326 V
V_2	326 V
V_3	326 V
V_4	326 V
P_L	1006,16 W
R_L	105,625 Ω
R_1	0,7 Ω
R_2	0,9 Ω
R_3	1,1 Ω
R_4	1,25 Ω
R_l	1,4 Ω

Εφαρμόζοντας τους τύπους των ρευμάτων που προέκυψαν απ'την ανάλυση της συγκεκριμένης τοπολογίας, προκύπτουν για τα ρεύματα οι εξής τιμές:

$$I_1 = 1,024A$$

$$I_2 = 0,797A$$

$$I_3 = 0,652A$$

$$I_4 = 0,573A$$

$$I_{c1} = 0A$$

$$I_{c2} = 0A$$

$$I_{c3} = 0A$$

$$I_{c4} = 0A$$

$$|I_1 - I_2| = 0,227A$$

$$|I_1 - I_3| = 0,372A$$

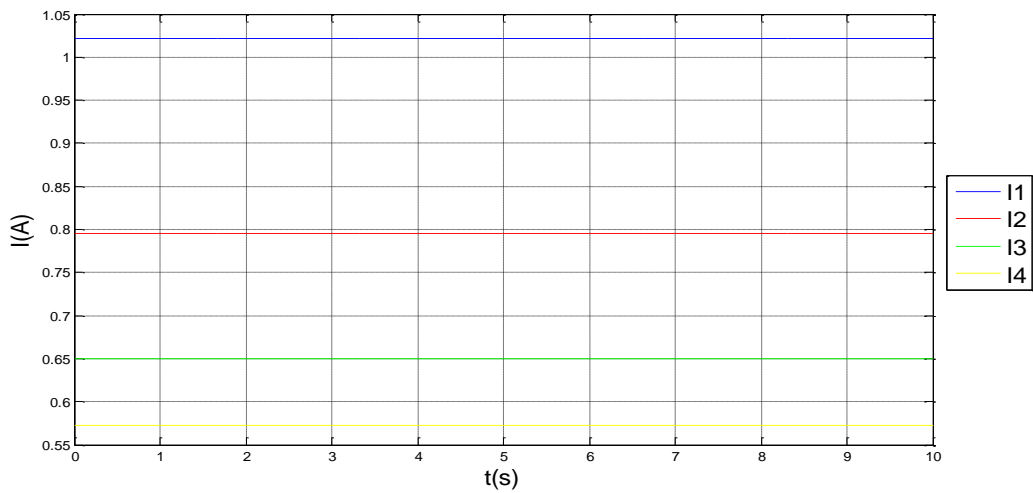
$$|I_1 - I_4| = 0,451A$$

$$|I_2 - I_3| = 0,145A$$

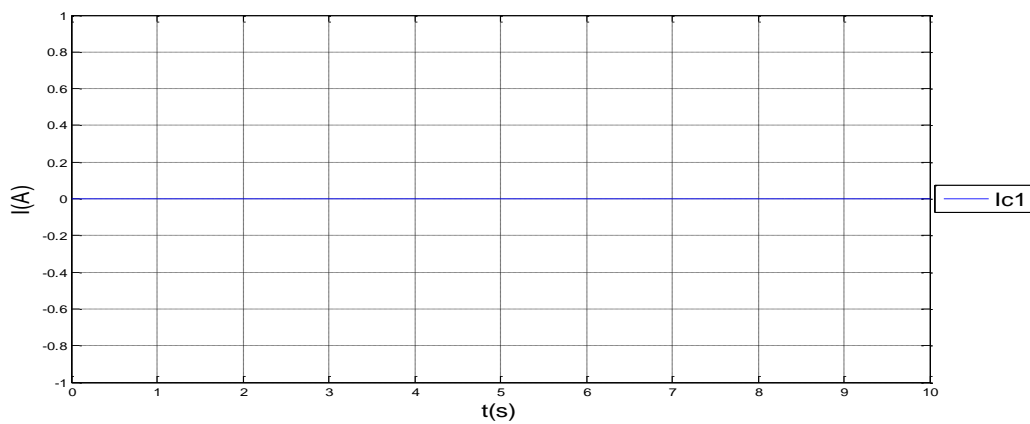
$$|I_2 - I_4| = 0,224A$$

$$|I_3 - I_4| = 0,079A$$

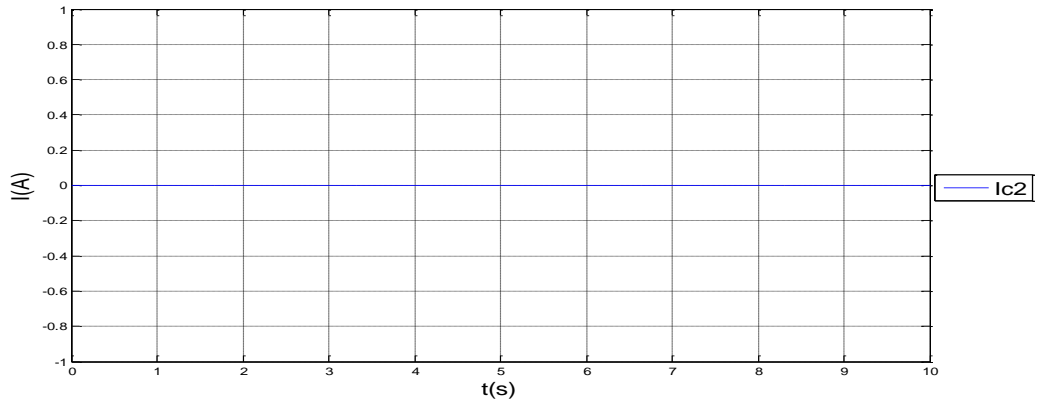
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δίνονται παρακάτω:



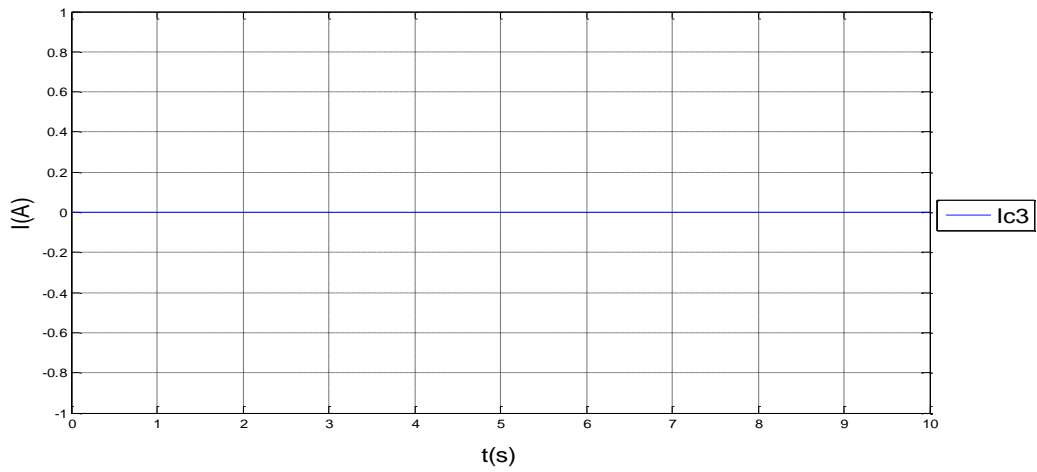
Σχήμα (4.29)- Ρεύματα I_1, I_2, I_3, I_4 της τοπολογίας κοινής σύνδεσης τεσσάρων παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with four parallel voltage sources) με $V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc3} = V_{dc4}$.



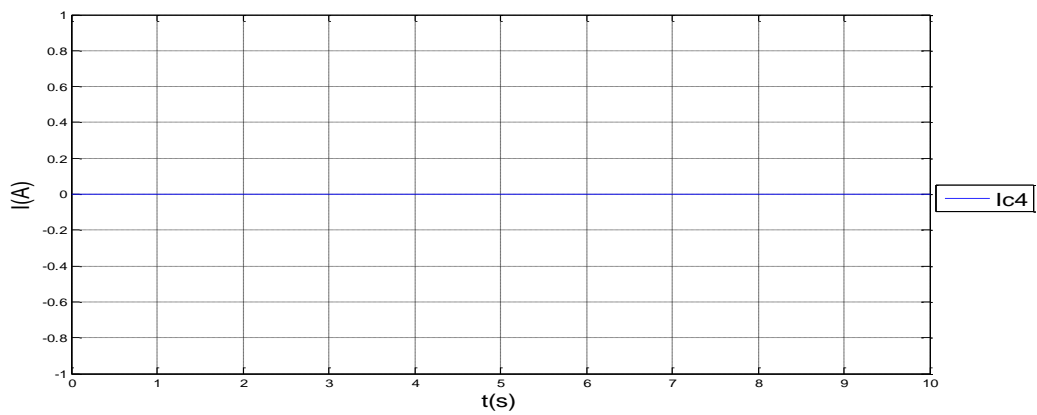
Σχήμα (4.30)-Κυκλοφορούν ρεύμα I_{c1} της τοπολογίας κοινής σύνδεσης τεσσάρων παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with four parallel voltage sources) με $V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc3} = V_{dc4}$.



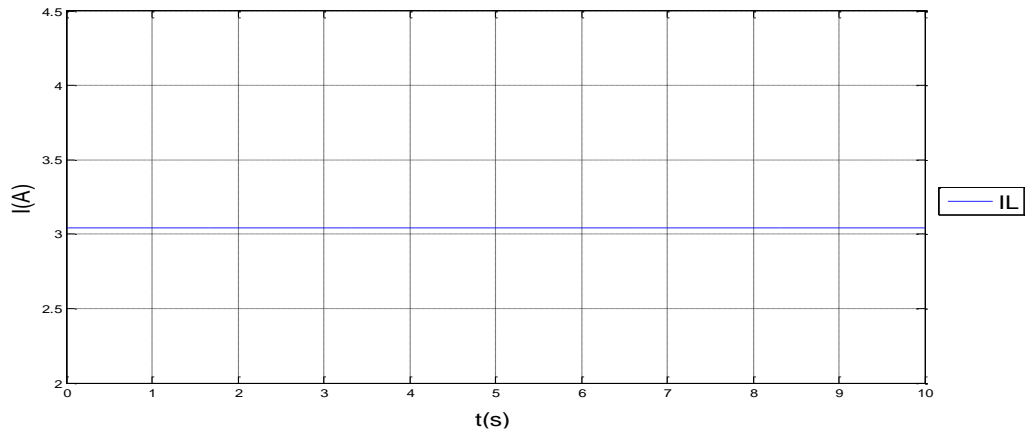
Σχήμα (4.31)- Ρεύμα I_{c2} της τοπολογίας κοινής σύνδεσης τεσσάρων παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with four parallel voltage sources) με $V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc3} = V_{dc4}$.



Σχήμα (4.32)- Ρεύμα I_{c3} της τοπολογίας κοινής σύνδεσης τεσσάρων παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with four parallel voltage sources) με $V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc3} = V_{dc4}$.



Σχήμα (4.33)- Ρεύμα I_{c4} της τοπολογίας κοινής σύνδεσης τεσσάρων παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with four parallel voltage sources) με $V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc3} = V_{dc4}$.



Σχήμα (4.34)- Ρεύμα φορτίου I_L της τοπολογίας κοινής σύνδεσης τεσσάρων παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with four parallel voltage sources) με $V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc3} = V_{dc4}$.

Αρχικά, αυτό που παρατηρούμε είναι ότι και σε αυτήν την περίπτωση τα ρεύματα που υπολογίσαμε είναι σχεδόν ίσα με αυτά που προκύπτουν απ' την προσομοίωση.

Ακόμη, βλέπουμε στα σχήματα (4.30), (4.31), (4.32) και (4.33) ότι στην τοπολογία δε υπάρχουν κυκλοφορούντα ρεύματα, όπως περιμέναμε καθώς $V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc3} = V_{dc4}$.

Παρόλ' αυτά, παρατηρούμε στο σχήμα (4.29) ότι υπάρχει διαφορά μεταξύ των ρευμάτων γραμμών I_1, I_2, I_3, I_4 . Η διαφορά αυτή οφείλεται στη διαφορά μεταξύ των αντιστάσεων γραμμών R_1, R_2, R_3, R_4 .

4.2.4.2 – Περίπτωση 2^η: $V_{dc1} \neq V_{dc2} \neq V_{dc3} \neq V_{dc4}$

Τα μεγέθη που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση του κυκλώματος, λαμβάνοντας υπ' όψιν το όριο του $\pm 5\%$ στη μεταβολή της τάσης εξόδου, δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

V_{out}	326 V
V_1	330 V
V_2	310 V
V_3	325 V
V_4	320 V
P_L	1006,16 W
R_L	105,625 Ω
R_1	0,7 Ω

R_2	0,9 Ω
R_3	1,1 Ω
R_4	1,25 Ω
R_l	1,4 Ω

Εφαρμόζοντας τους τύπους των ρευμάτων που προέκυψαν απ'την ανάλυση της συγκεκριμένης τοπολογίας, προκύπτουν για τα ρεύματα οι εξής τιμές:

$$I_1 = 12,726A$$

$$I_2 = -12,194A$$

$$I_3 = 3,543A$$

$$I_4 = -1,049A$$

$$I_{c1} = 11,689A$$

$$I_{c2} = -12,971A$$

$$I_{c3} = 2,894A$$

$$I_{c4} = -1,612A$$

$$|I_1 - I_2| = 24,920A$$

$$|I_1 - I_3| = 9,138A$$

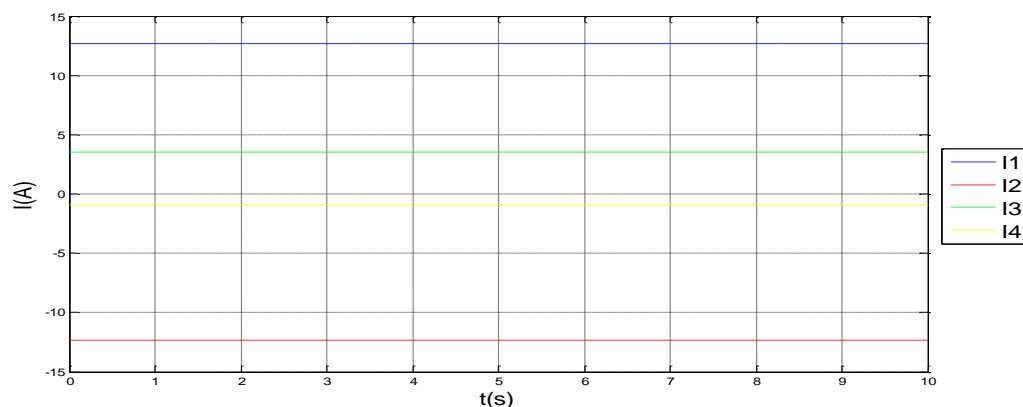
$$|I_1 - I_4| = 13,775A$$

$$|I_2 - I_3| = -15,737A$$

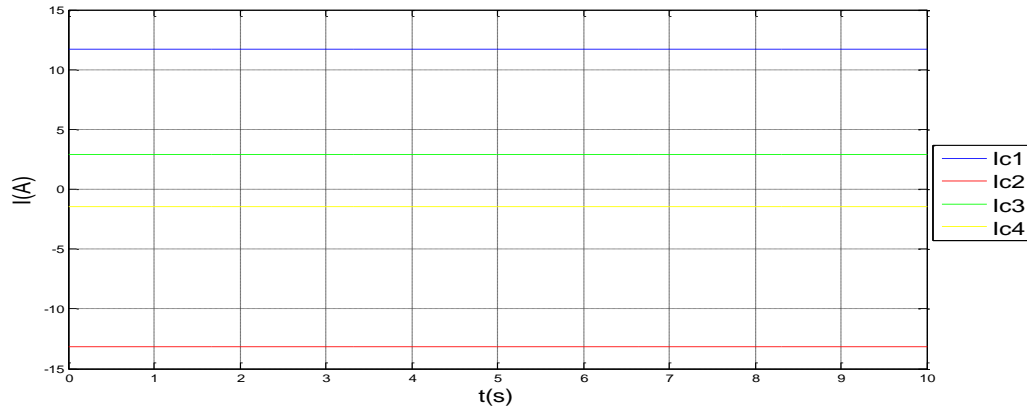
$$|I_2 - I_4| = -11,145A$$

$$|I_3 - I_4| = 4,592A$$

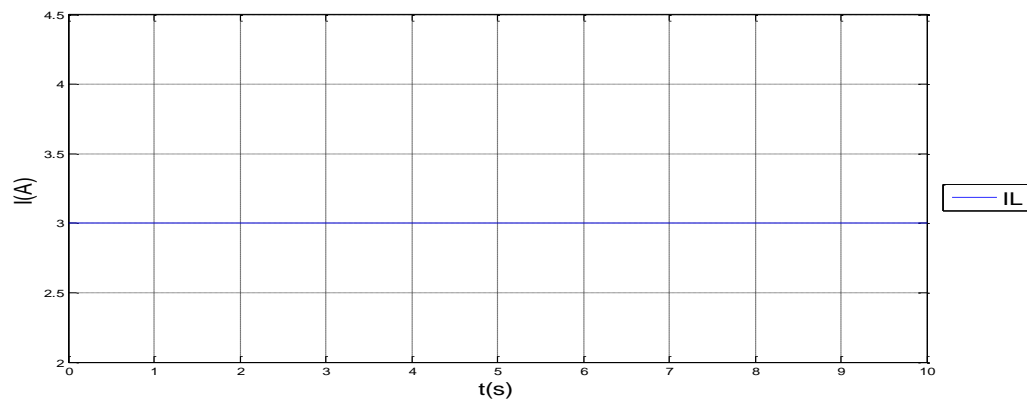
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δίνονται παρακάτω:



Σχήμα (4.35)- Ρεύματα I_1, I_2, I_3, I_4 της τοπολογίας κοινής σύνδεσης τεσσάρων παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with four parallel voltage sources) με $V_{dc1} \neq V_{dc2} \neq V_{dc3} \neq V_{dc4}$.



Σχήμα (4.36)-Κυκλοφορούντα ρεύματα $I_{c1}, I_{c2}, I_{c3}, I_{c4}$ της τοπολογίας κοινής σύνδεσης τεσσάρων παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with four parallel voltage sources) με $V_{dc1} \neq V_{dc2} \neq V_{dc3} \neq V_{dc4}$.



Σχήμα (4.37)- Ρεύμα φορτίου I_L της τοπολογίας κοινής σύνδεσης τεσσάρων παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with four parallel voltage sources) με $V_{dc1} \neq V_{dc2} \neq V_{dc3} \neq V_{dc4}$.

Βλέπουμε ότι και σε αυτήν την περίπτωση τα ρεύματα που υπολογίσαμε μέσω των θεωρητικών σχέσεων είναι πάρα πολύ κοντά με αυτά που προκύπτουν απ'την προσομοίωση.

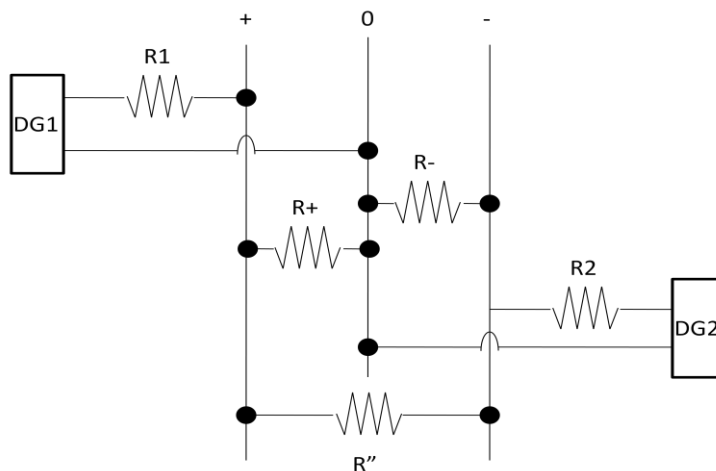
Παρατηρούμε ότι η ανισοροπία μεταξύ των τάσεων $V_{dc1}, V_{dc2}, V_{dc3}$ και V_{dc4} δημιουργεί κυκλοφορούντα ρεύματα στο κύκλωμα. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπ'όψη ότι $V_{dc1} > V_{dc3} > V_{dc4} > V_{dc2}$, βλέπουμε ότι $I_{c1} > I_{c3} > I_{c4} > I_{c2}$, όπως φαίνεται και στο σχήμα (n.36). Η ύπαρξη κυκλοφορούντων ρευμάτων έχει ως αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος $I_1 = 12,726A$ να κυκλοφορεί μεταξύ των πηγών (υπάρχουν ακόμη και αρνητικές τιμές ρευμάτων $I_2 = -12,194A, I_4 = -1,049A$) ενώ το ρεύμα που καταναλώνεται στο φορτίο μένει στο ίδιο επίπεδο.

Τέλος, βλέπουμε ότι η ύπαρξη κυκλοφορούντων ρευμάτων, έχει ως αποτέλεσμα την χειροτέρευση του διαμοιρασμού φορτίου (current sharing) μεταξύ των τεσσάρων γραμμών $|I_1 - I_2| = 24,920A, |I_1 - I_3| = 9,138A, |I_1 - I_4| = 13,775A, |I_2 - I_3| = -15,737A, |I_2 - I_4| = -11,145A, |I_3 - I_4| = 4,592A$, όπως φαίνεται και στο σχήμα (4.35).

4.3 – Διπολικές (Bipolar) συνδεσμολογίες

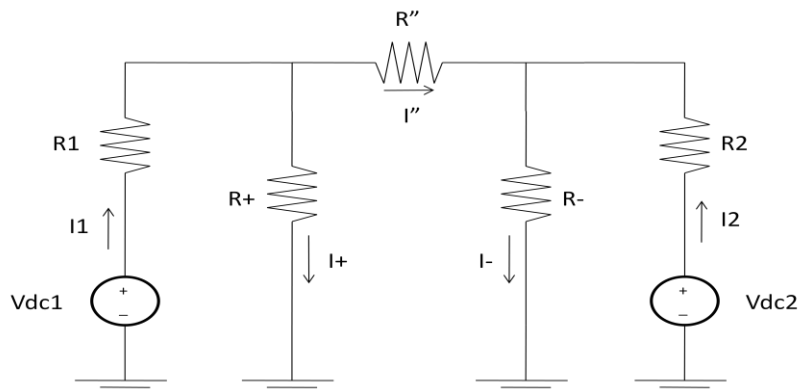
4.3.1- Σύνδεση δύο πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου (DC bipolar connection)

Η συνδεσμολογία που εξετάζουμε εδώ είναι αυτή του παρακάτω σχήματος:



Σχήμα (4.38)- Τοπολογία σύνδεσης δύο πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου (DC bipolar connection).

Το ισοδύναμο κύκλωμα αυτής της συνδεσμολογίας είναι το εξής:



Σχήμα (4.39)-Ισοδύναμο κύκλωμα τοπολογίας σύνδεσης δύο πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου (DC bipolar connection).

Αρχικά, παρουσιάζεται η περίπτωση 1 κατά την οποία $V_{dc1} + V_{dc2} = 0$ και στη συνέχεια η περίπτωση 2 κατά την οποία $V_{dc1} + V_{dc2} \neq 0$. Αυτό γίνεται για να γίνει εμφανές το γεγονός ότι η ύπαρξη των κυκλοφορούντων ρευμάτων οφείλεται στη διαφορά μεταξύ των διαφόρων τάσεων που τροφοδοτούν το φορτίο. Ακόμη, έχοντας τα αποτελέσματα και για τις δύο περιπτώσεις, μπορούμε να συγκρίνουμε τις εκάστοτε τιμές των ρευμάτων των

γραμμών και του φορτίου, και να διαπιστώσουμε την επιβάρυνση στον διαμοιρασμό του φορτίου των πηγών, που προκαλούν τα κυκλοφορούντα ρεύματα.

4.3.1.1 – Περίπτωση 1^η: $V_{ac1} + V_{ac2} = 0$

Τα μεγέθη που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση του κυκλώματος δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

V_{out}	326 V
V_1	326 V
V_2	-326 V
P_L^+	1012,15 W
P_L^-	1118,69 W
P_L''	2834,03 W
$R_{L\Delta}^+$	105 Ω
$R_{L\Delta}^-$	95 Ω
$R_{L\Delta}''$	150 Ω
R_α	45 Ω
R_b	40,714 Ω
R_c	28,5 Ω
R_1	1,2 Ω
R_2	1,6 Ω

Εφαρμόζοντας τους τύπους των ρευμάτων που προέκυψαν απ'την ανάλυση της συγκεκριμένης τοπολογίας, προκύπτουν για τα ρεύματα οι εξής τιμές:

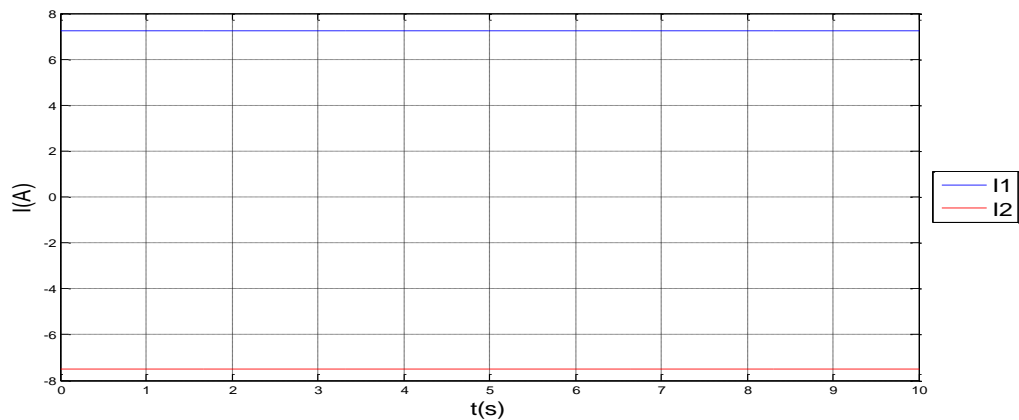
$$I_1 = 7,234A$$

$$I_2 = -7,517A$$

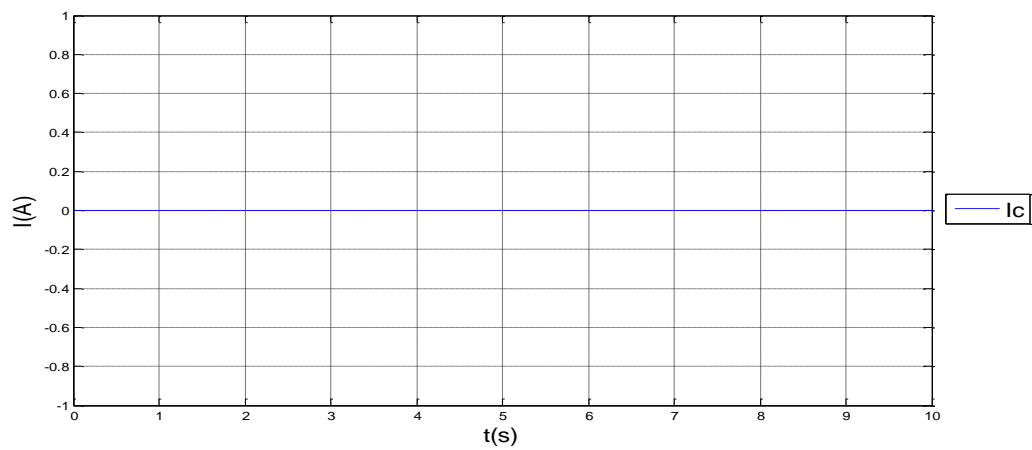
$$I_{c12} = 0A$$

$$|I_1 + I_2| = 0,283A$$

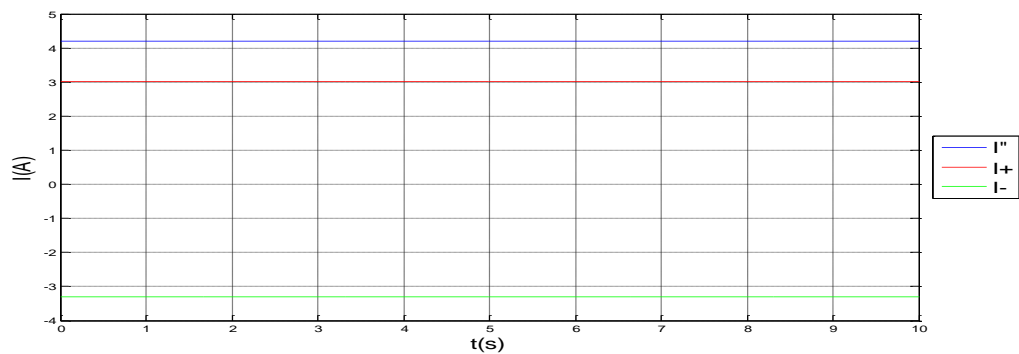
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δίνονται παρακάτω:



Σχήμα (4.40)- Ρεύματα I_1, I_2 της τοπολογίας σύνδεσης δύο πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου (DC bipolar connection) με $V_{dc1} + V_{dc2} = 0$.



Σχήμα (4.41)-Κυκλοφορούν ρεύμα I_c της τοπολογίας σύνδεσης δύο πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου (DC bipolar connection) με $V_{dc1} + V_{dc2} = 0$.



Σχήμα (4.42)- Ρεύματα φορτίων I'' , I^+ , I^- της τοπολογίας σύνδεσης δύο πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου (DC bipolar connection) με $V_{dc1} + V_{dc2} = 0$.

Όπως αναφέραμε και στο θεωρητικό κεφάλαιο, κατά την ανάλυση της συγκεκριμένης τοπολογίας, οι τιμές των ρευμάτων I_2 και I^- αναμένεται να είναι αρνητικές, επομένως τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δεν μας παραξενεύουν. Ακόμη, παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα αυτά συμπίπτουν με τις θεωρητικές τιμές που υπολογίσαμε παραπάνω.

Στο σχήμα (4.41) βλέπουμε ότι, όπως περιμέναμε δεν υπάρχουν κυκλοφορούντα ρεύματα στην συγκεκριμένη τοπολογία καθώς $V_{dc1} + V_{dc2} = 0$.

Τέλος, στο σχήμα (4.40) παρατηρούμε ότι το άθροισμα των ρευμάτων γραμμών είναι πολύ μικρό σε σχέση με τις τιμές τους. Η μη μηδενική τιμή οφείλεται στη διαφορά μεταξύ των αντιστάσεων γραμμών R_1, R_2 και των φορτίων R'' , R^+ , R^- .

4.3.1.2 – Περίπτωση 2^η: $V_{dc1} + V_{dc2} \neq 0$

Τα μεγέθη που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση του κυκλώματος, λαμβάνοντας υπ' όψη το όριο του $\pm 5\%$ στη μεταβολή της τάσης εξόδου, δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

V_{out}	326 V
V_1	340 V
V_2	-315 V
P_L^+	1012,15 W
P_L^-	1118,69 W
P_L''	2834,03 W
$R_{L\Delta}^+$	105 Ω
$R_{L\Delta}^-$	95 Ω
$R_{L\Delta}''$	150 Ω
R_α	45 Ω
R_b	40,714 Ω
R_c	28,5 Ω
R_1	1,2 Ω
R_2	1,6 Ω

Εφαρμόζοντας τους τύπους των ρευμάτων που προέκυψαν απ'την ανάλυση της συγκεκριμένης τοπολογίας, προκύπτουν για τα ρεύματα οι εξής τιμές:

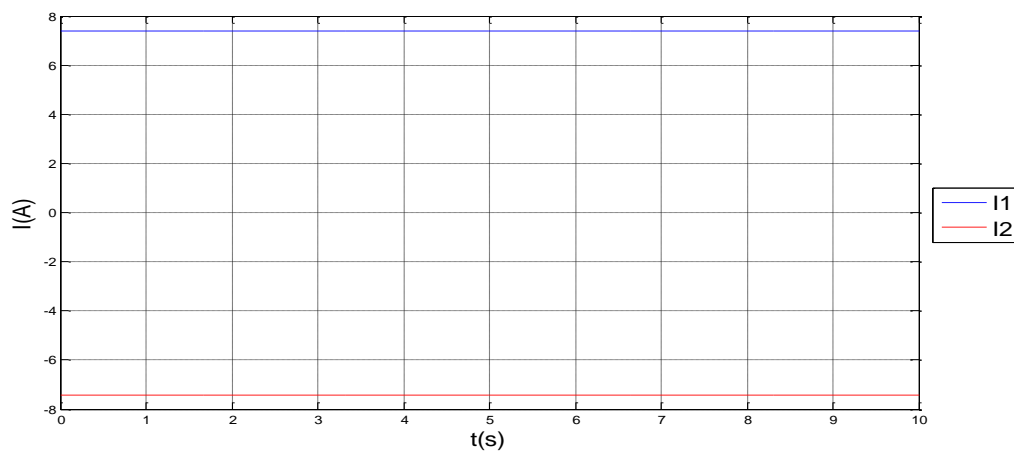
$$I_1 = 7,417A$$

$$I_2 = -7,773A$$

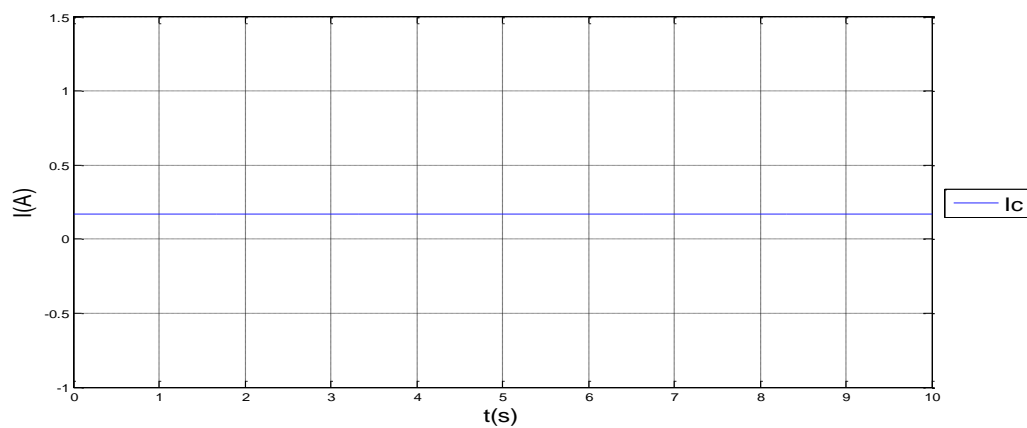
$$I_{c12} = 0,191A$$

$$|I_1 + I_2| = 0,356A$$

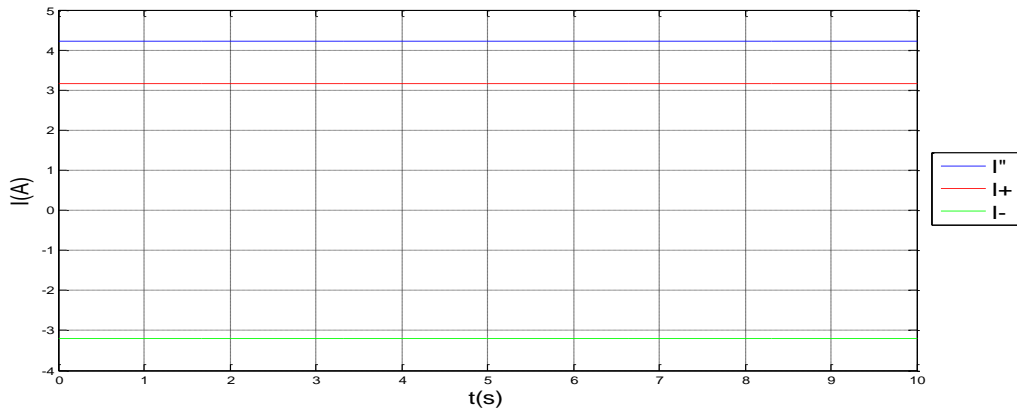
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δίνονται παρακάτω:



Σχήμα (4.43)- Ρεύματα I_1, I_2 της τοπολογίας σύνδεσης δύο πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου (DC bipolar connection) με $V_{dc1} + V_{dc2} \neq 0$.



Σχήμα (4.44)-Κυκλοφορούν ρεύμα I_c της τοπολογίας σύνδεσης δύο πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου (DC bipolar connection) με $V_{dc1} + V_{dc2} \neq 0$.

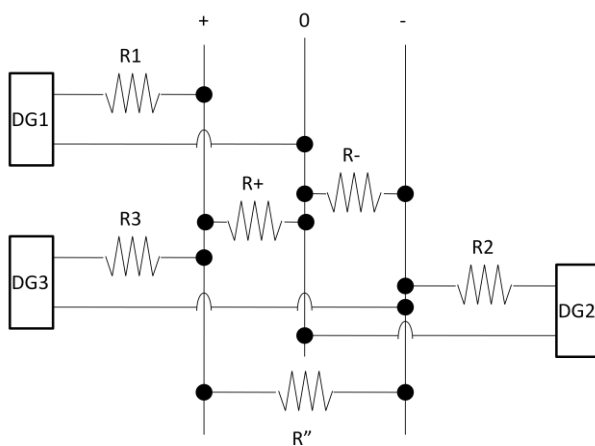


Σχήμα (4.45)- Ρεύματα φορτίων I'' , I^+ , I^- της τοπολογίας σύνδεσης δύο πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου (DC bipolar connection) με $V_{dc1} + V_{dc2} \neq 0$.

Τόσο από τα θεωρητικά αποτελέσματα, όσο και μέσω της προσομοίωσης, βλέπουμε ότι σε αυτή τη συνδεσμολογία τα κυκλοφορούντα ρεύματα που δημιουργούνται απ'την ανισορροπία των τάσεων είναι πολύ μικρά, τόσο σε σχέση με το ρεύμα των γραμμών της συγκεκριμένης τοπολογίας. Το γεγονός αυτό γίνεται αντιληπτό απ'τα σχήματα (4.43) και (4.44). Ακόμη, απ'το σχήμα (4.43) παρατηρούμε ότι έχουμε καλό διαμοιρασμό φορτίου (current sharing) στην συγκεκριμένη τοπολογία $|I_1 + I_2| = 0,356A$.

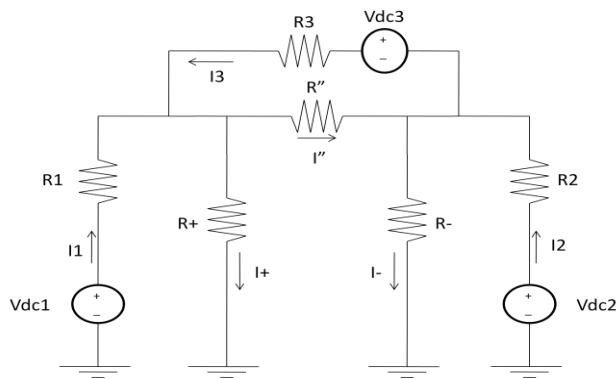
4.3.2- Σύνδεση τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (DC bipolar connection with 1 more voltage source connected between + - poles)

Η συνδεσμολογία που εξετάζουμε εδώ είναι αυτή του παρακάτω σχήματος:



Σχήμα (4.46)- Τοπολογία σύνδεσης τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (DC bipolar connection with 1 more voltage source connected between + - poles).

Το ισοδύναμο κύκλωμα αυτής της συνδεσμολογίας είναι το εξής:



Σχήμα (4.47)- Ισοδύναμο κύκλωμα τοπολογίας σύνδεσης τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (DC bipolar connection with 1 more voltage source connected)

Αρχικά, παρουσιάζεται η περίπτωση 1 κατά την οποία $V_{dc1} + V_{dc2} = 0$ και $V_{dc1} + V_{dc2} - V_{dc3} = 0$ και στη συνέχεια η περίπτωση 2 κατά την οποία $V_{dc1} + V_{dc2} \neq 0$ και $V_{dc1} + V_{dc2} - V_{dc3} \neq 0$. Αυτό γίνεται για να γίνει εμφανές το γεγονός ότι η ύπαρξη των κυκλοφορούντων ρευμάτων οφείλεται στη διαφορά μεταξύ των διαφόρων τάσεων που τροφοδοτούν το φορτίο. Ακόμη, έχοντας τα αποτελέσματα και για τις δύο περιπτώσεις, μπορούμε να συγκρίνουμε τις εκάστοτε τιμές των ρευμάτων των γραμμών και του φορτίου, και να διαπιστώσουμε την επιβάρυνση στον διαμοιρασμό του φορτίου των πηγών, που προκαλούν τα κυκλοφορούντα ρεύματα.

4.3.2.1 – Περίπτωση 1^η: $V_{dc1} + V_{dc2} = 0$ και $V_{dc1} + V_{dc2} - V_{dc3} = 0$

Τα μεγέθη που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση του κυκλώματος δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

V_{out}	326 V
V_1	326 V
V_2	-326 V
V_3	652 V
P_L^+	1006,16 W
P_L^-	1006,16 W
P_L''	4024,65 W
$R_{L\Delta}^+$	105,625 Ω
$R_{L\Delta}^-$	105,625 Ω

$R_{L\Delta}''$	105,625 Ω
R_α	35,2083 Ω
R_b	35,2083 Ω
R_c	35,2083 Ω
R_1	1,2 Ω
R_2	1,2 Ω
R_3	1,2 Ω

Εφαρμόζοντας τους τύπους των ρευμάτων που προέκυψαν απ'την ανάλυση της συγκεκριμένης τοπολογίας, προκύπτουν για τα ρεύματα οι εξής τιμές:

$$I_1 = 3,052A$$

$$I_2 = 3,052A$$

$$I_3 = 6,103A$$

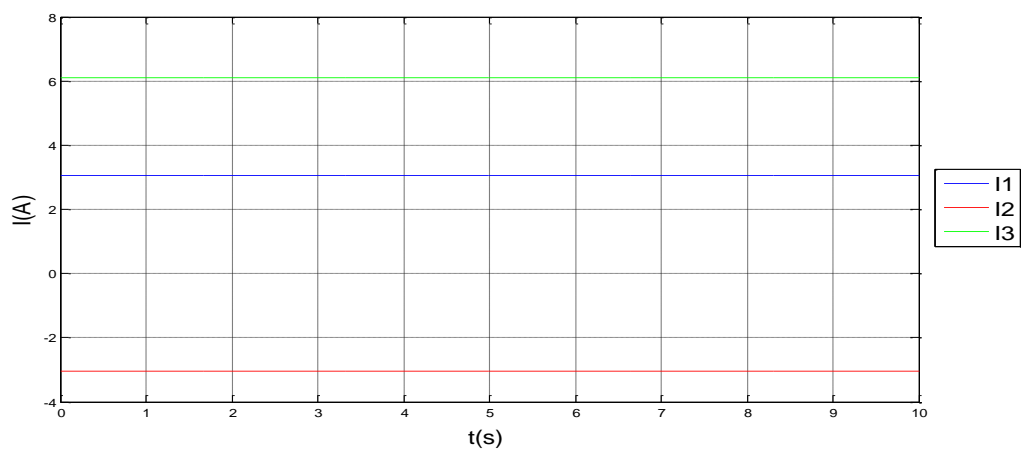
$$I_c = 0A$$

$$|I_1 + I_2| = 0A$$

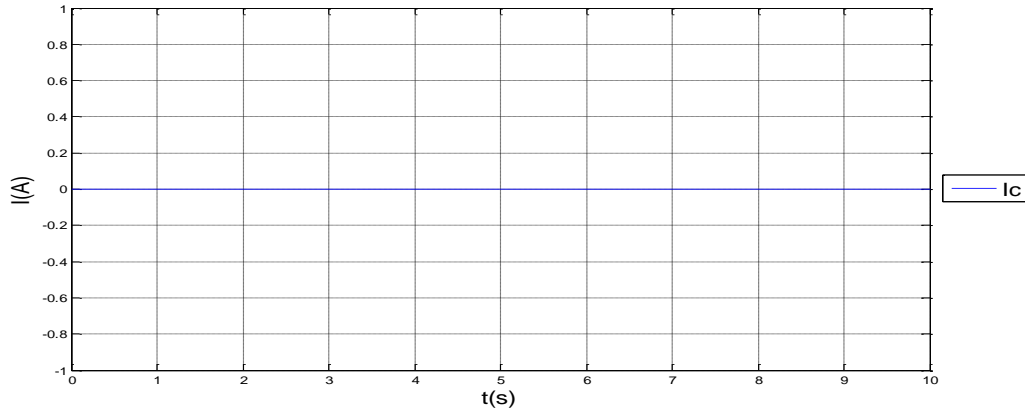
$$|2I_1 - I_3| = 0A$$

$$|2I_2 + I_3| = 0A$$

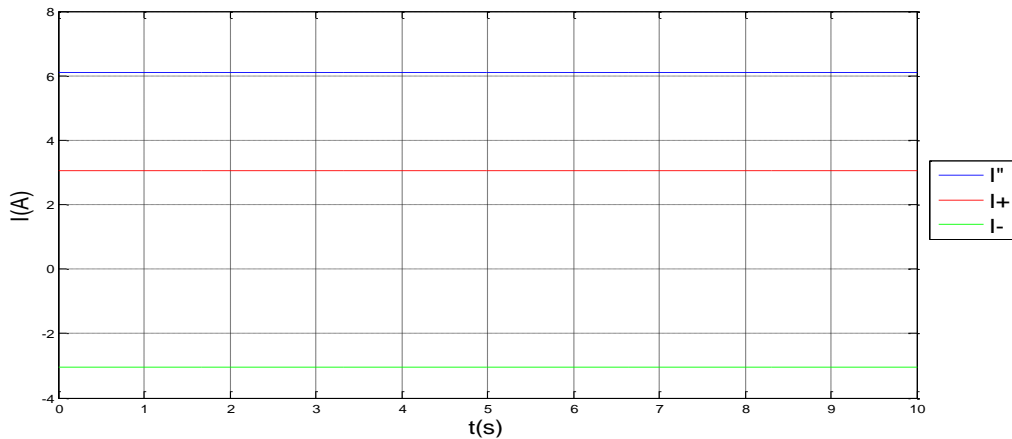
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δίνονται παρακάτω:



Σχήμα (4.48)- Ρεύματα I_1 , I_2 , I_3 της σύνδεσης τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (DC bipolar connection with 1 more voltage source connected between + - poles) με $V_{dc1} + V_{dc2} = 0$ και $V_{dc1} + V_{dc2} - V_{dc3} = 0$.



Σχήμα (4.49)-Κυκλοφορούν ρεύμα I_c της τοπολογίας σύνδεσης τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (DC bipolar connection with 1 more voltage source connected between + - poles) με $V_{dc1} + V_{dc2} = 0$ και $V_{dc1} + V_{dc2} - V_{dc3} = 0$.



Σχήμα (4.50)- Ρεύματα φορτίων I'' , I^+ , I^- της τοπολογίας σύνδεσης τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (DC bipolar connection with 1 more voltage source connected between + - poles) με $V_{dc1} + V_{dc2} = 0$ και $V_{dc1} + V_{dc2} - V_{dc3} = 0$.

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συμπίπτουν πλήρως με τα θεωρητικά αποτελέσματα. Όπως φαίνεται στο σχήμα (4.49), στην συγκεκριμένη τοπολογία δεν υπάρχουν κυκλοφορούντα ρεύματα όταν $V_{dc1} + V_{dc2} = 0$ και $V_{dc1} + V_{dc2} - V_{dc3} = 0$.

Τέλος, βλέπουμε τόσο απ'τα θεωρητικά αποτελέσματα, όσο και απ'το σχήμα (n.48) ότι το φορτίο ισομοιράζεται μεταξύ των γραμμών $|I_1 + I_2| = 0A$, $|2I_1 - I_3| = 0A$, $|2I_2 + I_3| = 0A$.

4.3.2.2 – Περίπτωση 2^η: $V_{dc1} + V_{dc2} \neq 0$ και $V_{dc1} + V_{dc2} - V_{dc3} \neq 0$

Τα μεγέθη που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση του κυκλώματος, λαμβάνοντας υπόψη το όριο του $\pm 5\%$ στη μεταβολή της τάσης εξόδου, δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

V_{out}	326 V
V_1	330 V
V_2	-315 V
V_3	670 V
P_L^+	1006,16 W
P_L^-	1006,16 W
P_L''	4024,65 W
$R_{L\Delta}^+$	105,625 Ω
$R_{L\Delta}^-$	105,625 Ω
$R_{L\Delta}''$	105,625 Ω
R_α	35,2083 Ω
R_b	35,2083 Ω
R_c	35,2083 Ω
R_1	1,2 Ω
R_2	1,2 Ω
R_3	1,2 Ω

Εφαρμόζοντας τους τύπους των ρευμάτων που προέκυψαν απ' την ανάλυση της συγκεκριμένης τοπολογίας, προκύπτουν για τα ρεύματα οι εξής τιμές:

$$I_1 = -3,777A$$

$$I_2 = 3,917A$$

$$I_3 = 13,138A$$

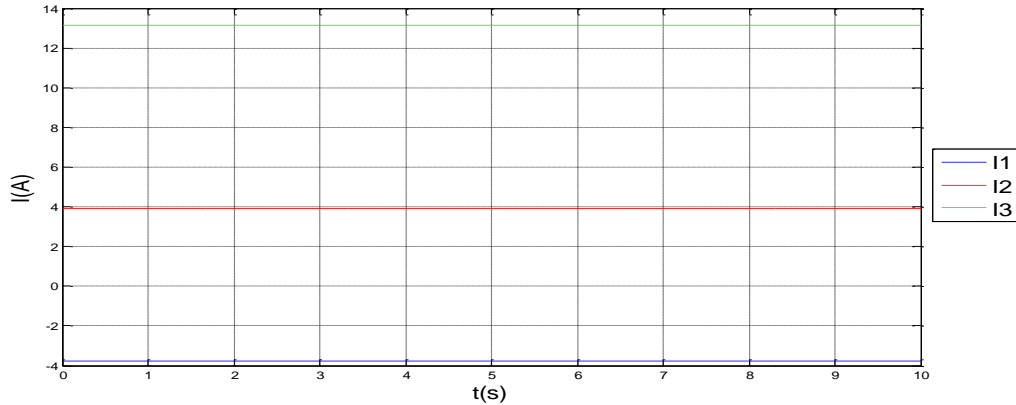
$$|I_c| = 6,866A$$

$$|I_1 + I_2| = 0,14A$$

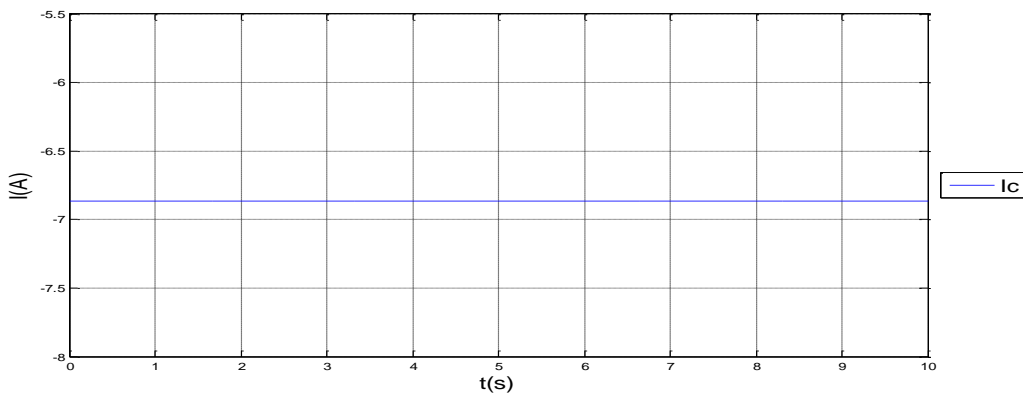
$$|2I_1 - I_3| = 5,584A$$

$$|2I_2 + I_3| = 20,972A$$

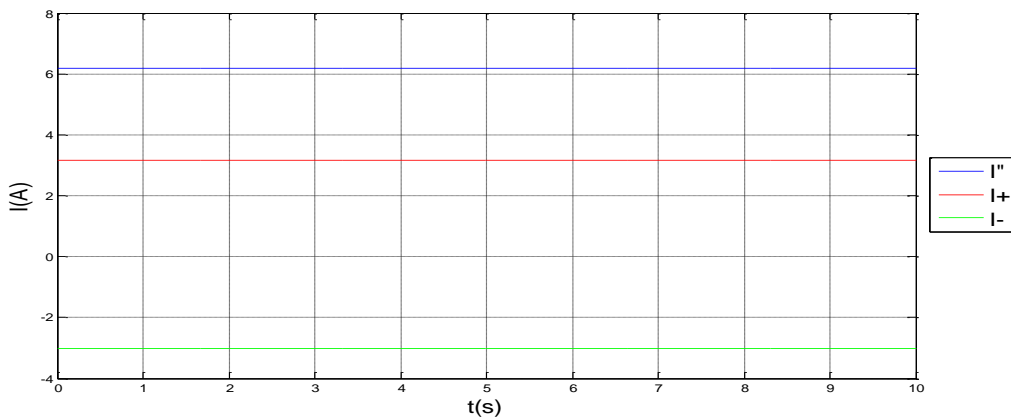
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δίνονται παρακάτω:



Σχήμα (4.51)- Ρεύματα I_1, I_2, I_3 της τοπολογίας σύνδεσης τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (DC bipolar connection with 1 more voltage source connected between + - poles) με $V_{dc1} + V_{dc2} \neq 0$ και $V_{dc1} + V_{dc2} - V_{dc3} \neq 0$.



Σχήμα (4.52)- Κυκλοφορούν ρεύμα I_c της σύνδεσης τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (DC bipolar connection with 1 more voltage source connected between + - poles) με $V_{dc1} + V_{dc2} \neq 0$ και $V_{dc1} + V_{dc2} - V_{dc3} \neq 0$.



Σχήμα (4.53)- Ρεύματα φορτίων I'', I^+, I^- της τοπολογίας σύνδεσης τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (DC bipolar connection with 1 more voltage source connected between + - poles) με $V_{dc1} + V_{dc2} \neq 0$ και $V_{dc1} + V_{dc2} - V_{dc3} \neq 0$.

Αρχικά, διαπιστώνουμε ότι τα θεωρητικά αποτελέσματα συμπίπτουν με αυτά της προσομοίωσης. Ακόμη, βλέπουμε στο σχήμα (4.52), ότι η μεταβολή των τάσεων προκαλεί τη δημιουργία κυκλοφορούντων ρευμάτων στην τοπολογία για $V_{dc1} + V_{dc2} \neq 0$ και $V_{dc1} + V_{dc2} - V_{dc3} \neq 0$.

Τέλος, όπως περιμέναμε, λόγω της ύπαρξης κυκλοφορούντων ρευμάτων στην τοπολογία, το φορτίο δεν ισομοιράζεται μεταξύ των γραμμών. Τα κυκλοφορούντα ρεύματα, λοιπόν, προκαλούν τη χειροτέρευση του current sharing. Αυτό γίνεται εμφανές και απ' το σχήμα (n.51), αλλά και απ' τα θεωρητικά αποτελέσματα $|I_1 + I_2| = 0,14A$, $|2I_1 - I_3| = 5,584A$, $|2I_2 + I_3| = 20,972A$.

4.4- Συμπεράσματα

Αρχικά, συγκρίνοντας τα θεωρητικά αποτελέσματα με αυτά της προσομοίωσης, βλέπουμε ότι συμπίπτουν. Επομένως, καταλαβαίνουμε πως οι σχέσεις στις οποίες καταλήξαμε απ' την ανάλυση της εκάστοτε τοπολογίας, επαληθεύονται μέσω της προσομοίωσης.

Επίσης, αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι σε όλες τις τοπολογίες, η ανισορροπία μεταξύ των τάσεων τροφοδοσίας, δημιουργεί κυκλοφορούντα ρεύματα. Αν εξαιρέσουμε την τοπολογία «Bipolar DC connection», όπου τα κυκλοφορούντα ρεύματα έχουν πολύ μικρή τιμή, στις υπόλοιπες τοπολογίες οι τιμές των κυκλοφορούντων ρευμάτων είναι αρκετές φορές υψηλότερες από τις τιμές των ρευμάτων που τροφοδοτούν το φορτίο.

Τέλος, γίνεται εμφανές, ότι η ύπαρξη κυκλοφορούντων ρευμάτων δημιουργεί ανισορροπία μεταξύ των ρευμάτων των γραμμών, χειροτερεύοντας το current sharing της εκάστοτε τοπολογίας. Η διαπίστωση αυτή, επιβεβαιώνει το συλλογισμό μας ότι η βελτίωση του current sharing μέσω της προσθήκης επιπλέον αντιστάσεων γραμμών, καταστέλλει τα κυκλοφορούντα ρεύματα. Υπενθυμίζουμε ότι αυτός είναι ο βασικός άξονας πάνω στον οποίο στηριχθήκαμε για την εφαρμογή του πρωτογενούς ελέγχου Droop Index, όπως εξηγήσαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο.

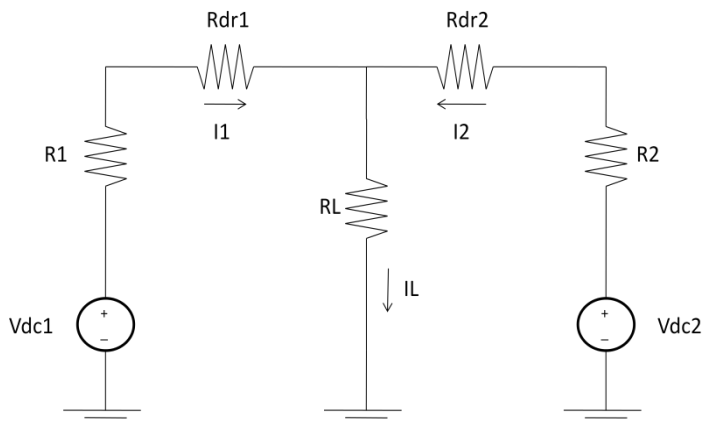
4.5- Εφαρμογή του Droop Index στις τοπολογίες και παρουσίαση των αποτελεσμάτων

Στην ενότητα αυτή εφαρμόζουμε την μέθοδο του πρωτογενούς ελέγχου Droop Index σε όλες τις παραπάνω συνδεσμολογίες, όπως αυτή αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Σκοπός μας είναι να επαληθεύσουμε το γεγονός ότι αυτή η μορφή ελέγχου καταστέλλει μέχρι ένα σημείο τα κυκλοφορούντα ρεύματα, μέσω του ίσου διαμοιρασμού του φορτίου μεταξύ των γραμμών.

4.5.1- Εφαρμογή του Droop Index στην τοπολογία σύνδεσης δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Droop Index in Two terminal DC unipolar connection)

Το ισοδύναμο κύκλωμα της συνδεσμολογίας είναι το εξής:



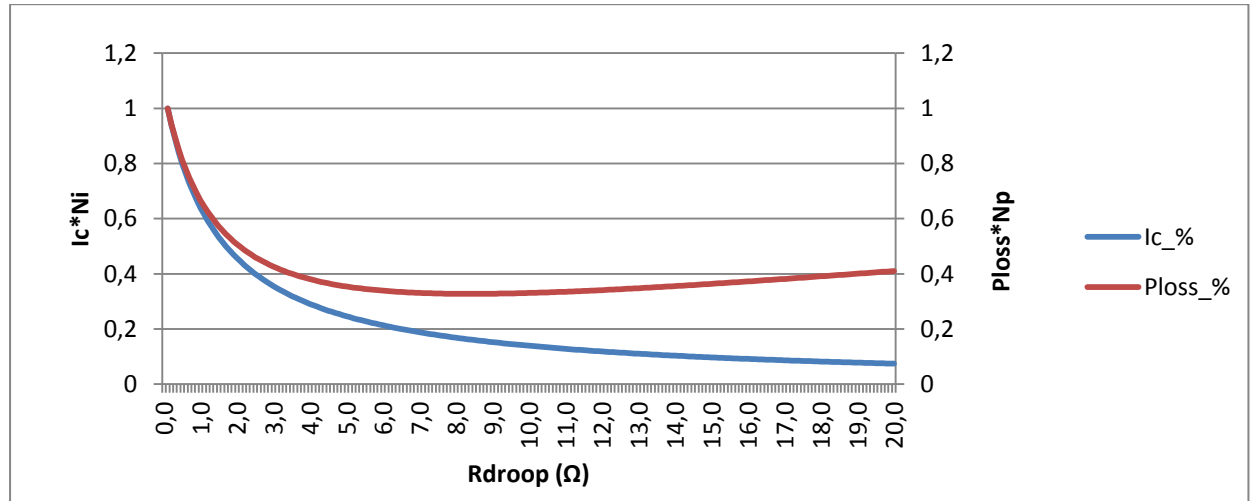
Σχήμα (4.54)- Ισοδύναμο κύκλωμα εφαρμογής του Droop Index στην τοπολογία σύνδεσης δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Droop Index in Two terminal DC unipolar connection).

Όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο που αναλύεται η μέθοδος Droop Index, προστίθεται σε κάθε γραμμή της τοπολογίας μία αντίσταση R_{droop} , με σκοπό την μείωση των κυκλοφορούντων ρευμάτων στο κύκλωμα. Ωστόσο, η επιπλέον αντίσταση R_{droop} κάθε γραμμής, έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή των απωλειών ισχύος πάνω στις ωμικές αντιστάσεις των γραμμών. Προκειμένου να λάβουμε υπ' όψη και τις δύο αυτές συνιστώσες του προβλήματος, η τιμή της R_{dr2} επιλέγεται από ένα εύρος τιμών, έτσι ώστε να έχω την ελάχιστη τιμή της παράστασης $DI = \left\{ \frac{1}{2} * N_i * |I_c| + \frac{1}{2} * N_p * P_{loss} \right\}$.

Εφαρμόζοντας τις σχέσεις που αφορούν τον υπολογισμό των R_{droop} με τη βοήθεια ενός προγράμματος που δημιουργήσαμε στη Matlab (βλ. Παράρτημα) και χρησιμοποιώντας τα μεγέθη που χρησιμοποιήσαμε στην τοπολογία του σχήματος (4.2) για $V_{dc1} \neq V_{dc2}$,

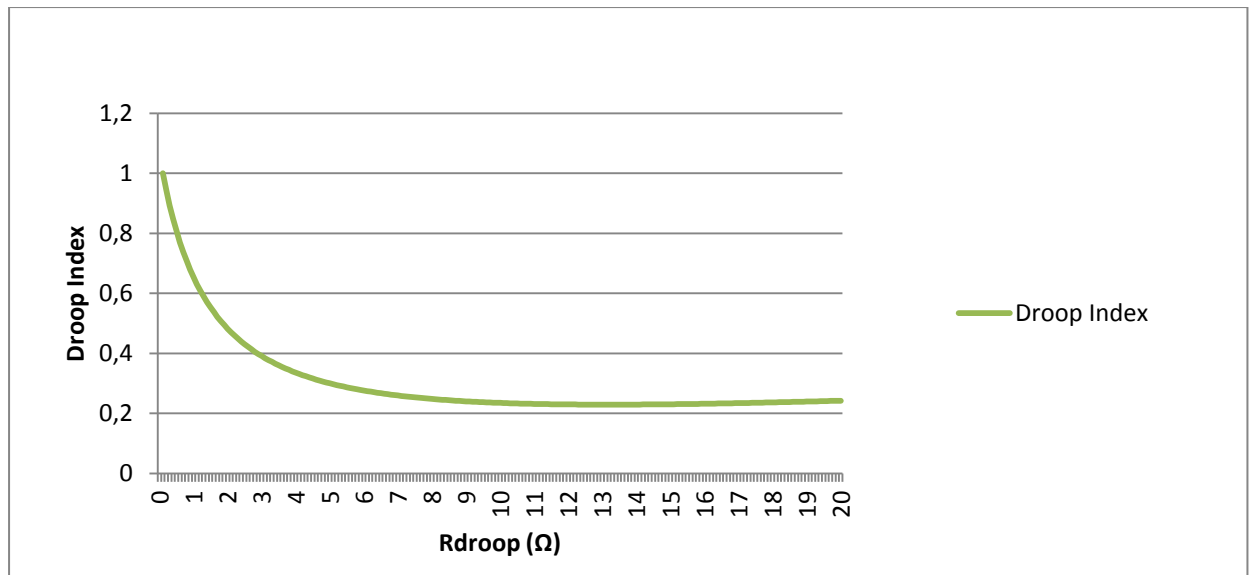
V_{out}	326 V
V_1	335 V
V_2	310 V
P_L	1006,16 W
R_L	105,625 Ω
R_1	1,4 Ω
R_2	0,8 Ω

προέκυψαν το διάγραμμα μεταβολής των κανονικοποιημένων απωλειών και του κανονικοποιημένου κυκλοφορούντος ρεύματος καθώς μεταβάλλουμε την R_{dr2} , όπως επίσης και το διάγραμμα μεταβολής του Droop Index συναρτήσει της R_{dr2} .



Σχήμα (4.55)- Διάγραμμα μεταβολής των κανονικοποιημένων απωλειών ισχύος και του κανονικοποιημένου κυκλοφορούντος ρεύματος, συναρτήσει της R_{dr2} .

Στο σχήμα (4.55) φαίνεται η μεταβολή των απωλειών ισχύος και του κυκλοφορούντος ρεύματος της τοπολογίας, καθώς αλλάζουμε την τιμή της R_{dr2} . Βλέπουμε ότι με την αύξηση της τιμής της R_{dr2} , το κυκλοφορούν ρεύμα συνεχώς μειώνεται, ενώ οι απώλειες ισχύος μειώνονται μέχρι ένα κατώτατο σημείο και μετά αυξάνονται. Αυτό συμβαίνει διότι αρχικά, η τιμή του κυκλοφορούντος ρεύματος είναι αρκετά μεγάλη και επηρεάζει περισσότερο τις απώλειες ισχύος των γραμμών, απ' ό,τι η τιμή της συνολικής αντίστασης $R = R_{γραμμής} + R_{dr2}$ ($P_{loss} = I^2 * R$). Απ' το σημείο όπου οι απώλειες φτάνουν την ελάχιστη τιμή τους και μετά, η ύπαρξη της R_{dr2} έχει ελαττώσει το κυκλοφορούν ρεύμα σε σημείο που η τιμή της συνολικής αντίστασης γραμμής επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό τις απώλειες ισχύος, απ' ό,τι η τιμή του ρεύματος. Έτσι περαιτέρω αύξηση της R_{dr2} έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών.



Σχήμα (4.56)- Διάγραμμα μεταβολής του Droop Index συναρτήσει της R_{dr2} .

Στο σχήμα (4.56) βλέπουμε την μεταβολή του Droop Index καθώς μεταβάλλουμε την τιμή της R_{dr2} . Αρχικά, οι υψηλές τιμές απωλειών και κυκλοφορούντος ρεύματος έχουν ως αποτέλεσμα την υψηλή τιμή του DI. Καθώς οι τιμές απωλειών και κυκλοφορούντος ρεύματος μειώνονται, μειώνεται και η τιμή του DI. Φτάνοντας στο σημείο που οι απώλειες ισχύος της τοπολογίας ξεκινούν να αυξάνονται με την αύξηση της R_{dr2} , παρατηρούμε ότι το DI συνεχίζει να μειώνεται μέχρι να φτάσει την ελάχιστη τιμή του. Αυτό συμβαίνει διότι ο ρυθμός αύξησης των απωλειών ισχύος είναι μικρότερος απ' τον ρυθμό μείωσης του κυκλοφορούντος ρεύματος. Πέρα του ελάχιστου σημείου της καμπύλης, ο ρυθμός αύξησης των απωλειών ισχύος γίνει μεγαλύτερος απ' τον ρυθμό μείωσης του κυκλοφορούντος ρεύματος, τότε το DI αρχίζει να αυξάνεται με την αύξηση της R_{dr2} . Η τιμή της R_{dr2} στο ελάχιστο σημείο τη καμπύλης είναι ουσιαστικά αυτή που ελαχιστοποιεί την παράσταση $DI = \left\{ \frac{1}{2} * N_i * |I_c| + \frac{1}{2} * N_p * P_{loss} \right\}$, άρα η τιμή της R_{dr2} που επιλέγουμε να προσθέσουμε στην τοπολογία για την καταστολή του κυκλοφορούντος ρεύματος. Έχοντας υπολογίσει την R_{dr2} , ο υπολογισμός της R_{dr1} γίνεται με τον τρόπο που αναφέραμε στο κεφάλαιο όπου αναλύεται πλήρως η μέθοδος Droop Index και η εφαρμογή της.

Οι τιμές των R_{droop} που προκύπτουν είναι οι παρακάτω:

$$R_{dr1} = 10,56\Omega$$

$$R_{dr2} = 13,2\Omega$$

Τα μεγέθη των ρευμάτων μετά την προσθήκη των R_{droop} στην τοπολογία, είναι βάση των θεωρητικών σχέσεων τα παρακάτω:

$$I_1 = 2,549A$$

$$I_2 = 0,339A$$

$$I_{c12} = 0,945A$$

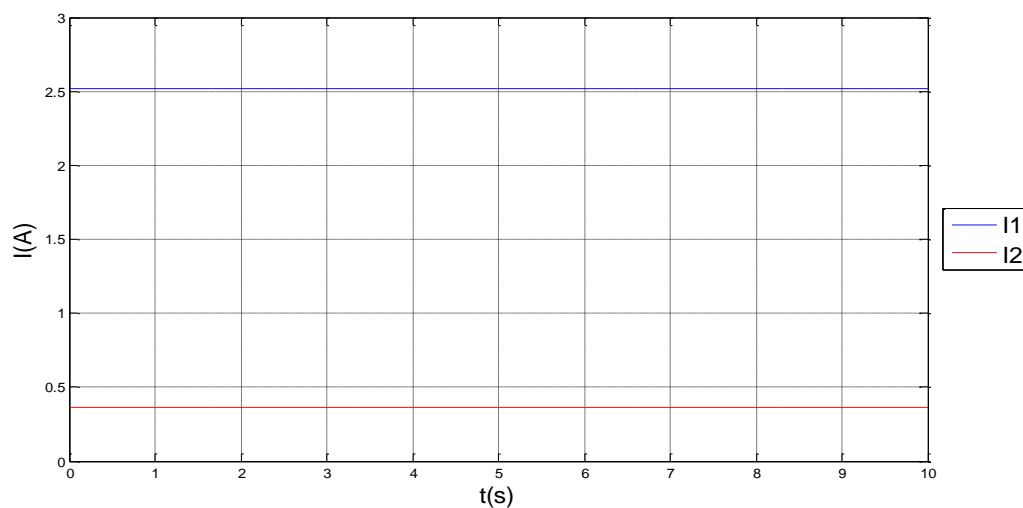
$$|I_1 - I_2| = 2,221A$$

Ακολουθεί ο πίνακας σύγκρισης των ρευμάτων με R_{droop} και χωρίς:

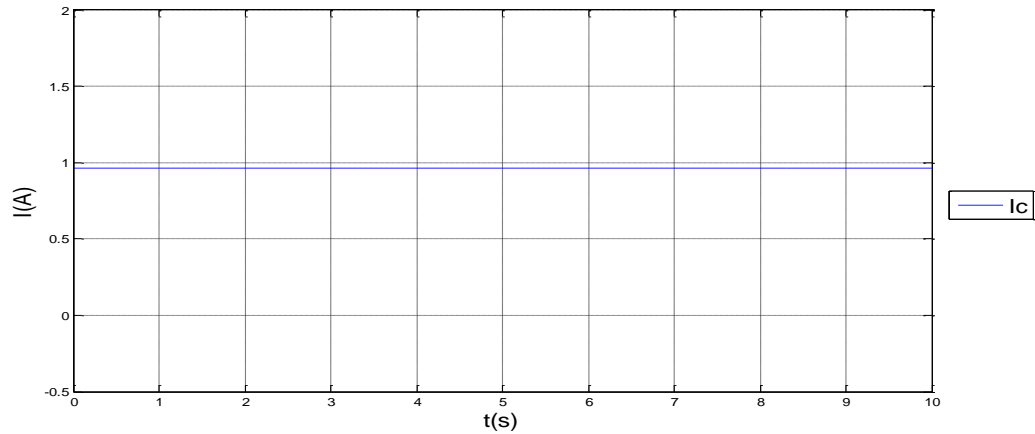
Με R_{droop}	Χωρίς R_{droop}
$I_1 = 2,549A$	$I_1 = 12,514A$
$I_2 = 0,339A$	$I_2 = -9,496A$
$I_L = 2,888A$	$I_L = 3,018A$
$I_{c12} = 0,945A$	$I_{c12} = 11,364A$
$ I_1 - I_2 = 2,221A$	$ I_1 - I_2 = 22,010A$

Παρατηρούμε ότι μέσω της μεθόδου Droop Index καταφέραμε να ελαττώσουμε το κυκλοφορούν ρεύμα της τοπολογίας κατά $10,419A$. Ακόμη βλέπουμε ότι το φορτίο μοιράζεται με καλύτερο τρόπο μεταξύ των γραμμών καθώς το μέγεθος $|I_1 - I_2|$ ελαττώθηκε κατά $19,789A$. Ταυτόχρονα παρατηρούμε ότι το ρεύμα που τροφοδοτεί το φορτίο παρουσιάζει μια πολύ μικρή πτώση της τάξης των $0,13A$.

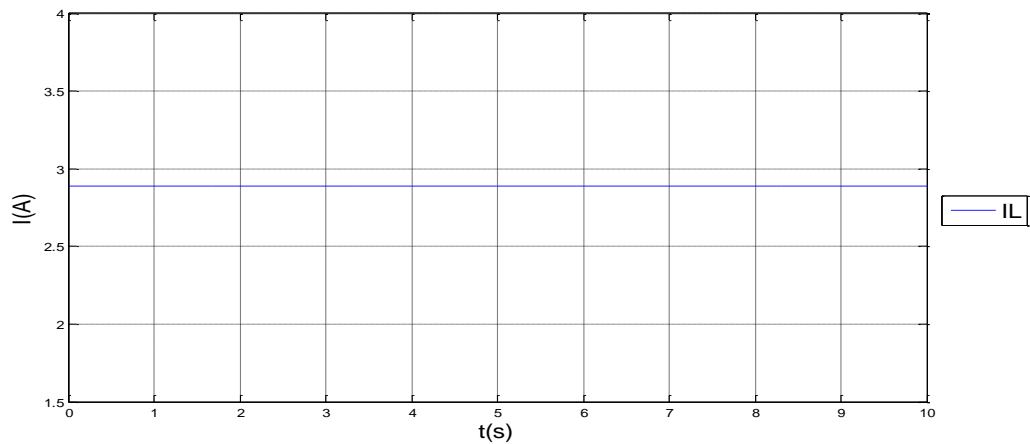
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις συγκεκριμένες τιμές των R_{dr1} και R_{dr2} είναι τα παρακάτω:



Σχήμα (4.57)- Ρεύματα I_1, I_2 στο ισοδύναμο κύκλωμα εφαρμογής του Droop Index στην τοπολογία σύνδεσης δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Droop Index in Two terminal DC unipolar connection).



Σχήμα (4.58)-Κυκλοφορούν ρεύμα I_c στο ισοδύναμο κύκλωμα εφαρμογής του Droop Index στην τοπολογία σύνδεσης δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Droop Index in Two terminal DC unipolar connection).

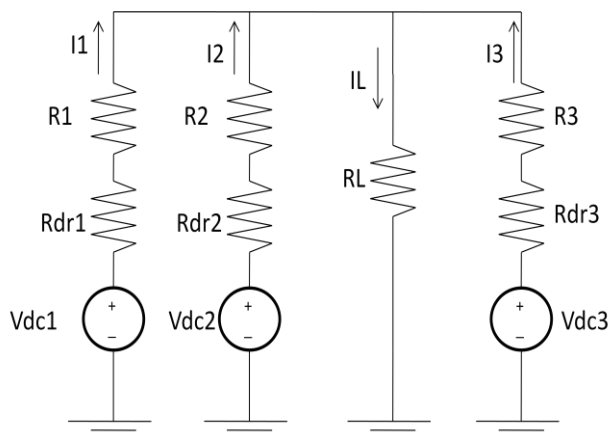


Σχήμα (4.59)- Ρεύμα φορτίου I_L στο ισοδύναμο κύκλωμα εφαρμογής του Droop Index στην τοπολογία σύνδεσης δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Droop Index in Two terminal DC unipolar connection).

Βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι σε πλήρη συμφωνία με τα θεωρητικά αποτελέσματα. Στο σχήμα (4.58) βλέπουμε ότι η τιμή του κυκλοφορούντος ρεύματος μετά την προσθήκη των R_{droop} στην τοπολογία, έχει μειωθεί πάρα πολύ, γεγονός το οποίο οδηγεί σε καλύτερο διαμοιρασμό φορτίου (current sharing) μεταξύ των πηγών, όπως φαίνεται και στο σχήμα (4.57).

4.5.2- Εφαρμογή του Droop Index στην τοπολογία σύνδεσης n πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Droop Index in n terminal DC unipolar connection)

Για n=3, το ισοδύναμο κύκλωμα της συνδεσμολογίας είναι το εξής:



Σχήμα (4.60)- Ισοδύναμο κύκλωμα εφαρμογής του Droop Index στην τοπολογία σύνδεσης τριών πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Droop Index in three terminal DC unipolar connection).

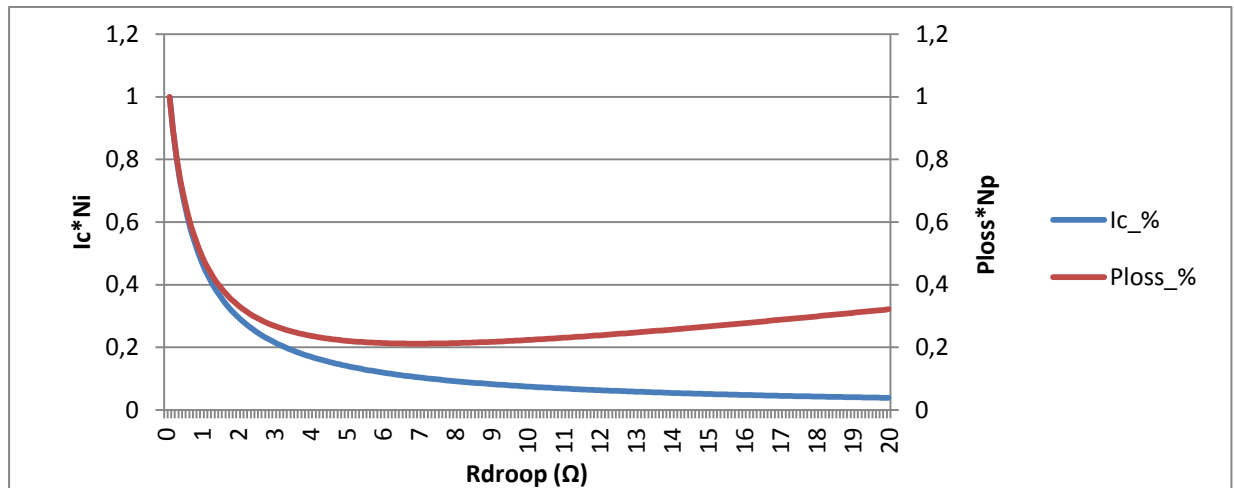
Όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο που αναλύεται η μέθοδος Droop Index, προστίθεται σε κάθε γραμμή της τοπολογίας μία αντίσταση R_{droop} , με σκοπό την μείωση των κυκλοφορούντων ρευμάτων στο κύκλωμα. Ωστόσο, η επιπλέον αντίσταση R_{droop} κάθε γραμμής, έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή των απωλειών ισχύος πάνω στις ωμικές αντιστάσεις των γραμμών. Προκειμένου να λάβουμε υπ' όψη και τις δύο αυτές συνιστώσες του προβλήματος, η τιμή της R_{dr2} επιλέγεται από ένα εύρος τιμών, έτσι ώστε να έχω την ελάχιστη τιμή της παράστασης $DI = \left\{ \frac{1}{2} * N_i * |I_c| + \frac{1}{2} * N_p * P_{loss} \right\}$. Εδώ, λόγω της ύπαρξης παραπάνω από δύο πηγών, η συνιστώσα που αφορά τα κυκλοφορούντα ρεύματα μεταξύ των πηγών, ορίζεται ως $|I_c| = |I_{c12}| + |I_{c13}| + |I_{c23}|$.

Εφαρμόζοντας τις σχέσεις που αφορούν τον υπολογισμό των R_{droop} με τη βοήθεια ενός προγράμματος που δημιουργήσαμε στη Matlab (βλ. Παράρτημα) και χρησιμοποιώντας τα μεγέθη που χρησιμοποιήσαμε στην τοπολογία του σχήματος (4.10) για $V_{dc1} \neq V_{dc2} \neq V_{dc3}$,

V_{out}	326 V
V_1	335 V
V_2	310 V
V_3	320 V
P_L	1006,16 W
R_L	105,625 Ω
R_1	1,1 Ω

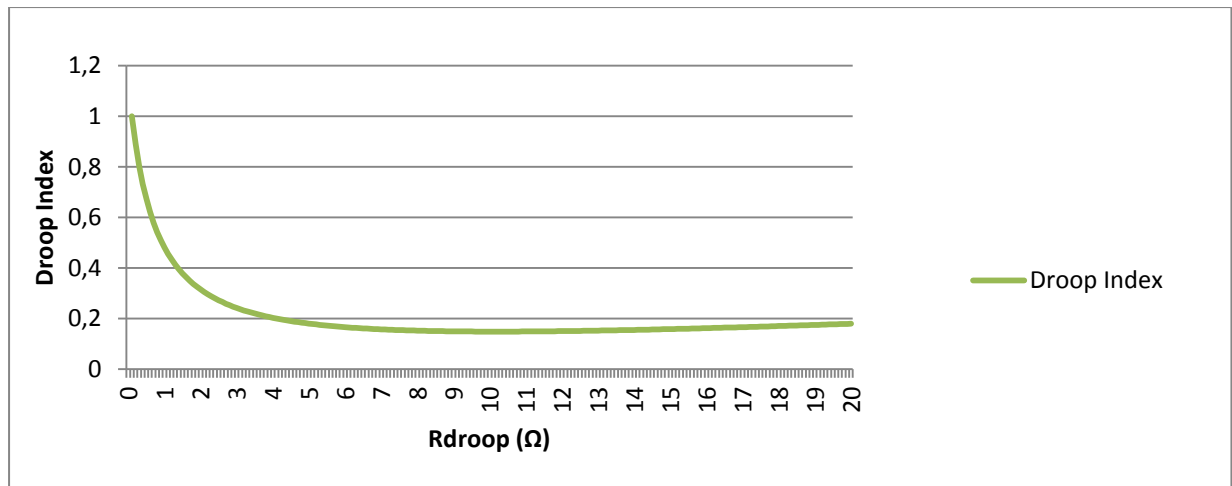
R_2	0,7 Ω
R_3	1,2 Ω

προέκυψαν το διάγραμμα μεταβολής των κανονικοποιημένων απωλειών και του κανονικοποιημένου κυκλοφορούντος ρεύματος καθώς μεταβάλλουμε την R_{dr2} , όπως επίσης και το διάγραμμα μεταβολής του Droop Index συναρτήσει της R_{dr2} .



Σχήμα (4.61)- Διάγραμμα μεταβολής των κανονικοποιημένων απωλειών ισχύος και του κανονικοποιημένου κυκλοφορούντος ρεύματος, συναρτήσει της R_{dr2} .

Στο σχήμα (4.61) φαίνεται η μεταβολή των απωλειών ισχύος και του κυκλοφορούντος ρεύματος της τοπολογίας, καθώς αλλάζουμε την τιμή της R_{dr2} . Βλέπουμε ότι με την αύξηση της τιμής της R_{dr2} , το κυκλοφορούν ρεύμα συνεχώς μειώνεται, ενώ οι απώλειες ισχύος μειώνονται μέχρι ένα κατώτατο σημείο και μετά αυξάνονται. Αυτό συμβαίνει διότι αρχικά, η τιμή του κυκλοφορούντος ρεύματος είναι αρκετά μεγάλη και επηρεάζει περισσότερο τις απώλειες ισχύος των γραμμών, απ' ό,τι η τιμή της συνολικής αντίστασης $R = R_{γραμμής} + R_{dr2}$ ($P_{loss} = I^2 * R$). Απ' το σημείο όπου οι απώλειες φτάνουν την ελάχιστη τιμή τους και μετά, η ύπαρξη της R_{dr2} έχει ελαττώσει το κυκλοφορούν ρεύμα σε σημείο που η τιμή της συνολικής αντίστασης γραμμής επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό τις απώλειες ισχύος, απ' ό,τι η τιμή του ρεύματος. Έτσι περαιτέρω αύξηση της R_{dr2} έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών.



Σχήμα (4.62)- Διάγραμμα μεταβολής του Droop Index συναρτήσει της R_{dr2} .

Στο σχήμα (4.62) βλέπουμε την μεταβολή του Droop Index καθώς μεταβάλλουμε την τιμή της R_{dr2} . Αρχικά, οι υψηλές τιμές απωλειών και κυκλοφορούντος ρεύματος έχουν ως αποτέλεσμα την υψηλή τιμή του DI. Καθώς οι τιμές απωλειών και κυκλοφορούντος ρεύματος μειώνονται, μειώνεται και η τιμή του DI. Φτάνοντας στο σημείο που οι απώλειες ισχύος της τοπολογίας ξεκινούν να αυξάνονται με την αύξηση της R_{dr2} , παρατηρούμε ότι το DI συνεχίζει να μειώνεται μέχρι να φτάσει την ελάχιστη τιμή του. Αυτό συμβαίνει διότι ο ρυθμός αύξησης των απωλειών ισχύος είναι μικρότερος απ' τον ρυθμό μείωσης του κυκλοφορούντος ρεύματος. Πέρα του ελάχιστου σημείου της καμπύλης, ο ρυθμός αύξησης των απωλειών ισχύος γίνει μεγαλύτερος απ' τον ρυθμό μείωσης του κυκλοφορούντος ρεύματος, τότε το DI αρχίζει να αυξάνεται με την αύξηση της R_{dr2} . Η τιμή της R_{dr2} στο ελάχιστο σημείο της καμπύλης είναι ουσιαστικά αυτή που ελαχιστοποιεί την παράσταση $DI = \left\{ \frac{1}{2} * N_i * |I_c| + \frac{1}{2} * N_p * P_{loss} \right\}$, άρα η τιμή της R_{dr2} που επιλέγουμε να προσθέσουμε στην τοπολογία για την καταστολή του κυκλοφορούντος ρεύματος. Έχοντας υπολογίσει την R_{dr2} , ο υπολογισμός της R_{dr1} γίνεται με τον τρόπο που αναφέραμε στο κεφάλαιο όπου αναλύεται πλήρως η μέθοδος Droop Index και η εφαρμογή της.

Οι τιμές των R_{droop} που προκύπτουν είναι οι παρακάτω:

$$R_{dr1} = 16,02857\Omega$$

$$R_{dr2} = 10,2\Omega$$

$$R_{dr3} = 17,48571\Omega$$

Τα μεγέθη των ρευμάτων μετά την προσθήκη των R_{droop} στην τοπολογία, είναι βάση των θεωρητικών σχέσεων τα παρακάτω:

$$I_1 = 1,770A$$

$$I_2 = 0,424A$$

$$I_3 = 0,807A$$

$$I_{c1} = 0,888A$$

$$I_{c2} = -0,899A$$

$$I_{c3} = 0,011A$$

$$|I_1 - I_2| = 1,346A$$

$$|I_1 - I_3| = 0,963A$$

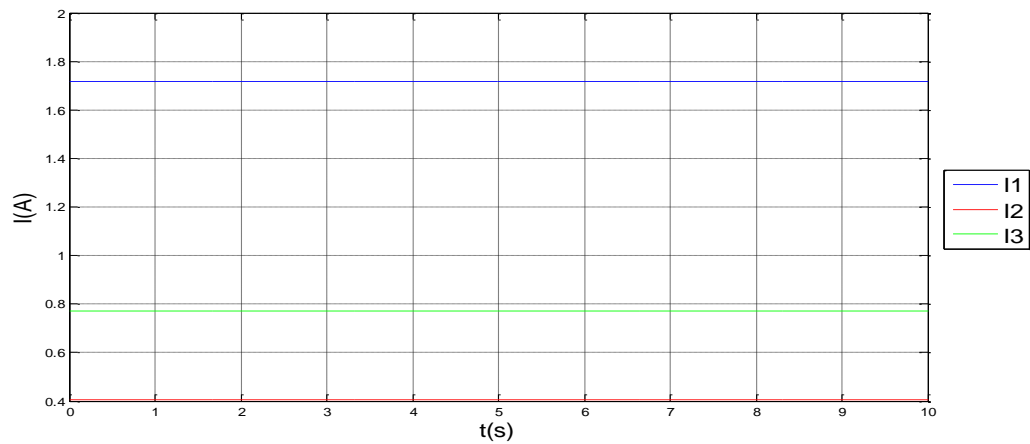
$$|I_2 - I_3| = 0,383A$$

Ακολουθεί ο πίνακας σύγκρισης των ρευμάτων με R_{droop} και χωρίς:

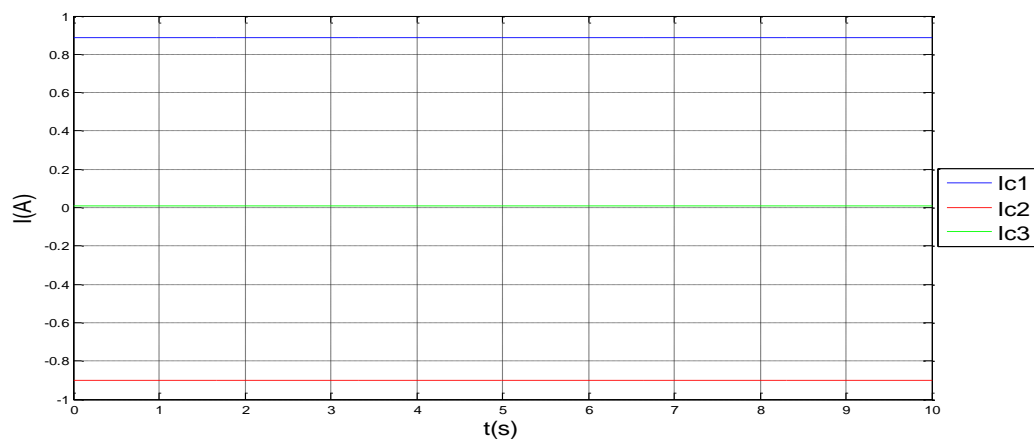
Με R_{droop}	Χωρίς R_{droop}
$I_1 = 1,770A$	$I_1 = 14,732A$
$I_2 = 0,424A$	$I_2 = -12,671A$
$I_3 = 0,807A$	$I_3 = 0,966A$
$I_{c1} = 0,888A$	$I_{c1} = 13,823A$
$I_{c2} = -0,899A$	$I_{c2} = -13,993A$
$I_{c3} = 0,011A$	$I_{c3} = 0,17A$
$ I_1 - I_2 = 1,346A$	$ I_1 - I_2 = 27,403A$
$ I_1 - I_3 = 0,963A$	$ I_1 - I_3 = 13,766A$
$ I_2 - I_3 = 0,383A$	$ I_2 - I_3 = 13,637A$
$I_L = 3,001A$	$I_L = 3,027A$

Παρατηρούμε ότι μέσω της μεθόδου Droop Index καταφέραμε να ελαττώσουμε τα κυκλοφορούντα ρεύματα της τοπολογίας. Πιο συγκεκριμένα, $|I_{c1\chi\omega\rho\rho\rho Rdr} - I_{c1\mu\epsilon Rdr}| = 12,935A$, $|I_{c2\chi\omega\rho\rho\rho Rdr} - I_{c2\mu\epsilon Rdr}| = 13,904A$, $|I_{c3\chi\omega\rho\rho\rho Rdr} - I_{c3\mu\epsilon Rdr}| = 0,159A$. Ακόμη βλέπουμε ότι το φορτίο μοιράζεται με καλύτερο τρόπο μεταξύ των γραμμών καθώς το μέγεθος $|I_1 - I_2|$ ελαττώθηκε κατά $26,057A$, το $|I_1 - I_3|$ κατά $12,803A$ και το $|I_2 - I_3|$ κατά $13,254A$. Ταυτόχρονα παρατηρούμε ότι το ρεύμα που τροφοδοτεί το φορτίο παρουσιάζει μια πολύ μικρή πτώση της τάξης των $0,026A$.

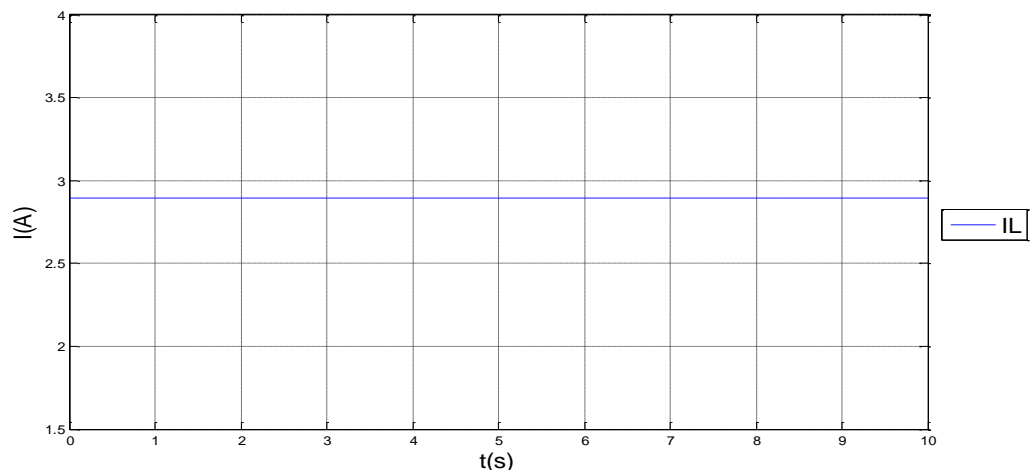
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις συγκεκριμένες τιμές των R_{dr1} , R_{dr2} και R_{dr3} είναι τα παρακάτω:



Σχήμα (4.63)- Ρεύματα I_1, I_2, I_3 στο ισοδύναμο κύκλωμα εφαρμογής του Droop Index στην τοπολογία σύνδεσης τριών πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Droop Index in three terminal DC unipolar connection).



Σχήμα (4.64)-Κυκλοφορούντα ρεύματα I_{c1}, I_{c2}, I_{c3} στο ισοδύναμο κύκλωμα εφαρμογής του Droop Index στην τοπολογία σύνδεσης τριών πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Droop Index in three terminal DC unipolar connection).

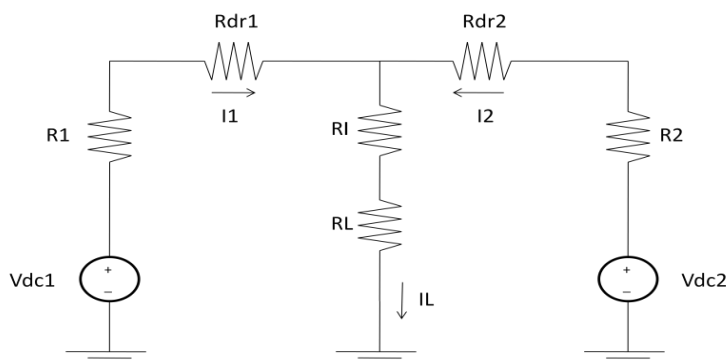


Σχήμα (4.65)- Ρεύμα φορτίου I_L στο ισοδύναμο κύκλωμα εφαρμογής του Droop Index στην τοπολογία σύνδεσης τριών πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Droop Index in three terminal DC unipolar connection).

Βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι σε πλήρη συμφωνία με τα θεωρητικά αποτελέσματα. Στο σχήμα (4.64) βλέπουμε ότι οι τιμές των κυκλοφορούντων ρευμάτων μετά την προσθήκη των R_{droop} στην τοπολογία, έχουν μειωθεί πάρα πολύ, γεγονός το οποίο οδηγεί σε καλύτερο διαμοιρασμό φορτίου (current sharing) μεταξύ των πηγών, όπως φαίνεται και στο σχήμα (4.63).

4.5.3- Εφαρμογή του Droop Index στην τοπολογία κοινής σύνδεσης δύο παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Droop Index in One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources)

Το ισοδύναμο κύκλωμα της συνδεσμολογίας είναι το εξής:



Σχήμα (4.66)- Ισοδύναμο κύκλωμα εφαρμογής του Droop Index στην τοπολογία κοινής σύνδεσης δύο παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Droop Index in One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources).

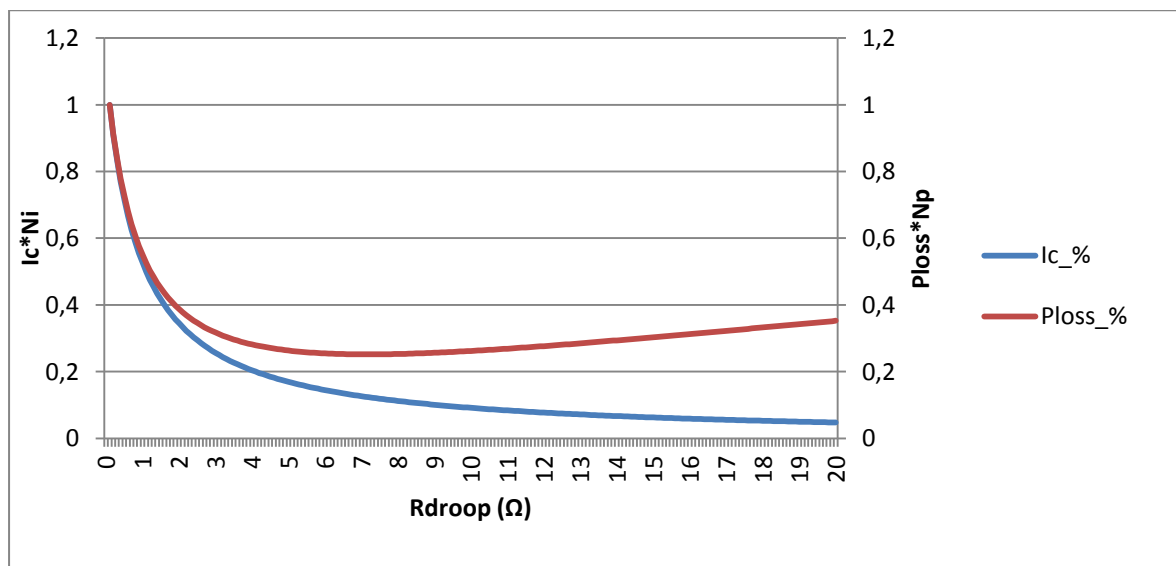
Όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο που αναλύεται η μέθοδος Droop Index, προστίθεται σε κάθε γραμμή της τοπολογίας μία αντίσταση R_{droop} , με σκοπό την μείωση των κυκλοφορούντων ρευμάτων στο κύκλωμα. Ωστόσο, η επιπλέον αντίσταση R_{droop} κάθε γραμμής, έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή των απωλειών ισχύος πάνω στις ωμικές αντιστάσεις των γραμμών. Προκειμένου να λάβουμε υπ'όψη και τις δύο αυτές συνιστώσες του προβλήματος, η τιμή της R_{dr2} επιλέγεται από ένα εύρος τιμών, έτσι ώστε να έχω την ελάχιστη τιμή της παράστασης $DI = \left\{ \frac{1}{2} * N_i * |I_c| + \frac{1}{2} * N_p * P_{loss} \right\}$.

Εφαρμόζοντας τις σχέσεις που αφορούν τον υπολογισμό των R_{droop} με τη βοήθεια ενός προγράμματος που δημιουργήσαμε στη Matlab (βλ. Παράρτημα) και χρησιμοποιώντας τα μεγέθη που χρησιμοποιήσαμε στην τοπολογία του σχήματος (4.20) για $V_{dc1} \neq V_{dc2}$,

V_{out}	326 V
V_1	330 V
V_2	310 V
P_L	1006,16 W

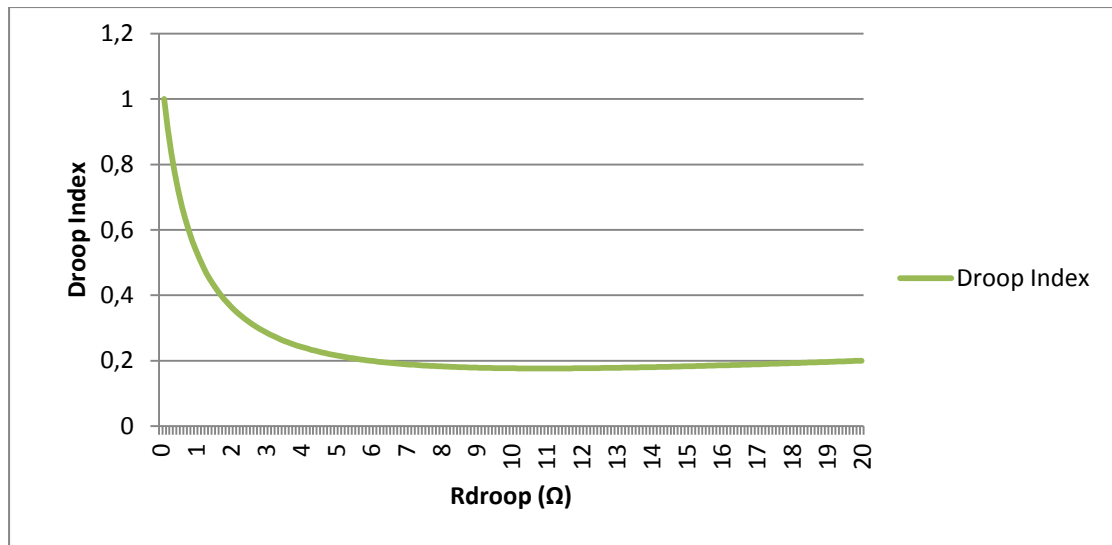
R_L	105,625 Ω
R_1	0,7 Ω
R_2	0,9 Ω
R_l	1,4 Ω

προέκυψαν το διάγραμμα μεταβολής των κανονικοποιημένων απωλειών και του κανονικοποιημένου κυκλοφορούντος ρεύματος καθώς μεταβάλλουμε την R_{dr2} , όπως επίσης και το διάγραμμα μεταβολής του Droop Index συναρτήσει της R_{dr2} .



Σχήμα (4.67)- Διάγραμμα μεταβολής των κανονικοποιημένων απωλειών ισχύος και του κανονικοποιημένου κυκλοφορούντος ρεύματος, συναρτήσει της R_{dr2} .

Στο σχήμα (4.67) φαίνεται η μεταβολή των απωλειών ισχύος και του κυκλοφορούντος ρεύματος της τοπολογίας, καθώς αλλάζουμε την τιμή της R_{dr2} . Βλέπουμε ότι με την αύξηση της τιμής της R_{dr2} , το κυκλοφορούν ρεύμα συνεχώς μειώνεται, ενώ οι απώλειες ισχύος μειώνονται μέχρι ένα κατώτατο σημείο και μετά αυξάνονται. Αυτό συμβαίνει διότι αρχικά, η τιμή του κυκλοφορούντος ρεύματος είναι αρκετά μεγάλη και επηρεάζει περισσότερο τις απώλειες ισχύος των γραμμών, απ' ό,τι η τιμή της συνολικής αντίστασης $R = R_{γραμμής} + R_{dr2}$ ($P_{loss} = I^2 * R$). Απ' το σημείο όπου οι απώλειες φτάνουν την ελάχιστη τιμή τους και μετά, η ύπαρξη της R_{dr2} έχει ελαττώσει το κυκλοφορούν ρεύμα σε σημείο που η τιμή της συνολικής αντίστασης γραμμής επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό τις απώλειες ισχύος, απ' ό,τι η τιμή του ρεύματος. Έτσι περαιτέρω αύξηση της R_{dr2} έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών.



Σχήμα (4.68)- Διάγραμμα μεταβολής του Droop Index συναρτήσει της R_{dr2} .

Στο σχήμα (4.68) βλέπουμε την μεταβολή του Droop Index καθώς μεταβάλλουμε την τιμή της R_{dr2} . Αρχικά, οι υψηλές τιμές απωλειών και κυκλοφορούντος ρεύματος έχουν ως αποτέλεσμα την υψηλή τιμή του DI. Καθώς οι τιμές απωλειών και κυκλοφορούντος ρεύματος μειώνονται, μειώνεται και η τιμή του DI. Φτάνοντας στο σημείο που οι απώλειες ισχύος της τοπολογίας ξεκινούν να αυξάνονται με την αύξηση της R_{dr2} , παρατηρούμε ότι το DI συνεχίζει να μειώνεται μέχρι να φτάσει την ελάχιστη τιμή του. Αυτό συμβαίνει διότι ο ρυθμός αύξησης των απωλειών ισχύος είναι μικρότερος απ' τον ρυθμό μείωσης του κυκλοφορούντος ρεύματος. Πέρα του ελάχιστου σημείου της καμπύλης, ο ρυθμός αύξησης των απωλειών ισχύος γίνει μεγαλύτερος απ' τον ρυθμό μείωσης του κυκλοφορούντος ρεύματος, τότε το DI αρχίζει να αυξάνεται με την αύξηση της R_{dr2} . Η τιμή της R_{dr2} στο ελάχιστο σημείο της καμπύλης είναι ουσιαστικά αυτή που ελαχιστοποιεί την παράσταση $DI = \left\{ \frac{1}{2} * N_i * |I_c| + \frac{1}{2} * N_p * P_{loss} \right\}$, άρα η τιμή της R_{dr2} που επιλέγουμε να προσθέσουμε στην τοπολογία για την καταστολή του κυκλοφορούντος ρεύματος. Έχοντας υπολογίσει την R_{dr2} , ο υπολογισμός της R_{dr1} γίνεται με τον τρόπο που αναφέραμε στο κεφάλαιο όπου αναλύεται πλήρως η μέθοδος Droop Index και η εφαρμογή της.

Οι τιμές των R_{droop} που προκύπτουν είναι οι παρακάτω:

$$R_{dr1} = 8,478\Omega$$

$$R_{dr2} = 10,9\Omega$$

Τα μεγέθη των ρευμάτων μετά την προσθήκη των R_{droop} στην τοπολογία, είναι βάση των θεωρητικών σχέσεων τα παρακάτω:

$$I_1 = 2,564A$$

$$I_2 = 0,299A$$

$$I_{c12} = 0,953A$$

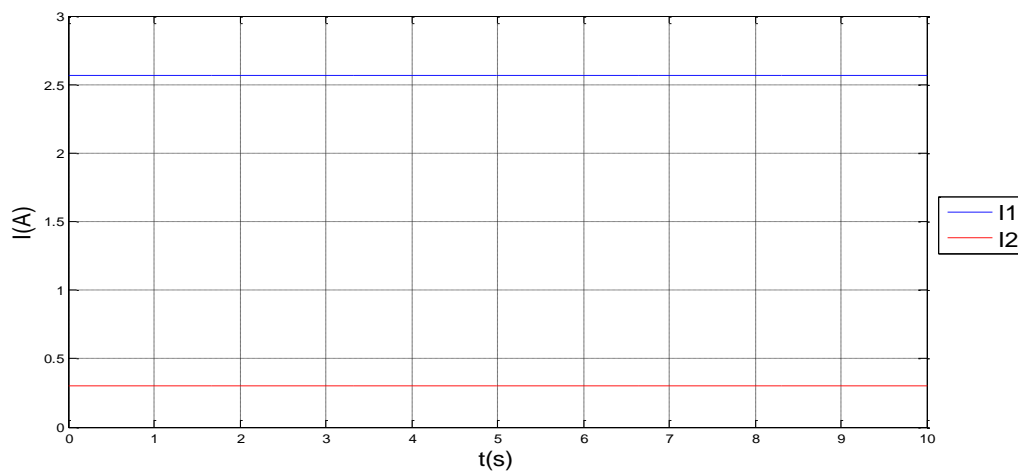
$$|I_1 - I_2| = 2,265A$$

Ακολουθεί ο πίνακας σύγκρισης των ρευμάτων με R_{droop} και χωρίς:

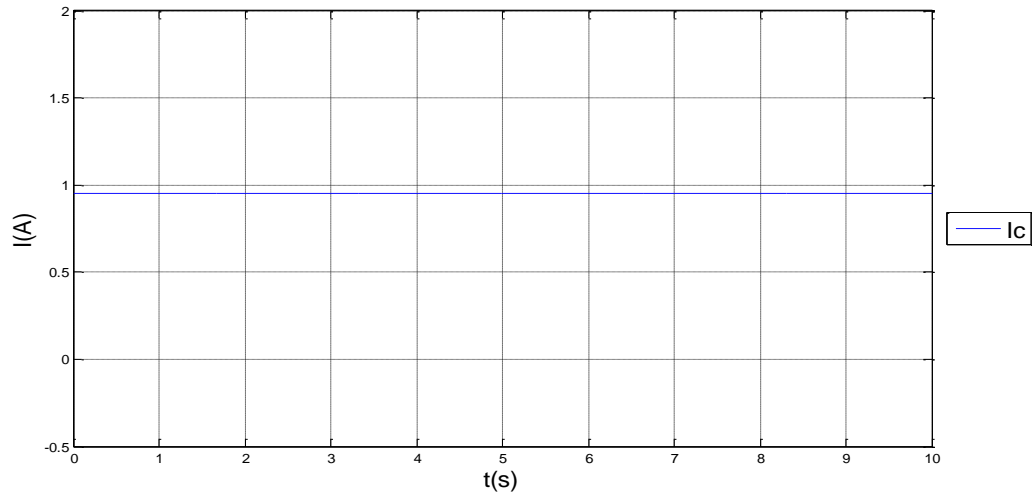
Με R_{droop}	Χωρίς R_{droop}
$I_1 = 2,564A$	$I_1 = 14,234A$
$I_2 = 0,299A$	$I_2 = -11,233A$
$I_{c12} = 0,953A$	$I_{c12} = 12,5A$
$ I_1 - I_2 = 2,265A$	$ I_1 - I_2 = 25,467A$
$I_L = 2,863A$	$I_L = 3,001A$

Παρατηρούμε ότι μέσω της μεθόδου Droop Index καταφέραμε να ελαττώσουμε το κυκλοφορούν ρεύμα της τοπολογίας κατά $11,547A$. Ακόμη βλέπουμε ότι το φορτίο μοιράζεται με καλύτερο τρόπο μεταξύ των γραμμών καθώς το μέγεθος $|I_1 - I_2|$ ελαττώθηκε κατά $23,202A$. Ταυτόχρονα παρατηρούμε ότι το ρεύμα που τροφοδοτεί το φορτίο παρουσιάζει μια πολύ μικρή πτώση της τάξης των $0,138A$.

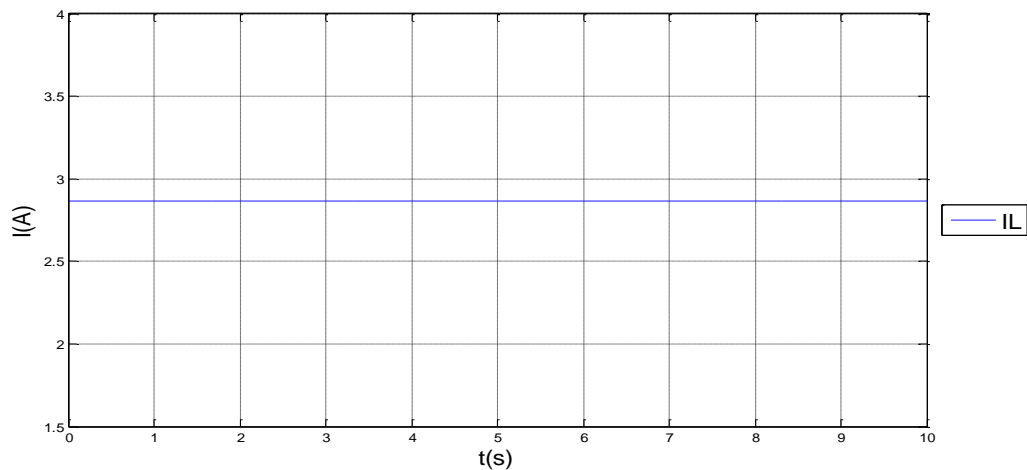
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις συγκεκριμένες τιμές των R_{dr1} και R_{dr2} είναι τα παρακάτω:



Σχήμα (4.69)- Ρεύματα I_1, I_2 στο ισοδύναμο κύκλωμα εφαρμογής του Droop Index στην τοπολογία κοινής σύνδεσης δύο παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Droop Index in One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources).



Σχήμα (4.70)- Κυκλοφορούν ρεύμα I_c στο ισοδύναμο κύκλωμα εφαρμογής του Droop Index στην τοπολογία κοινής σύνδεσης δύο παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Droop Index in One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources).

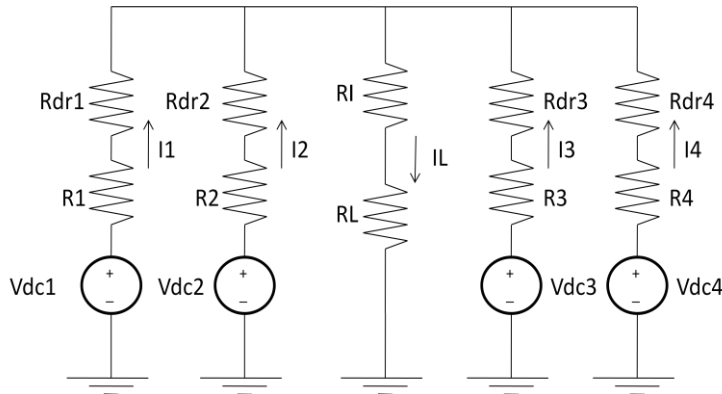


Σχήμα (4.71)- Ρεύμα φορτίου I_L στο ισοδύναμο κύκλωμα εφαρμογής του Droop Index στην τοπολογία κοινής σύνδεσης δύο παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Droop Index in One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources).

Βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι σε πλήρη συμφωνία με τα θεωρητικά αποτελέσματα. Στο σχήμα (4.70) βλέπουμε ότι η τιμή του κυκλοφορούντος ρεύματος μετά την προσθήκη των R_{droop} στην τοπολογία, έχει μειωθεί πάρα πολύ, γεγονός το οποίο οδηγεί σε καλύτερο διαμοιρασμό φορτίου (current sharing) μεταξύ των πηγών, όπως φαίνεται και στο σχήμα (4.69).

4.5.4- Εφαρμογή του Droop Index στην τοπολογία κοινής σύνδεσης n παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Droop Index in One terminal DC unipolar connection with n parallel voltage sources)

Για n=4, το ισοδύναμο κύκλωμα της συνδεσμολογίας είναι το εξής:



Σχήμα (4.72)- Ισοδύναμο κύκλωμα εφαρμογής του Droop Index στην τοπολογία κοινής σύνδεσης τεσσάρων παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Droop Index in One terminal DC unipolar connection with four parallel voltage sources).

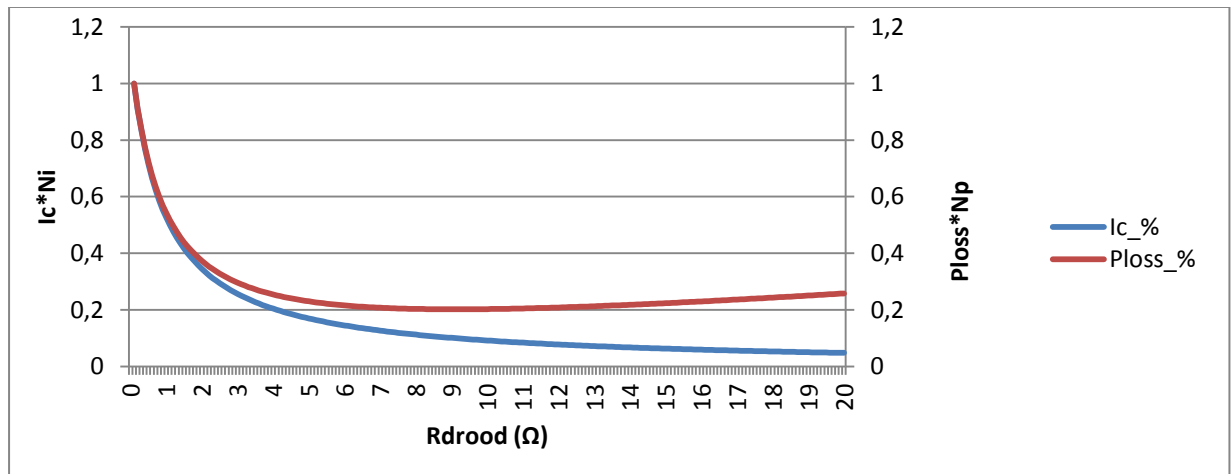
Όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο που αναλύεται η μέθοδος Droop Index, προστίθεται σε κάθε γραμμή της τοπολογίας μία αντίσταση R_{droop} , με σκοπό την μείωση των κυκλοφορούντων ρευμάτων στο κύκλωμα. Ωστόσο, η επιπλέον αντίσταση R_{droop} κάθε γραμμής, έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή των απωλειών ισχύος πάνω στις ωμικές αντιστάσεις των γραμμών. Προκειμένου να λάβουμε υπ'όψη και τις δύο αυτές συνιστώσες του προβλήματος, η τιμή της R_{dr2} επιλέγεται από ένα εύρος τιμών, έτσι ώστε να έχω την ελάχιστη τιμή της παράστασης $DI = \left\{ \frac{1}{2} * N_i * |I_c| + \frac{1}{2} * N_p * P_{loss} \right\}$. Εδώ, λόγω της ύπαρξης παραπάνω από δύο πηγών, η συνιστώσα που αφορά τα κυκλοφορούντα ρεύματα μεταξύ των πηγών, ορίζεται ως $|I_c| = |I_{c12}| + |I_{c13}| + |I_{c14}| + |I_{c23}| + |I_{c24}| + |I_{c34}|$.

Εφαρμόζοντας τις σχέσεις που αφορούν τον υπολογισμό των R_{droop} με τη βοήθεια ενός προγράμματος που δημιουργήσαμε στη Matlab (βλ. Παράρτημα) και χρησιμοποιώντας τα μεγέθη που χρησιμοποιήσαμε στην τοπολογία του σχήματος (4.28) για $V_{dc1} \neq V_{dc2} \neq V_{dc3} \neq V_{dc4}$,

V_{out}	326 V
V_1	330 V
V_2	310 V
V_3	325 V
V_4	320 V

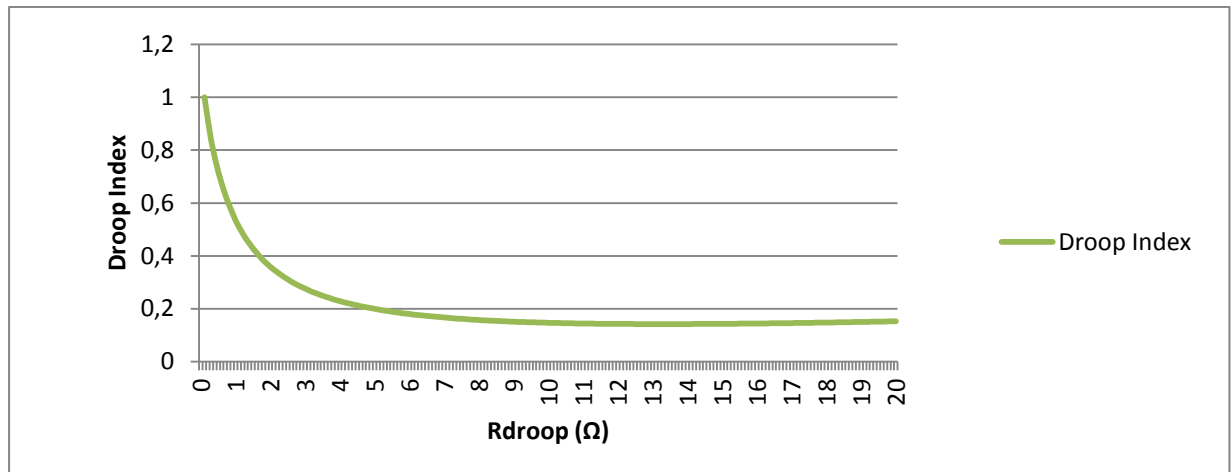
P_L	1006,16 W
R_L	105,625 Ω
R_1	0,7 Ω
R_2	0,9 Ω
R_3	1,1 Ω
R_4	1,25 Ω
R_l	1,4 Ω

προέκυψαν το διάγραμμα μεταβολής των κανονικοποιημένων απωλειών και του κανονικοποιημένου κυκλοφορούντος ρεύματος καθώς μεταβάλουμε την R_{dr2} , όπως επίσης και το διάγραμμα μεταβολής του Droop Index συναρτήσει της R_{dr2} .



Σχήμα (4.73)- Διάγραμμα μεταβολής των κανονικοποιημένων απωλειών ισχύος και του κανονικοποιημένου κυκλοφορούντος ρεύματος, συναρτήσει της R_{dr2} .

Στο σχήμα (4.73) φαίνεται η μεταβολή των απωλειών ισχύος και του κυκλοφορούντος ρεύματος της τοπολογίας, καθώς αλλάζουμε την τιμή της R_{dr2} . Βλέπουμε ότι με την αύξηση της τιμής της R_{dr2} , το κυκλοφορούν ρεύμα συνεχώς μειώνεται, ενώ οι απώλειες ισχύος μειώνονται μέχρι ένα κατώτατο σημείο και μετά αυξάνονται. Αυτό συμβαίνει διότι αρχικά, η τιμή του κυκλοφορούντος ρεύματος είναι αρκετά μεγάλη και επηρεάζει περισσότερο τις απώλειες ισχύος των γραμμών, απ' ό,τι η τιμή της συνολικής αντίστασης $R = R_{γραμμής} + R_{dr2}$ ($P_{loss} = I^2 * R$). Απ' το σημείο όπου οι απώλειες φτάνουν την ελάχιστη τιμή τους και μετά, η ύπαρξη της R_{dr2} έχει ελαττώσει το κυκλοφορούν ρεύμα σε σημείο που η τιμή της συνολικής αντίστασης γραμμής επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό τις απώλειες ισχύος, απ' ό,τι η τιμή του ρεύματος. Έτσι περαιτέρω αύξηση της R_{dr2} έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών.



Σχήμα (4.74)- Διάγραμμα μεταβολής του Droop Index συναρτήσει της R_{dr2} .

Στο σχήμα (4.74) βλέπουμε την μεταβολή του Droop Index καθώς μεταβάλλουμε την τιμή της R_{dr2} . Αρχικά, οι υψηλές τιμές απωλειών και κυκλοφορούντος ρεύματος έχουν ως αποτέλεσμα την υψηλή τιμή του DI. Καθώς οι τιμές απωλειών και κυκλοφορούντος ρεύματος μειώνονται, μειώνεται και η τιμή του DI. Φτάνοντας στο σημείο που οι απώλειες ισχύος της τοπολογίας ξεκινούν να αυξάνονται με την αύξηση της R_{dr2} , παρατηρούμε ότι το DI συνεχίζει να μειώνεται μέχρι να φτάσει την ελάχιστη τιμή του. Αυτό συμβαίνει διότι ο ρυθμός αύξησης των απωλειών ισχύος είναι μικρότερος απ' τον ρυθμό μείωσης του κυκλοφορούντος ρεύματος. Πέρα του ελάχιστου σημείου της καμπύλης, ο ρυθμός αύξησης των απωλειών ισχύος γίνει μεγαλύτερος απ' τον ρυθμό μείωσης του κυκλοφορούντος ρεύματος, τότε το DI αρχίζει να αυξάνεται με την αύξηση της R_{dr2} . Η τιμή της R_{dr2} στο ελάχιστο σημείο της καμπύλης είναι ουσιαστικά αυτή που ελαχιστοποιεί την παράσταση $DI = \left\{ \frac{1}{2} * N_i * |I_c| + \frac{1}{2} * N_p * P_{loss} \right\}$, άρα η τιμή της R_{dr2} που επιλέγουμε να προσθέσουμε στην τοπολογία για την καταστολή του κυκλοφορούντος ρεύματος. Έχοντας υπολογίσει την R_{dr2} , ο υπολογισμός της R_{dr1} γίνεται με τον τρόπο που αναφέραμε στο κεφάλαιο όπου αναλύεται πλήρως η μέθοδος Droop Index και η εφαρμογή της.

Οι τιμές των R_{droop} που προκύπτουν είναι οι παρακάτω:

$$R_{dr1} = 10,3444\Omega$$

$$R_{dr2} = 13,3\Omega$$

$$R_{dr3} = 16,25556\Omega$$

$$R_{dr4} = 18,47222\Omega$$

Τα μεγέθη των ρευμάτων μετά την προσθήκη των R_{droop} στην τοπολογία, είναι βάση των θεωρητικών σχέσεων τα παρακάτω:

$$I_1 = 1,778A$$

$$I_2 = -0,075A$$

$$I_3 = 0,833A$$

$$I_4 = 0,471A$$

$$I_{c1} = 0,741A$$

$$I_{c2} = -0,832A$$

$$I_{c3} = 0,183A$$

$$I_{c4} = -0,092A$$

$$|I_1 - I_2| = 1,853A$$

$$|I_1 - I_3| = 0,945A$$

$$|I_1 - I_4| = 1,307A$$

$$|I_2 - I_3| = 0,908A$$

$$|I_2 - I_4| = 0,546A$$

$$|I_3 - I_4| = 0,362A$$

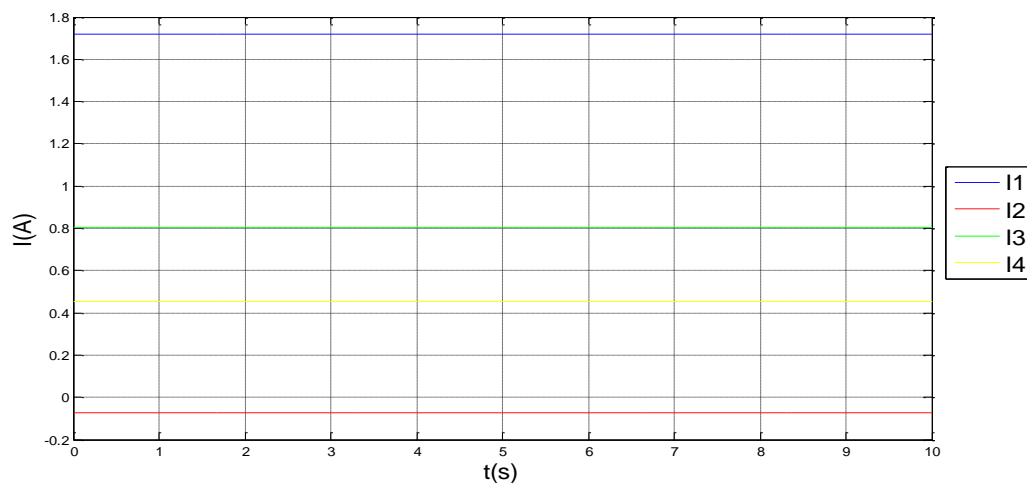
Ακολουθεί ο πίνακας σύγκρισης των ρευμάτων με R_{droop} και χωρίς:

Με R_{droop}	Χωρίς R_{droop}
$I_1 = 1,778A$	$I_1 = 12,726A$
$I_2 = -0,075A$	$I_2 = -12,194A$
$I_3 = 0,833A$	$I_3 = 3,543A$
$I_4 = 0,471A$	$I_4 = -1,049A$
$I_{c1} = 0,741A$	$I_{c1} = 11,689A$
$I_{c2} = -0,832A$	$I_{c2} = -12,971A$
$I_{c3} = 0,183A$	$I_{c3} = 2,894A$
$I_{c4} = -0,092A$	$I_{c4} = -1,612A$
$I_L = 3,007A$	$I_L = 3,026A$
$ I_1 - I_2 = 1,853A$	$ I_1 - I_2 = 24,920A$

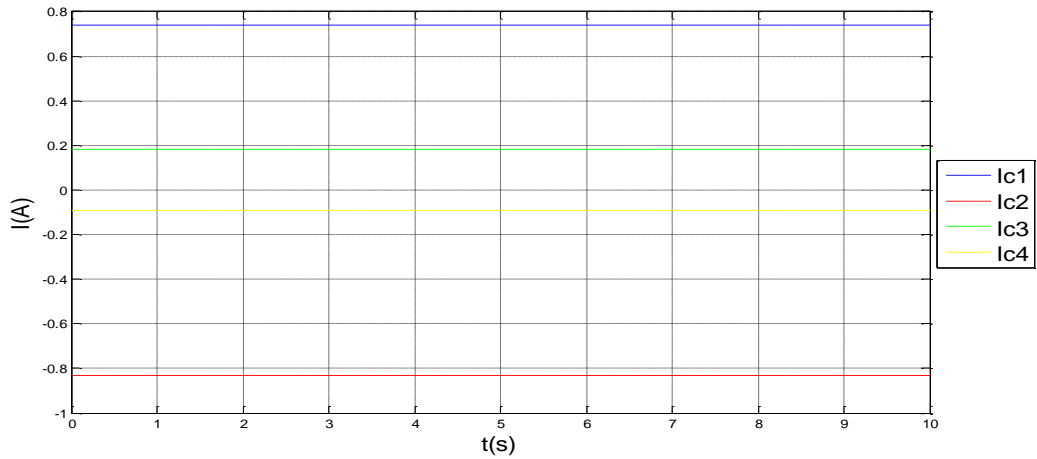
$ I_1 - I_3 = 0,945A$	$ I_1 - I_3 = 9,138A$
$ I_1 - I_4 = 1,307A$	$ I_1 - I_4 = 13,775A$
$ I_2 - I_3 = 0,908A$	$ I_2 - I_3 = 15,737A$
$ I_2 - I_4 = 0,546A$	$ I_2 - I_4 = 11,145A$
$ I_3 - I_4 = 0,362A$	$ I_3 - I_4 = 4,592A$

Παρατηρούμε ότι μέσω της μεθόδου Droop Index καταφέραμε να ελαττώσουμε τα κυκλοφορούντα ρεύματα της τοπολογίας. Πιο συγκεκριμένα, $|I_{c1\chi\omega\rho\rho\rho Rdr} - I_{c1\mu\epsilon Rdr}| = 10,948A$, $|I_{c2\chi\omega\rho\rho\rho Rdr} - I_{c2\mu\epsilon Rdr}| = 12,139A$, $|I_{c3\chi\omega\rho\rho\rho Rdr} - I_{c3\mu\epsilon Rdr}| = 2,711A$, $|I_{c4\chi\omega\rho\rho\rho Rdr} - I_{c4\mu\epsilon Rdr}| = 1,520A$. Ακόμη βλέπουμε ότι το φορτίο μοιράζεται με καλύτερο τρόπο μεταξύ των γραμμών καθώς το μέγεθος $|I_1 - I_2|$ ελαττώθηκε κατά $23,067A$, το $|I_1 - I_3|$ κατά $8,193A$, το $|I_1 - I_4|$ κατά $12,468A$ το $|I_2 - I_3|$ κατά $14,829A$, το $|I_2 - I_4|$ κατά $10,599A$ και το $|I_3 - I_4|$ κατά $4,230A$. Ταυτόχρονα παρατηρούμε ότι το ρεύμα που τροφοδοτεί το φορτίο παρουσιάζει μια μείωση της τάξης των $0,019A$.

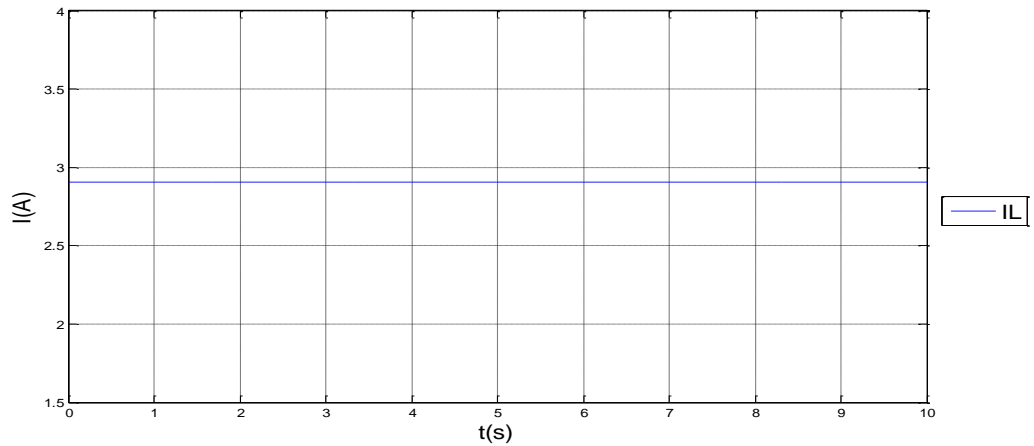
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις συγκεκριμένες τιμές των R_{dr1} , R_{dr2} , R_{dr3} και R_{dr4} είναι τα παρακάτω:



Σχήμα (4.75)- Ρεύματα I_1, I_2, I_3, I_4 στο ισοδύναμο κύκλωμα εφαρμογής του Droop Index στην τοπολογία κοινής σύνδεσης τεσσάρων παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Droop Index in One terminal DC unipolar connection with four parallel voltage sources).



Σχήμα (4.76)-Κυκλοφορούντα ρεύματα $I_{c1}, I_{c2}, I_{c3}, I_{c4}$ στο ισοδύναμο κύκλωμα εφαρμογής του Droop Index στην τοπολογία κοινής σύνδεσης τεσσάρων παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Droop Index in One terminal DC unipolar connection with four parallel voltage sources).

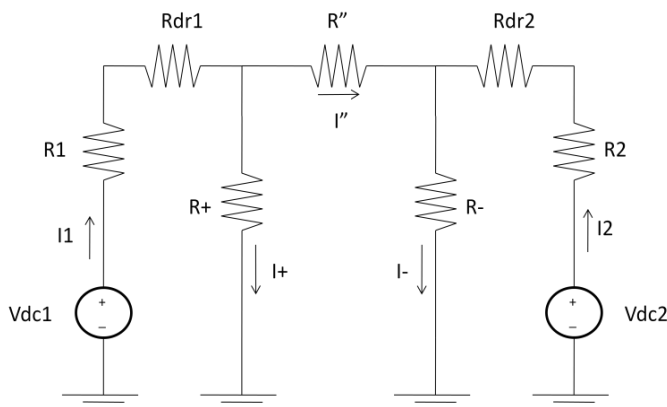


Σχήμα (n.77)- Ρεύμα φορτίου I_L στο ισοδύναμο κύκλωμα εφαρμογής του Droop Index στην τοπολογία κοινής σύνδεσης τεσσάρων παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Droop Index in One terminal DC unipolar connection with four parallel voltage sources).

Βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι σε πλήρη συμφωνία με τα θεωρητικά αποτελέσματα. Στο σχήμα (4.76) βλέπουμε ότι οι τιμές των κυκλοφορούντων ρευμάτων μετά την προσθήκη των R_{droop} στην τοπολογία, έχουν μειωθεί πάρα πολύ, γεγονός το οποίο οδηγεί σε καλύτερο διαμοιρασμό φορτίου (current sharing) μεταξύ των πηγών, όπως φαίνεται και στο σχήμα (4.75).

4.5.5- Εφαρμογή του Droop Index στην τοπολογία σύνδεσης δύο πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου (Droop Index in DC bipolar connection)

Το ισοδύναμο κύκλωμα της συνδεσμολογίας είναι το εξής:



Σχήμα (4.78)- Ισοδύναμο κύκλωμα εφαρμογής του Droop Index στην τοπολογία σύνδεσης δύο πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου (Droop Index in DC bipolar connection).

Ρίχνοντας μια ματιά, τόσο στα θεωρητικά αποτελέσματα, όσο και σε αυτά της προσομοίωσης που αφορούν την συγκεκριμένη τοπολογία για $V_{dc1} + V_{dc2} \neq 0$ χωρίς την προσθήκη R_{droop} , παρατηρώ απ'τα σχήματα (n.43) και (n.44) και απ'τα θεωρητικά αποτελέσματα $I_1 = 7,417A$, $I_2 = -7,773A$, $I_{c12} = 0,191A$, $|I_1 + I_2| = 0,356A$, ότι το κυκλοφορούν ρεύμα της συγκεκριμένης τοπολογίας είναι μικρό σε σχέση με τα ρεύματα γραμμών. Ακόμη βλέπω ότι έχω καλό διαμοιρασμό φορτίου (current sharing).

Λαμβάνοντας υπ' όψη τις μικρές τιμές του κυκλοφορούντος ρεύματος στην συγκεκριμένη τοπολογία χωρίς την ύπαρξη των R_{droop} , αναρωτιόμαστε αν η προσθήκη των R_{droop} εξασφαλίζει την ελαχιστοποίηση του Droop Index για κάποια τιμή της R_{dr2} ή αν το Droop Index είναι ελάχιστο χωρίς την προσθήκη των R_{droop} .

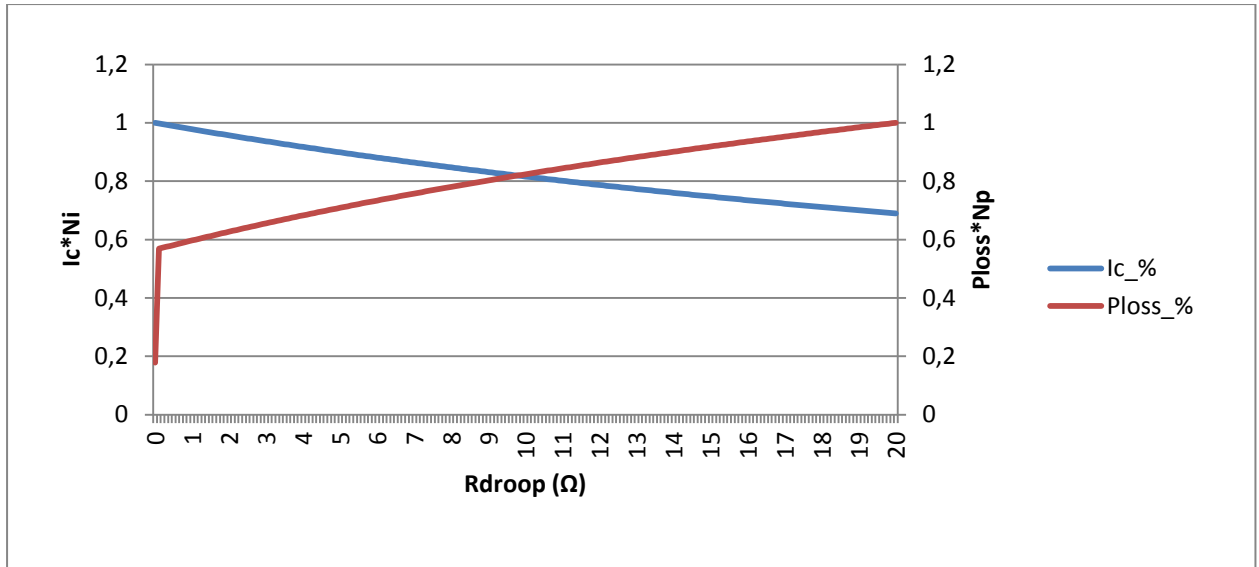
Στις υπόλοιπες τοπολογίες με ανισοροπία στις τάσεις τροφοδοσίας, τόσο η πολύ υψηλότερη τιμή των ρευμάτων γραμμών, όσο και η πολύ υψηλότερη τιμή των κυκλοφορούντων ρευμάτων χωρίς την ύπαρξη των R_{droop} , υποδηλώνουν το γεγονός ότι το Droop Index χωρίς την ύπαρξη των R_{droop} δεν παίρνει την ελάχιστη τιμή.

Ωστόσο, εδώ δεν είναι ξεκάθαρο, γι'αυτό στην σύγκριση των διάφορων τιμών του Droop Index, συμπεριλάβαμε και την τιμή του Droop Index για $R_{dr1} = 0 \Omega$, και $R_{dr2} = 0 \Omega$.

Χρησιμοποιώντας τις τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στην τοπολογία του σχήματος (4.39),

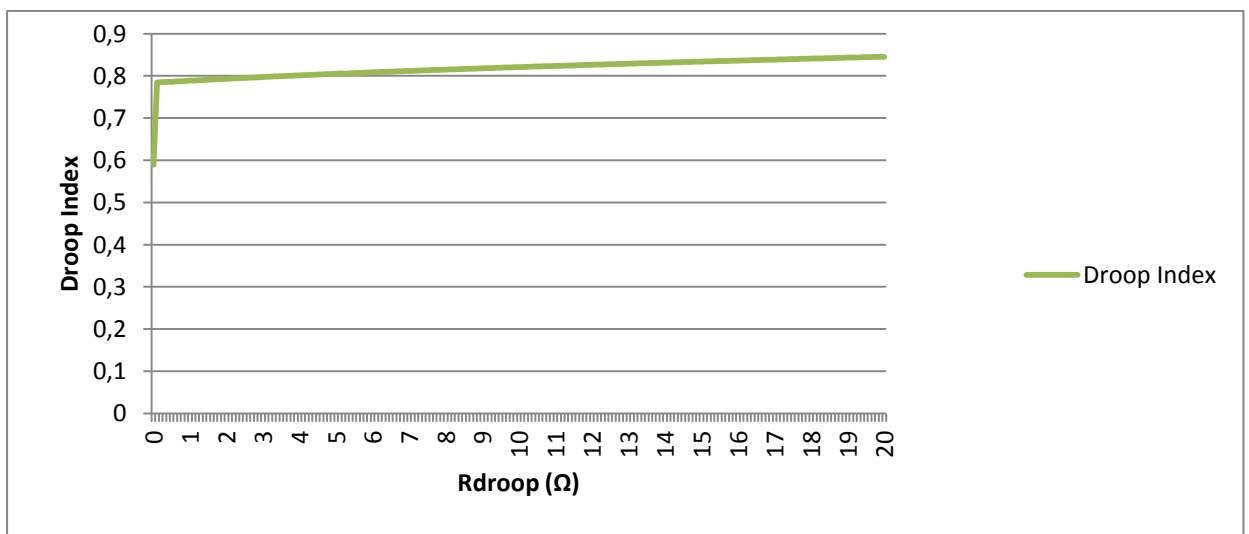
V_{out}	326 V
V_1	340 V
V_2	-315 V
P_L^+	1012,15 W
P_L^-	1118,69 W
P_L''	2834,03 W
$R_{L\Delta}^+$	105 Ω
$R_{L\Delta}^-$	95 Ω
$R_{L\Delta}''$	150 Ω
R_α	45 Ω
R_b	40,714 Ω
R_c	28,5 Ω
R_1	1,2 Ω
R_2	1,6 Ω

προέκυψε το διάγραμμα μεταβολής των κανονικοποιημένων απωλειών και του κανονικοποιημένου κυκλοφορούντος ρεύματος καθώς μεταβάλουμε την R_{dr2} , όπως επίσης και το διάγραμμα μεταβολής του Droop Index συναρτήσει της R_{dr2} .



Σχήμα (4.79)- Διάγραμμα μεταβολής των κανονικοποιημένων απωλειών ισχύος και του κανονικοποιημένου κυκλοφορούντος ρεύματος, συναρτήσει της R_{dr2} .

Στο σχήμα (4.79) βλέπουμε ότι το κυκλοφορούν ρεύμα της τοπολογίας μειώνεται με την αύξηση τις τιμές της R_{dr2} , ενώ αντίθετα οι απώλειες αυξάνονται. Για τιμή $R_{dr2} = 0$, δηλαδή χωρίς την ύπαρξη R_{droop} στην τοπολογία, παρατηρούμε ότι η κανονικοποιημένη τιμή των απωλειών ισχύος είναι πολύ μικρή $P_{loss} < 0,2$ (20%) σε σχέση με τις τιμές των απωλειών ισχύος για οποιαδήποτε άλλη τιμή της R_{dr2} , που κυμαίνονται μεταξύ $0,5$ (50%) $< P_{loss} \leq 1$ (100%). Ο λόγος για τον οποίο δεν έχουμε αρχικά μείωση και στη συνέχεια αύξηση των απωλειών ισχύος, όπως σε όλες τις προηγούμενες τοπολογίες, είναι διότι το κυκλοφορούν ρεύμα είναι αρκετά μικρό, ώστε η τιμή της συνολικής αντίστασης γραμμής να επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό τις απώλειες ισχύος, απ' ό,τι η τιμή του ρεύματος. Έτσι περαιτέρω αύξηση της R_{dr2} έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών. Αντίθετα, η τιμή του κυκλοφορούντος ρεύματος μειώνεται με ομαλότερο τρόπο 1 (100%) $\geq I_c > 0,6$ (60%).



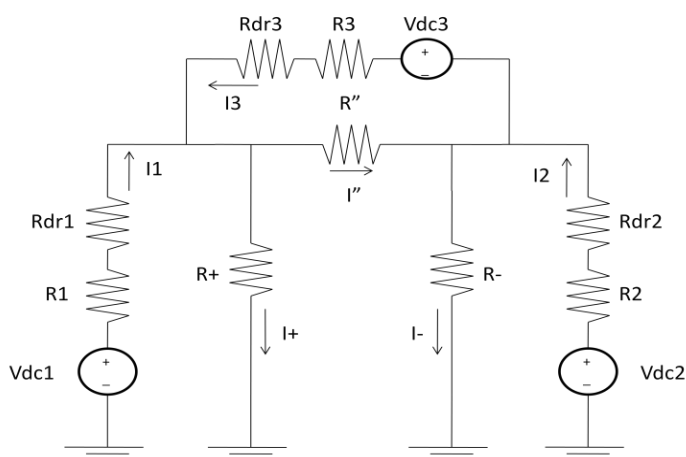
Σχήμα (4.80)- Διάγραμμα μεταβολής του Droop Index συναρτήσει της R_{dr2} .

Στο σχήμα (4.80) βλέπουμε ότι το Droop Index παίρνει την ελάχιστη τιμή του, όταν στην τοπολογία δεν υπάρχουν R_{droop} , δηλαδή για $R_{droop} = 0 \Omega$. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην πολύ μικρότερη τιμή των κανονικοποιημένων απωλειών ισχύος όταν $R_{dr1} = 0 \Omega$, και $R_{dr2} = 0 \Omega$, σε σχέση με τις υπόλοιπες τιμές, τόσο των κανονικοποιημένων απωλειών ισχύος, όσο και των κανονικοποιημένων τιμών του κυκλοφορούντος ρεύματος.

Επομένως, στην συγκεκριμένη τοπολογία δεν προσθέτουμε αντιστάσεις R_{droop} .

4.5.6- Εφαρμογή του Droop Index στην τοπολογία σύνδεσης τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (Droop Index in DC bipolar connection with 1 more voltage source connected between + -)

Το ισοδύναμο κύκλωμα της συνδεσμολογίας είναι το εξής:



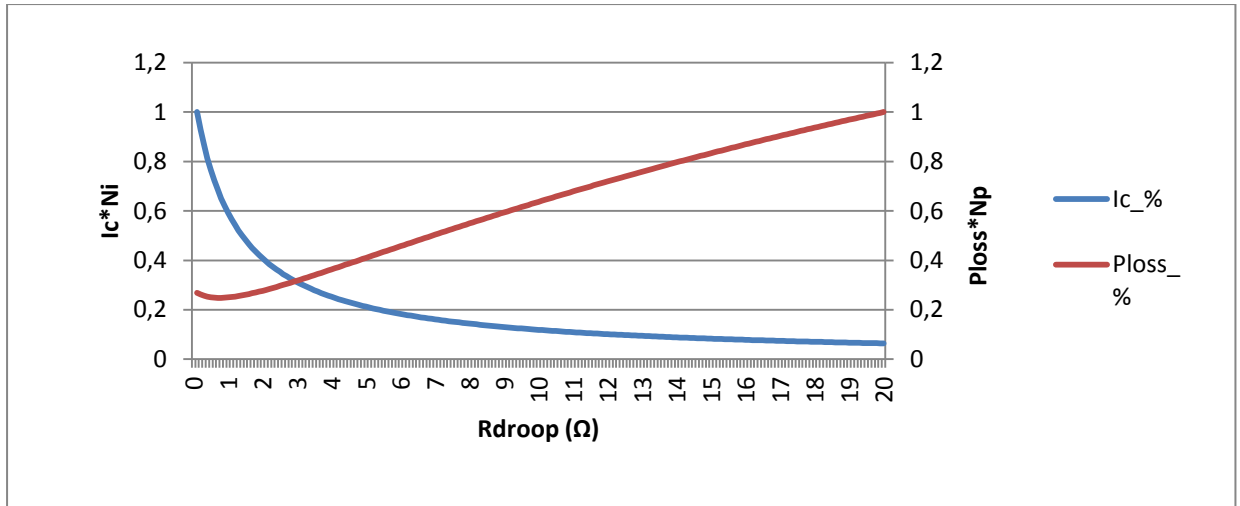
Σχήμα (4.81)- Ισοδύναμο κύκλωμα εφαρμογής του Droop Index στην τοπολογία σύνδεσης τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (Droop Index in DC bipolar connection with 1 more voltage source connected between + -).

Όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο που αναλύεται η μέθοδος Droop Index, προστίθεται σε κάθε γραμμή της τοπολογίας μία αντίσταση R_{droop} , με σκοπό την μείωση των κυκλοφορούντων ρευμάτων στο κύκλωμα. Ωστόσο, η επιπλέον αντίσταση R_{droop} κάθε γραμμής, έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή των απωλειών ισχύος πάνω στις ωμικές αντιστάσεις των γραμμών. Προκειμένου να λάβουμε υπ'όψην και τις δύο αυτές συνιστώσες του προβλήματος, η τιμή της R_{dr2} επιλέγεται από ένα εύρος τιμών, έτσι ώστε να έχω την ελάχιστη τιμή της παράστασης $DI = \left\{ \frac{1}{2} * N_i * |I_c| + \frac{1}{2} * N_p * P_{loss} \right\}$. Όπως αναφέρθηκε στην θεωρητική ανάλυση της τοπολογίας, αν και υπάρχουν περισσότερες από δύο πηγές στο κύκλωμα, οι σχέσεις που προέκυψαν για τα ρεύματα των γραμμών, υποδεικνύουν, όταν ισχύει $V_{dc1} + V_{dc2} \neq 0$ και $V_{dc1} + V_{dc2} - V_{dc3} \neq 0$, την ύπαρξη κυκλοφορούντος ρεύματος που διαρέει το κύκλωμα, συναρτήσει και των τριών πηγών. Αυτό είναι το I_c στη συγκεκριμένη περίπτωση και όχι το άθροισμα κυκλοφορούντων ρευμάτων συναρτήσει κάθε φορά δύο εκ των τριών πηγών.

Εφαρμόζοντας τις σχέσεις που αφορούν τον υπολογισμό των R_{droop} με τη βοήθεια ενός προγράμματος που δημιουργήσαμε στη Matlab (βλ. Παράρτημα) και χρησιμοποιώντας τα μεγέθη που χρησιμοποιήσαμε στην τοπολογία του σχήματος (4.47) για $V_{dc1} + V_{dc2} \neq 0$ και $V_{dc1} + V_{dc2} - V_{dc3} \neq 0$,

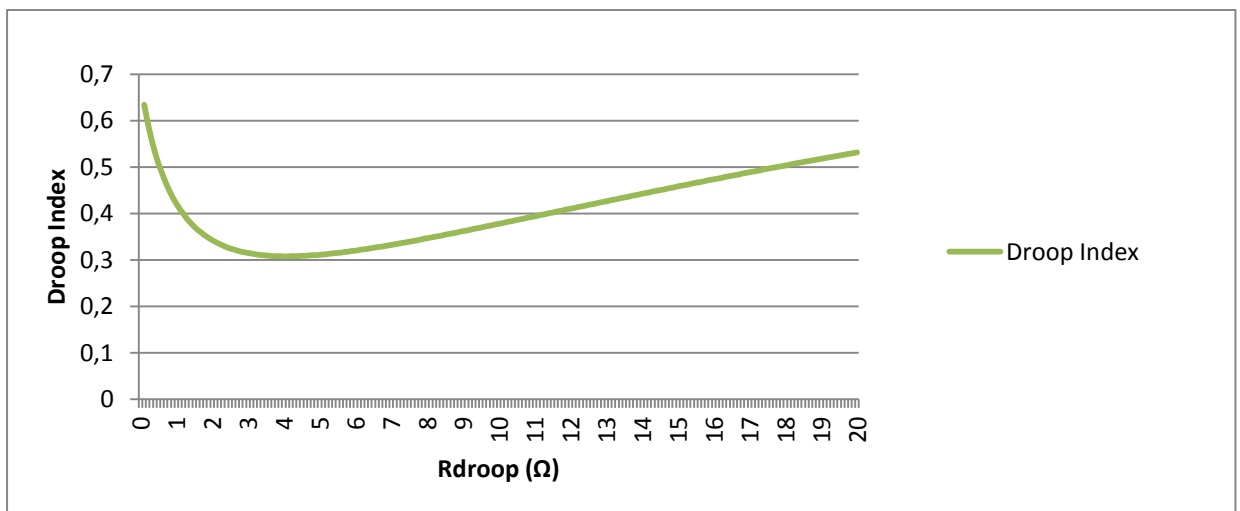
V_{out}	326 V
V_1	330 V
V_2	-315 V
V_3	670 V
P_L^+	1006,16 W
P_L^-	1006,16 W
P_L''	4024,65 W
$R_{L\Delta}^+$	105,625 Ω
$R_{L\Delta}^-$	105,625 Ω
$R_{L\Delta}''$	105,625 Ω
R_α	35,2083 Ω
R_b	35,2083 Ω
R_c	35,2083 Ω
R_1	1,2 Ω
R_2	1,2 Ω
R_3	1,2 Ω

προέκυψαν το διάγραμμα μεταβολής των κανονικοποιημένων απωλειών και του κανονικοποιημένου κυκλοφορούντος ρεύματος καθώς μεταβάλουμε την R_{dr2} , όπως επίσης και το διάγραμμα μεταβολής του Droop Index συναρτήσει της R_{dr2} .



Σχήμα (4.82)- Διάγραμμα μεταβολής των κανονικοποιημένων απωλειών ισχύος και του κανονικοποιημένου κυκλοφορούντος ρεύματος, συναρτήσει της R_{dr2} .

Στο σχήμα (4.82) φαίνεται η μεταβολή των απωλειών ισχύος και του κυκλοφορούντος ρεύματος της τοπολογίας, καθώς αλλάζουμε την τιμή της R_{dr2} . Βλέπουμε ότι με την αύξηση της τιμής της R_{dr2} , το κυκλοφορούν ρεύμα συνεχώς μειώνεται, ενώ οι απώλειες ισχύος μειώνονται μέχρι ένα κατώτατο σημείο και μετά αυξάνονται. Αυτό συμβαίνει διότι αρχικά, η τιμή του κυκλοφορούντος ρεύματος είναι αρκετά μεγάλη και επηρεάζει περισσότερο τις απώλειες ισχύος των γραμμών, απ' ό,τι η τιμή της συνολικής αντίστασης $R = R_{γραμμής} + R_{dr2}$ ($P_{loss} = I^2 * R$). Απ' το σημείο όπου οι απώλειες φτάνουν την ελάχιστη τιμή τους και μετά, η ύπαρξη της R_{dr2} έχει ελαττώσει το κυκλοφορούν ρεύμα σε σημείο που η τιμή της συνολικής αντίστασης γραμμής επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό τις απώλειες ισχύος, απ' ό,τι η τιμή του ρεύματος. Έτσι περαιτέρω αύξηση της R_{dr2} έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών.



Σχήμα (4.83)- Διάγραμμα μεταβολής του Droop Index συναρτήσει της R_{dr2} .

Στο σχήμα (4.83) βλέπουμε την μεταβολή του Droop Index καθώς μεταβάλλουμε την τιμή της R_{dr2} . Αρχικά, οι υψηλές τιμές απωλειών και κυκλοφορούντος ρεύματος έχουν ως αποτέλεσμα την υψηλή τιμή του DI. Καθώς οι τιμές απωλειών και κυκλοφορούντος ρεύματος μειώνονται, μειώνεται και η τιμή του DI. Φτάνοντας στο σημείο που οι απώλειες ισχύος της τοπολογίας ξεκινούν να αυξάνονται με την αύξηση της R_{dr2} , παρατηρούμε ότι το DI συνεχίζει να μειώνεται μέχρι να φτάσει την ελάχιστη τιμή του. Αυτό συμβαίνει διότι ο ρυθμός αύξησης των απωλειών ισχύος είναι μικρότερος απ' τον ρυθμό μείωσης του κυκλοφορούντος ρεύματος. Πέρα του ελάχιστου σημείου της καμπύλης, ο ρυθμός αύξησης των απωλειών ισχύος γίνεται μεγαλύτερος απ' τον ρυθμό μείωσης του κυκλοφορούντος ρεύματος, τότε το DI αρχίζει να αυξάνεται με την αύξηση της R_{dr2} . Η τιμή της R_{dr2} στο ελάχιστο σημείο τη καμπύλης είναι ουσιαστικά αυτή που ελαχιστοποιεί την παράσταση $DI = \left\{ \frac{1}{2} * N_i * |I_c| + \frac{1}{2} * N_p * P_{loss} \right\}$, άρα η τιμή της R_{dr2} που επιλέγουμε να προσθέσουμε στην τοπολογία για την καταστολή του κυκλοφορούντος ρεύματος. Έχοντας υπολογίσει την R_{dr2} , ο υπολογισμός της R_{dr1} γίνεται με τον τρόπο που αναφέραμε στο κεφάλαιο όπου αναλύεται πλήρως η μέθοδος Droop Index και η εφαρμογή της.

Οι τιμές των R_{droop} που προκύπτουν είναι οι παρακάτω:

$$R_{dr1} = 4,1\Omega$$

$$R_{dr2} = 4,1\Omega$$

$$R_{dr3} = 4,1\Omega$$

Τα μεγέθη των ρευμάτων μετά την προσθήκη των R_{droop} στην τοπολογία, είναι βάση των θεωρητικών σχέσεων τα παρακάτω:

$$I_1 = 1,478A$$

$$I_2 = -1,343A$$

$$I_3 = 7,537A$$

$$|I_c| = 1,497A$$

$$|I_1 + I_2| = 0,135A$$

$$|2I_1 - I_3| = 4,581A$$

$$|2I_2 + I_3| = 4,851A$$

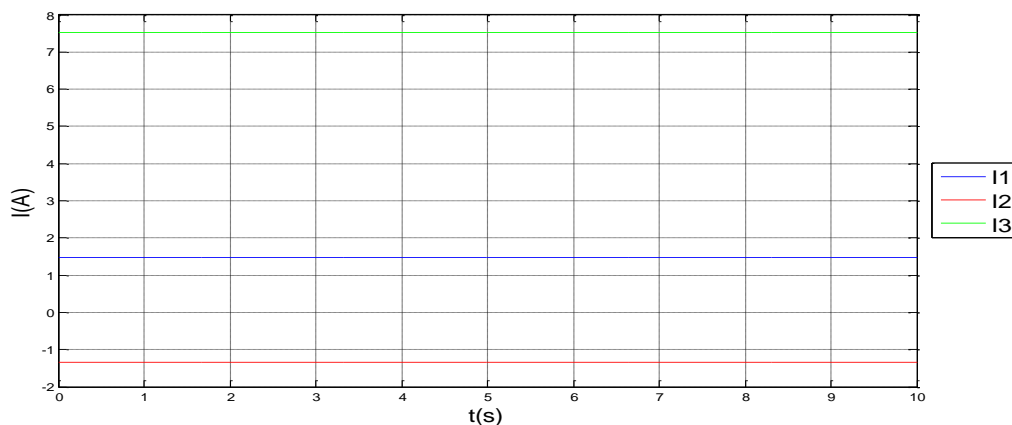
Ακολουθεί ο πίνακας σύγκρισης των ρευμάτων με R_{droop} και χωρίς:

Με R_{droop}	Χωρίς R_{droop}
$I_1 = 1,478A$	$I_1 = -3,777A$
$I_2 = -1,343A$	$I_2 = 3,917A$

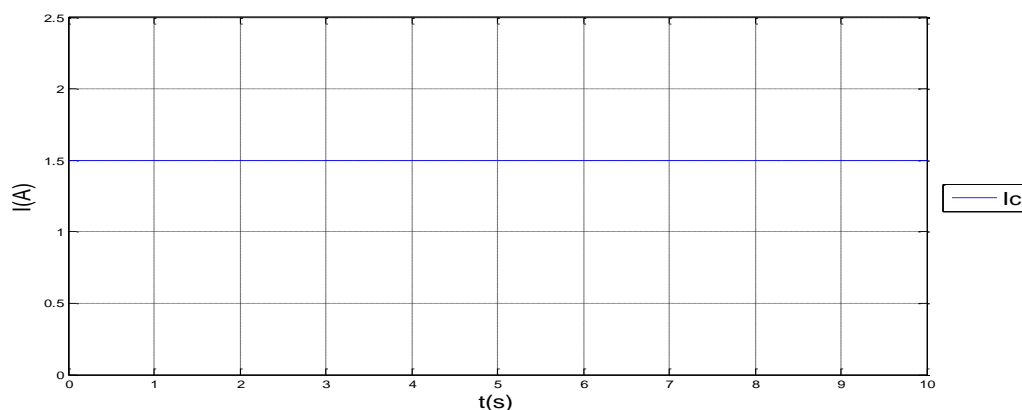
$I_3 = 7,537A$	$I_3 = 13,138A$
$ I_c = 1,497A$	$ I_c = 6,866A$
$ I_1 + I_2 = 0,135A$	$ I_1 + I_2 = 0,14A$
$ 2I_1 - I_3 = 4,581A$	$ 2I_1 - I_3 = 5,584A$
$ 2I_2 + I_3 = 4,851A$	$ 2I_2 + I_3 = 20,972A$

Παρατηρούμε ότι μέσω της μεθόδου Droop Index καταφέραμε να ελαττώσουμε τα κυκλοφορούντα ρεύματα της τοπολογίας. Πιο συγκεκριμένα, $|I_{c\chi\omega\rho\rho\rho s Rdr} - I_{c\mu\epsilon Rdr}| = 5,369A$. Ακόμη βλέπουμε ότι το φορτίο μοιράζεται με καλύτερο τρόπο μεταξύ των γραμμών καθώς το μέγεθος $|I_1 + I_2|$ ελαττώθηκε κατά $0,005A$, το $|2I_1 - I_3|$ κατά $1,003A$ και το $|2I_2 + I_3|$ κατά $16,121A$.

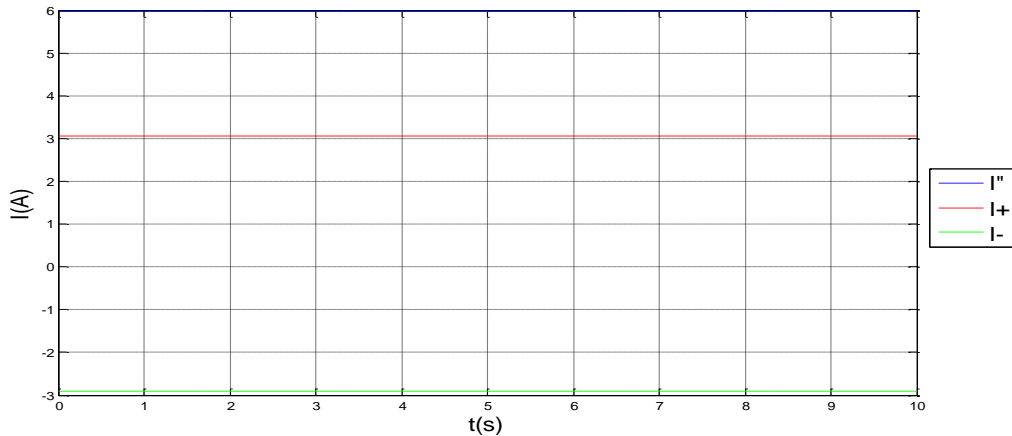
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις συγκεκριμένες τιμές των R_{dr1} , R_{dr2} και R_{dr3} είναι τα παρακάτω:



Σχήμα (4.84)- Ρεύματα I_1, I_2, I_3 στο ισοδύναμο κύκλωμα εφαρμογής του Droop Index στην τοπολογία σύνδεσης τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (Droop Index in DC bipolar connection with 1 more voltage source connected between + -).



Σχήμα (4.85)-Κυκλοφορούν ρεύμα I_c στο ισοδύναμο κύκλωμα εφαρμογής του Droop Index στην τοπολογία σύνδεσης τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (Droop Index in DC bipolar connection with 1 more voltage source connected between + -).



Σχήμα (4.86)- Ρεύματα φορτίων I'' , I^+ , I^- στο ισοδύναμο κύκλωμα εφαρμογής του Droop Index στην τοπολογία σύνδεσης τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (Droop Index in DC bipolar connection with 1 more voltage source connected between + -).

Βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι σε πλήρη συμφωνία με τα θεωρητικά αποτελέσματα. Ακόμη από το σχήμα (4.85) γίνεται φανερό, ότι και σε αυτήν την τοπολογία, η προσθήκη των R_{droop} , μειώνει τα κυκλοφορούντα ρεύματα. Τέλος, στο σχήμα (4.86) φαίνεται ότι η καταστολή του κυκλοφορούντος ρεύματος βελτιώνει τον διαμοιρασμό φορτίου (current sharing), χωρίς να έχουμε ουσιαστική μείωση του ρεύματος των φορτίων.

4.6- Συμπεράσματα

Λαμβάνοντας υπ' όψη τόσο τα θεωρητικά, όσο και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σχετικά με την επίδραση του Droop Index Control Method στην καταστολή των κυκλοφορούντων ρευμάτων και τη βελτίωση του current sharing, βλέπουμε ότι έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Αν εξαιρέσουμε την τοπολογία «Bipolar DC connection», σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, η προσθήκη των R_{droop} , έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των κυκλοφορούντων ρευμάτων σε πολύ μεγάλο βαθμό, καθώς επίσης και τη βελτίωση του διαμοιρασμού φορτίου (current sharing), επιφέροντας ελάχιστη μείωση στο ρεύμα φορτίου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι πέρα από την ορθή λειτουργία των μοντέλων του Droop Index ως προς τον περιορισμό των κυκλοφορούντων ρευμάτων στην εκάστοτε τοπολογία, τα μοντέλα αυτά, μας δίνουν τιμές πολύ κοντά σε αυτές τις προσομοιώσεις. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει την ορθότητα και την εγκυρότητα των θεωρητικών σχέσεων που χρησιμοποιήσαμε, κατά την θεωρητική ανάλυση των τοπολογιών.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα και προτάσεις για συνέχεια

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση του φαινομένου των κυκλοφορούντων ρευμάτων και την εφαρμογή του ελέγχου Droop. Ακόμη, γίνονται προτάσεις για περαιτέρω ανάπτυξη του αντικειμένου της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

5.1 - Εισαγωγή

Η μελέτη του φαινομένου των κυκλοφορούντων ρευμάτων και η εφαρμογή του ελέγχου Droop σε διάφορες συνδεσμολογίες, οδηγεί σε ποικίλα συμπεράσματα. Τα συμπεράσματα αυτά αφορούν τόσο τις συνθήκες δημιουργίας των κυκλοφορούντων ρευμάτων, όσο και την αποτελεσματικότητα του ελέγχου Droop. Λαμβάνοντας υπ' όψη τα συμπεράσματα αυτά, γίνονται προτάσεις για περαιτέρω ενασχόληση με το αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής.

5.2 - Συμπεράσματα

Από τη μελέτη του φαινομένου των κυκλοφορούντων ρευμάτων προκύπτει το εξής συμπέρασμα:

- i. Στην πλειοψηφία των τοπολογιών, όταν δεν τηρείται η συνθήκη δημιουργίας κυκλοφορούντων ρευμάτων, δημιουργούνται «μεγάλα» κυκλοφορούντα ρεύματα.

Στην μεγάλη πλειοψηφία των συνδεσμολογιών που εξετάστηκαν, οι τιμές των κυκλοφορούντων ρευμάτων που δημιουργούνται είναι αρκετά υψηλές. Πιο συγκεκριμένα, τα κυκλοφορούντα ρεύματα αποτελούν πολύ μεγάλο ποσοστό του ρεύματος που παράγεται απ' τις πηγές τάσεις και διατρέχει τις γραμμές του δικτύου. Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, το κυκλοφορούν ρεύμα μίας πηγής προς το δίκτυο αποτελεί έως και το 94% του ρεύματος που παράγει η πηγή. Σε άλλες περιπτώσεις η τιμή του κυκλοφορούντος ρεύματος μίας πηγής A προς την πηγή B είναι τόσο υψηλή, ώστε η φορά του ρεύματος που παράγει η πηγή B καταλήγει να είναι αντίθετης φοράς από την επιθυμητή.

Εξαιρεση αποτελεί η διπολική συνδεσμολογία σύνδεσης δύο πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου (Droop Index in DC bipolar connection). Στην συγκεκριμένη τοπολογία, το κυκλοφορούν ρεύμα μεταξύ των δύο πηγών αποτελεί ένα σημαντικά μικρότερο ποσοστό του ρεύματος των γραμμών. Αναλυτικότερα το I_{c12} αποτελεί μόλις το 2,5% του ρεύματος I_1 .

Από την εφαρμογή του πρωτογενούς παθητικού ελέγχου Droop (Droop Control) προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- ii. Ο έλεγχος Droop αποτελεί, στην πλειοψηφία των τοπολογιών, λύση για την αντιμετώπιση του φαινομένου των κυκλοφορούντων ρευμάτων.

Η εφαρμογή του ελέγχου Droop στις τοπολογίες όπου οι τιμές των κυκλοφορούντων ρευμάτων ήταν αρκετά υψηλές είχε ως αποτέλεσμα την μείωσή τους. Η μείωση αυτή ήταν αρκετά μεγάλη, καθώς σε κάθε περίπτωση τα κυκλοφορούντα ρεύματα μειώθηκαν κατά πολύ μεγάλο ποσοστό. Τα ποσοστά αυτά κυμαίνονται από 78% έως και 94%. Ακόμη, αυτό που έχει ιδιαίτερη σημασία είναι η μείωση των κυκλοφορούντων ρευμάτων ως ποσοστό των ρευμάτων γραμμών. Σε

συγκεκριμένες περιπτώσεις, με την εφαρμογή του ελέγχου Droop, τα κυκλοφορούντα ρεύματα κάποιων πηγών προς το δίκτυο αποτελούν πλέον το 50% και το 37% των ρευμάτων που παράγει η εκάστοτε πηγή, έναντι του 94% και 91% που αποτελούσαν χωρίς τον έλεγχο Droop.

Ωστόσο, στην διπολική τοπολογία σύνδεσης δύο πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου (Droop Index in DC bipolar connection), η εφαρμογή του ελέγχου Droop δεν συνεισφέρει στην λύση του προβλήματος. Στη συγκεκριμένη τοπολογία, τα κυκλοφορούντα ρεύματα είναι πολύ «μικρά» με αποτέλεσμα η προσθήκη των αντιστάσεων Droop R_{droop} να μειώνει τα κυκλοφορούντα ρεύματα, αλλά με ρυθμό μικρότερο απ'τον οποίο αυξάνει τις απώλειες του δικτύου.

- iii. Ο έλεγχος Droop επιτυγχάνει τον καλύτερο διαμοιρασμό του φορτίου μεταξύ των πηγών.

Όπως έχει ήδη ειπωθεί, ο έλεγχος Droop επιτυγχάνεται μέσω του καλύτερου διαμοιρασμού του φορτίου. Αυτό γίνεται αντιληπτό από το γεγονός ότι μία απ'τις δύο βασικές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή του, ήταν ο ισομοιρασμός του φορτίου μεταξύ των πηγών. Η εφαρμογή του ελέγχου Droop στην πράξη, είχε το αναμενόμενο αποτέλεσμα. Οι διαφορές μεταξύ των ρευμάτων των γραμμών μειώνονται κατά πολύ. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε περίπτωση που ο έλεγχος Droop είχε αποτέλεσμα απέναντι στα κυκλοφορούντα ρεύματα, παρατηρήθηκαν μειώσεις μεταξύ των ρευμάτων των γραμμών της τάξης του 90% έως και 97%.

Σε περιπτώσεις που οι διαφορές μεταξύ των ρευμάτων των γραμμών δεν ήταν αρκετά μεγάλες, παρ'όλη την ύπαρξη υψηλών κυκλοφορούντων ρευμάτων, οι μειώσεις αυτών των διαφορών ήταν μικρότερες μεν αλλά αρκετά σημαντικές.

- iv. Τα κυκλοφορούντα ρεύματα δεν καταστέλλονται πλήρως με την εφαρμογή του ελέγχου Droop.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μπορεί τα κυκλοφορούντα ρεύματα να μειώνονται δραματικά με την εφαρμογή του ελέγχου Droop, ωστόσο συνεχίζουν να υπάρχουν στο δίκτυο. Μπορεί η τιμή τους να μειώνεται κατά έως και 94%, αλλά ακόμη και τότε, τα κυκλοφορούντα ρεύματα συνεχίζουν να αποτελούν μεγάλο μέρος των ρευμάτων των εκάστοτε γραμμών.

Ακόμη, σε τοπολογίες που το πρόβλημα των κυκλοφορούντων ρευμάτων δεν είναι τόσο έντονο, ο έλεγχος Droop δεν αποτελεί λύση του προβλήματος, καθώς μειώνει τα «μικρά» κυκλοφορούντα ρεύματα προκαλώντας μεγάλες απώλειες ισχύος.

- v. Ο διαμοιρασμός φορτίου μέσω του ελέγχου Droop δεν είναι ο καλύτερος δυνατός.

Παρόλη τη μείωση των διαφορών μεταξύ των ρευμάτων των γραμμών, οι διαφορές αυτές συνεχίζουν να υφίστανται. Με την εφαρμογή του ελέγχου Droop, αντιμετωπίστηκαν φαινόμενα κατά τα οποία πηγές διάφορων τοπολογιών δεν τροφοδοτούσαν το φορτίο, λόγω υψηλών κυκλοφορούντων ρευμάτων. Μετά την εφαρμογή του ελέγχου Droop, μπορεί πλέον οι πηγές αυτές να τροφοδοτούν το φορτίο, αλλά το φορτίο δεν ισομοιράζεται μεταξύ των διαφόρων πηγών.

Για παράδειγμα, στην μονοπολική τοπολογία σύνδεσης δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Two terminal DC unipolar connection), οι πηγές συνεισφέρουν στο φορτίο με αναλογία 88%-12% μετά την εφαρμογή του ελέγχου Droop. Αντίστοιχα, στην μονοπολική τοπολογία σύνδεσης τριών πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Three terminal DC unipolar connection), οι πηγές συνεισφέρουν στο φορτίο με αναλογία 59%-14%-27% μετά την εφαρμογή του ελέγχου Droop.

5.3 – Προτάσεις για συνέχεια

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω συμπεράσματα που αφορούν την αποτελεσματικότητα του ελέγχου Droop οι προτάσεις για συνέχεια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας κινούνται σε δύο κατευθύνσεις.

Η πρώτη κατεύθυνση αφορά την ανάλυση και εφαρμογή του πρωτογενούς ελέγχου Droop σε περισσότερες τοπολογίες. Παραδείγματα τέτοιων τοπολογιών είναι οι γενικεύσεις των διπολικών τοπολογιών που εξετάστηκαν εδώ, για πολλαπλές πηγές σε κάθε πόλο της τοπολογίας.

Η δεύτερη κατεύθυνση αφορά την παράλληλη εφαρμογή του πρωτογενούς ελέγχου Droop με περισσότερες μορφές ελέγχου. Αυτές οι μορφές ελέγχου μπορεί να είναι κάποιο είδος πρωτογενούς ενεργού ελέγχου, ελέγχου ανωτέρου επιπέδου ή ακόμη και συνδυασμός αυτών.

Παράρτημα

Σε κάθε τοπολογία που εξετάστηκε, εφαρμόστηκε μέσω των προγραμμάτων Matlab και Matlab Simulink ο έλεγχος Droop, όπως αυτός παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3. Σε αυτό το παράρτημα παρατίθενται οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των αντιστάσεων Droop κάθε τοπολογίας. Για την εύρεση των αντιστάσεων αυτών χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης Droop Index (DI). Στην συνέχεια οι αντιστάσεις Droop προστέθηκαν στην εκάστοτε τοπολογία με σκοπό την ελαχιστοποίηση των κυκλοφορούντων ρευμάτων.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι αλγόριθμοι όλων των τοπολογιών σε γλώσσα Matlab.

1) Τοπολογία σύνδεσης δύο πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (Two terminal DC unipolar connection)

```
Vdc1=335;
Vdc2=310;
R1=1.2;
R2=1.5;
RL=105.625;
x=Vdc1/Vdc2;
if x~=1
y=R1/R2;
j=0.1;
m=(R2+j);
q=(m^2)*y+(m*RL*(y+1));
I1a=((m+RL)*x*Vdc2)-(RL*Vdc2)/q;
I2a(((y*m)+RL)*Vdc2)-(x*RL*Vdc2)/q;
Ploss_max(((I1a^2)*y*m)+((I2a^2)*m));
Np=(1/(Ploss_max));
Ic_max(((abs(x-1))*Vdc2)/((y+1)*m));
Ni=(1/(Ic_max));
min=10;
i=0.1;
p=1;
I1=zeros(200,1);
I2=zeros(200,1);
Ploss=zeros(200,1);
Ploss_per=zeros(200,1);
Ic=zeros(200,1);
Ic_per=zeros(200,1);
DI=zeros(200,1);
Rd=zeros(200,1);
for i=0.1:0.1:20
m=(R2+i);
q=(m^2)*y+(m*RL*(y+1));
I1(p)=((m+RL)*x*Vdc2)-(RL*Vdc2)/q;
I2(p)=(((y*m)+RL)*Vdc2)-(x*RL*Vdc2)/q;
Ploss(p)=(((I1(p)^2)*y*m)+((I2(p)^2)*m));
Ploss_per(p)=(((I1(p)^2)*y*m)+((I2(p)^2)*m))*Np;
Ic(p)=((x-1)*Vdc2)/((y+1)*m);
Ic_per(p)=((abs(x-1))*Vdc2)/((y+1)*m))*Ni;
DI(p)=((1/2)*(abs(Ic(p)))*Ni)+((1/2)*(Ploss(p)*Np));
p=p+1;
end
l=1;
for l=1:1:200
Rd(l)=1*0.1;
if DI(l)<min
min=DI(l);
Rd2=1*0.1;
end
end
Rd1=y*Rd2;
else
Rd1=0;
Rd2=0;
end
end
```

2) Τοπολογία σύνδεσης n πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (n terminal DC unipolar connection)

Υπενθυμίζουμε ότι κατά την προσομοίωση της συγκεκριμένης τοπολογίας επιλέχθηκε $n = 3$.

```
Vdc1=335;
Vdc2=310;
Vdc3=320;
R1=1.1;
R2=0.7;
R3=1.2;
RL=105.625;
xa=Vdc1/Vdc2;
xc=Vdc3/Vdc2;
if xa~=1 || xc~=1
    ya=R1/R2;
    yc=R3/R2;
    j=0.1;
    m=(R2+j);
    Ic12a=(Vdc2*(xa-1)*yc)/(m*(ya+yc+(ya*yc)));
    Ic13a=(Vdc2*(xa-xc))/(m*(ya+yc+(ya*yc)));
    Ic23a=(Vdc2*(1-xc)*ya)/(m*(ya+yc+(ya*yc)));
    Ic_max=abs(Ic12a)+abs(Ic13a)+abs(Ic23a);
    Ni=(1/(Ic_max));
    I1a=((xa*Vdc2*yc)/(RL*(ya+yc+(ya*yc))))+Ic12a+Ic13a;
    I2a=((Vdc2*ya*yc)/(RL*(ya+yc+(ya*yc))))-Ic12a+Ic23a;
    I3a=((xc*Vdc2*ya)/(RL*(ya+yc+(ya*yc))))-Ic13a-Ic23a;
    Ploss_max=m*((I1a^2)*ya+(I2a^2)+((I3a^2)*yc));
    Np=(1/(Ploss_max));
    min=10;
    i=0.1;
    p=1;
    Ic12=zeros(200,1);
    Ic13=zeros(200,1);
    Ic23=zeros(200,1);
    Ic=zeros(200,1);
    Ic_per=zeros(200,1);
    Ic1=zeros(200,1);
    Ic2=zeros(200,1);
    Ic3=zeros(200,1);
    I1=zeros(200,1);
    I2=zeros(200,1);
    I3=zeros(200,1);
    Ploss=zeros(200,1);
    Ploss_per=zeros(200,1);
    DI=zeros(200,1);
    Rd=zeros(200,1);
    for i=0.1:0.1:20
        m=(R2+i);
        Ic12(p)=(Vdc2*(xa-1)*yc)/(m*(ya+yc+(ya*yc)));
        Ic13(p)=(Vdc2*(xa-xc))/(m*(ya+yc+(ya*yc)));
        Ic23(p)=(Vdc2*(1-xc)*ya)/(m*(ya+yc+(ya*yc)));
        Ic(p)=abs(Ic12(p))+abs(Ic13(p))+abs(Ic23(p));
        Ic_per(p)=(abs(Ic12(p))+abs(Ic13(p))+abs(Ic23(p)))*Ni;
        Ic1(p)=Ic12(p)+Ic13(p);
        Ic2(p)=-Ic12(p)+Ic23(p);
        Ic3(p)=-Ic13(p)-Ic23(p);
        I1(p)=((xa*Vdc2*yc)/(RL*(ya+yc+(ya*yc))))+Ic1(p);
        I2(p)=((Vdc2*ya*yc)/(RL*(ya+yc+(ya*yc))))+Ic2(p);
        I3(p)=((xc*Vdc2*ya)/(RL*(ya+yc+(ya*yc))))+Ic3(p);
        Ploss(p)=m*((I1(p)^2)*ya+(I2(p)^2)+((I3(p)^2)*yc));
        Ploss_per(p)=(m*((I1(p)^2)*ya+(I2(p)^2)+((I3(p)^2)*yc)))*Np;
        DI(p)=((1/2)*(abs(Ic(p)))*Ni)+((1/2)*(Ploss(p)*Np));
        p=p+1;
    end
    l=1;
    for l=1:1:200
        Rd(l)=1*0.1;
        if DI(l)<min
            min=DI(l);
            Rd2=l*0.1;
        end
    end
    Rd1=ya*Rd2;
    Rd3=yc*Rd2;
else
    Rd1=0;
    Rd2=0;
    Rd3=0;
end
end
```

3) Τοπολογία κοινής σύνδεσης δύο παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with two parallel voltage sources)

```

Vdc1=330;
Vdc2=310;
R1=0.7;
R2=0.9;
Rline=1.4;
Rfortiou=105.625;
RL=Rfortiou+Rline;
x=Vdc1/Vdc2;
if x~=1
y=R1/R2;
j=0.1;
m=(R2+j);
q=(m^2)*y+(m*RL*(y+1));
I1a=((m+RL)*x*Vdc2)-(RL*Vdc2)/q;
I2a(((y*m)+RL)*Vdc2)-(x*RL*Vdc2)/q;
Ploss_max(((I1a^2)*y*m)+((I2a^2)*m));
Np=(1/(Ploss_max));
Ic_max(((abs(x-1))*Vdc2)/((y+1)*m));
Ni=(1/(Ic_max));
min=10;
i=0.1;
p=1;
I1=zeros(200,1);
I2=zeros(200,1);
Ploss=zeros(200,1);
Ploss_per=zeros(200,1);
Ic=zeros(200,1);
Ic_per=zeros(200,1);
DI=zeros(200,1);
Rd=zeros(200,1);
for i=0.1:0.1:20
m=(R2+i);
q=(m^2)*y+(m*RL*(y+1));
I1(p)=((m+RL)*x*Vdc2)-(RL*Vdc2)/q;
I2(p)=(((y*m)+RL)*Vdc2)-(x*RL*Vdc2)/q;
Ploss(p)=((I1(p)^2)*y*m)+((I2(p)^2)*m);
Ploss_per(p)=(((I1(p)^2)*y*m)+((I2(p)^2)*m))*Np;
Ic(p)=(((x-1)*Vdc2)/((y+1)*m));
Ic_per(p)=(((abs(x-1))*Vdc2)/((y+1)*m))*Ni;
DI(p)=(((1/2)*(abs(Ic(p))))*Ni)+((1/2)*(Ploss(p)*Np));
p=p+1;
end
l=1;
for l=1:1:200
Rd(l)=1*0.1;
if DI(l)<min
min=DI(l);
Rd2=1*0.1;
end
end
Rd1=y*Rd2;
else
Rd1=0;
Rd2=0;
end
end

```

4) Τοπολογία κοινής σύνδεσης n παράλληλων πηγών σε μονοπολική συνδεσμολογία (One terminal DC unipolar connection with n parallel voltage sources)

Υπενθυμίζουμε ότι κατά την προσομοίωση της συγκεκριμένης τοπολογίας επιλέχθηκε $n = 4$.

```

Vdc1=330;
Vdc2=310;
Vdc3=325;
Vdc4=320;
R1=0.7;
R2=0.9;
R3=1.1;
R4=1.25;
Rline=1.4;
Rfortiou=105.625;
RL=Rfortiou+Rline;

```

```

xa=Vdc1/Vdc2;
xc=Vdc3/Vdc2;
xd=Vdc4/Vdc2;
if xa~=1 || xc~=1 || xd~=1
    ya=R1/R2;
    yc=R3/R2;
    yd=R4/R2;
    j=0.1;
    m=(R2+j);
    Ic12a=(Vdc2*(xa-1)*yc*yd)/(m*((ya*yd)+(yc*ya)+(yc*yd)+(ya*yc*yd)));
    Ic13a=(Vdc2*(xa-xc)*yd)/(m*((ya*yd)+(yc*ya)+(yc*yd)+(ya*yc*yd)));
    Ic14a=(Vdc2*(xa-xd)*yc)/(m*((ya*yd)+(yc*ya)+(yc*yd)+(ya*yc*yd)));
    Ic23a=(Vdc2*(1-xc)*ya*yd)/(m*((ya*yd)+(yc*ya)+(yc*yd)+(ya*yc*yd)));
    Ic24a=(Vdc2*(1-xd)*yc*ya)/(m*((ya*yd)+(yc*ya)+(yc*yd)+(ya*yc*yd)));
    Ic34a=(Vdc2*(xc-xd)*ya)/(m*((ya*yd)+(yc*ya)+(yc*yd)+(ya*yc*yd)));
    Ic_max=abs(Ic12a)+abs(Ic13a)+abs(Ic14a)+abs(Ic23a)+abs(Ic24a)+abs(Ic34a);
    Ni=(1/(Ic_max));
    I1a=((xa*Vdc2*yc*yd)/(RL*((ya*yd)+(yc*yd)+(yc*ya)+(ya*yc*yd))))+Ic12a+Ic13a+Ic14a;
    I2a=((Vdc2*ya*yc*yd)/(RL*((ya*yd)+(yc*yd)+(yc*ya)+(ya*yc*yd))))-Ic12a+Ic23a+Ic24a;
    I3a=((xc*Vdc2*ya*yd)/(RL*((ya*yd)+(yc*yd)+(yc*ya)+(ya*yc*yd))))-Ic13a-Ic23a+Ic34a;
    I4a=((xd*Vdc2*ya*yc)/(RL*((ya*yd)+(yc*yd)+(yc*ya)+(ya*yc*yd))))-Ic14a-Ic24a-Ic34a;
    Ploss_max=m*((I1a^2)*ya)+(I2a^2)+((I3a^2)*yc)+((I4a^2)*yd);
    Np=(1/(Ploss_max));
    min=10;
    i=0.1;
    p=1;
    Ic12=zeros(200,1);
    Ic13=zeros(200,1);
    Ic14=zeros(200,1);
    Ic23=zeros(200,1);
    Ic24=zeros(200,1);
    Ic34=zeros(200,1);
    Ic=zeros(200,1);
    Ic_per=zeros(200,1);
    Ic1=zeros(200,1);
    Ic2=zeros(200,1);
    Ic3=zeros(200,1);
    Ic4=zeros(200,1);
    I1=zeros(200,1);
    I2=zeros(200,1);
    I3=zeros(200,1);
    I4=zeros(200,1);
    Ploss=zeros(200,1);
    Ploss_per=zeros(200,1);
    DI=zeros(200,1);
    Rd=zeros(200,1);
    for i=0.1:0.1:20
        m=(R2+i);
        Ic12(p)=(Vdc2*(xa-1)*yc*yd)/(m*((ya*yd)+(yc*yd)+(yc*ya)+(ya*yc*yd)));
        Ic13(p)=(Vdc2*(xa-xc)*yd)/(m*((ya*yd)+(yc*yd)+(yc*ya)+(ya*yc*yd)));
        Ic14(p)=(Vdc2*(xa-xd)*yc)/(m*((ya*yd)+(yc*yd)+(yc*ya)+(ya*yc*yd)));
        Ic23(p)=(Vdc2*(1-xc)*ya*yd)/(m*((ya*yd)+(yc*yd)+(yc*ya)+(ya*yc*yd)));
        Ic24(p)=(Vdc2*(1-xd)*yc*ya)/(m*((ya*yd)+(yc*yd)+(yc*ya)+(ya*yc*yd)));
        Ic34(p)=(Vdc2*(xc-xd)*ya)/(m*((ya*yd)+(yc*yd)+(yc*ya)+(ya*yc*yd)));
        Ic(p)=abs(Ic12(p))+abs(Ic13(p))+abs(Ic14(p))+abs(Ic23(p))+abs(Ic24(p))+abs(Ic34(p));
        Ic_per(p)=Ic(p)*Ni;
        Ic1(p)=Ic12(p)+Ic13(p)+Ic14(p);
        Ic2(p)=-Ic12(p)+Ic23(p)+Ic24(p);
        Ic3(p)=-Ic13(p)-Ic23(p)+Ic34(p);
        Ic4(p)=-Ic14(p)-Ic24(p)-Ic34(p);
        I1(p)=((xa*Vdc2*yc*yd)/(RL*((ya*yd)+(yc*yd)+(yc*ya)+(ya*yc*yd))))+Ic1(p);
        I2(p)=((Vdc2*ya*yc*yd)/(RL*((ya*yd)+(yc*yd)+(yc*ya)+(ya*yc*yd))))+Ic2(p);
        I3(p)=((xc*Vdc2*ya*yd)/(RL*((ya*yd)+(yc*yd)+(yc*ya)+(ya*yc*yd))))+Ic3(p);
        I4(p)=((xd*Vdc2*ya*yc)/(RL*((ya*yd)+(yc*yd)+(yc*ya)+(ya*yc*yd))))+Ic4(p);
        Ploss(p)=m*((I1(p)^2)*ya)+(I2(p)^2)+((I3(p)^2)*yc)+((I4(p)^2)*yd);
        Ploss_per(p)=Ploss(p)*Np;
        DI(p)=((1/2)*(Ic(p))*Ni)+((1/2)*(Ploss(p)*Np));
        p=p+1;
    end
    l=1;
    for l=1:1:200
        Rd(l)=1*0.1;
        if DI(l)<min
            min=DI(l);
            Rd2=l*0.1;
        end
    end
    Rd1=ya*Rd2;
    Rd3=yc*Rd2;
    Rd4=yd*Rd2;
else
    Rd1=0;
    Rd2=0;
    Rd3=0;
    Rd4=0;
end
end

```

5) Τοπολογία σύνδεση δύο πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου και αρνητικού πόλου-ουδετέρου (DC bipolar connection)

```

Vdc1=340;
Vdc2=-315;
R1=1.2;
R2=1.6;
Ra=45;
Rb=40.714;
Rc=28.5;
x=Vdc1/Vdc2;
if x~-1
y=(R1+Ra+(2*Rc))/(R2+Rb+(2*Rc));
j=20;
m=(R2+j);
q=((m*y)+(y*Rb)+(2*y*Rc)-Ra-Rc)*(Rb+Rc)+(m*(Ra+Rc)+(Ra*Rb)+(Ra*Rc)+(Rb*Rc));
I1a=((m+Rb)*x*Vdc2)-(2*Rc*Vdc2)+(Rc*Vdc2*(x+1))/q;
I2a=((y*m)+(y*Rb)+(2*y*Rc)-Rc)*Vdc2-(2*x*Rc*Vdc2)+(Rc*Vdc2*(1+x))/q;
Ploss_max=((I1a^2)*((m*y)+(y*Rb)+(2*y*Rc)-Ra-Rc))+((I2a^2)*m);
Np=(1/Ploss_max);
k=0;
m=(R2+k);
q=((m*y)+(y*Rb)+(2*y*Rc)-Ra-Rc)*(Rb+Rc)+(m*(Ra+Rc)+(Ra*Rb)+(Ra*Rc)+(Rb*Rc));
Ic_max=(abs(Vdc2*(x+1))*Rc)/q;
Ni=(1/(Ic_max));
min=10;
i=0.1;
p=1;
I1=zeros(200,1);
I2=zeros(200,1);
Ploss=zeros(200,1);
Ploss_per=zeros(200,1);
Ic=zeros(200,1);
Ic_per=zeros(200,1);
DI=zeros(200,1);
Rd=zeros(200,1);
for i=0.1:0.1:20
m=(R2+i);
q=((m*y)+(y*Rb)+(2*y*Rc)-Ra-Rc)*(Rb+Rc)+(m*(Ra+Rc)+(Ra*Rb)+(Ra*Rc)+(Rb*Rc));
I1(p)=((m+Rb)*x*Vdc2)-(2*Rc*Vdc2)+(Rc*Vdc2*(x+1))/q;
I2(p)=((y*m)+(y*Rb)+(2*y*Rc)-Rc)*Vdc2-(2*x*Rc*Vdc2)+(Rc*Vdc2*(1+x))/q;
Ploss(p)=((I1(p)^2)*((m*y)+(y*Rb)+(2*y*Rc)-Ra-Rc))+((I2(p)^2)*m);
Ploss_per(p)=Ploss(p)*Np;
Ic(p)=(Vdc2*(x+1)*Rc)/q;
Ic_per(p)=abs(Ic(p))*Ni;
DI(p)=((1/2)*(abs(Ic(p))*Ni))+((1/2)*(Ploss(p)*Np));
p=p+1;
end
l=1;
for l=1:1:200
Rd(l)=1*0.1;
if DI(l)<min
min=DI(l);
Rd2=1*0.1;
end
end
Rd1=(y*Rd2)+(y*Rb)+(2*y*Rc)-Ra-Rc;
I1zero=((Vdc1*(R2+Rb))-
(2*Rc*Vdc2)+(Rc*(Vdc1+Vdc2)))/((R1*(Rb+Rc)+(R2*(Ra+Rc)+(Ra*Rb)+(Ra*Rc)+(Rb+Rc)));
I2zero=((Vdc2*(R1+Ra))-
(2*Rc*Vdc1)+(Rc*(Vdc2+Vdc1)))/((R1*(Rb+Rc)+(R2*(Ra+Rc)+(Ra*Rb)+(Ra*Rc)+(Rb+Rc)));
Plosszero=((I1zero^2)*R1)+(I2zero^2)*R2;
Plosszero_per=Np*Plosszero;
minzero=((1/2)+((1/2)*Np*Plosszero));
if minzero<min
Rd1=0;
Rd2=0;
end
else
Rd2=0;
Rd1=0;
end
end

```

6) Τοπολογία σύνδεσης τριών πηγών μεταξύ θετικού πόλου-ουδετέρου, αρνητικού πόλου-ουδετέρου και θετικού-αρνητικού πόλου (DC bipolar connection with 1 more voltage source connected between + - poles)

```

Vdc1=330;
Vdc2=-315;
Vdc3=670;
r=1.2;
RL=35.2083;
xa=Vdc1/Vdc2;
xc=Vdc3/Vdc2;
if xa~-1 || xc~-2
    j=0.1;
    m=(r+j);
    I1a=((m*xa*Vdc2)+(Vdc2*RL*(xa-1-xc)))/(m*(m+(3*RL)));
    I2a=((m*Vdc2)+(Vdc2*RL*(xc+1-xa)))/(m*(m+(3*RL)));
    I3a=((m*xc*Vdc2)+(Vdc2*RL*(xc+1-xa)))/(m*(m+(3*RL)));
    Idif_max=abs((2*I1a)-I3a)+abs(I1a+I2a)+abs(I3a+(2*I2a));
    Ni=(1/(Idif_max));
    k=20;
    m=(r+k);
    I1b=((m*xa*Vdc2)+(Vdc2*RL*(xa-1-xc)))/(m*(m+(3*RL)));
    I2b=((m*Vdc2)+(Vdc2*RL*(xc+1-xa)))/(m*(m+(3*RL)));
    I3b=((m*xc*Vdc2)+(Vdc2*RL*(xc+1-xa)))/(m*(m+(3*RL)));
    Ploss_max=m*((I1b^2)+(I2b^2)+(I3b^2));
    Np=(1/(Ploss_max));
    min=10;
    i=0.1;
    p=1;
    Ic1=zeros(200,1);
    Ic2=zeros(200,1);
    Ic3=zeros(200,1);
    I1=zeros(200,1);
    I2=zeros(200,1);
    I3=zeros(200,1);
    Ploss=zeros(200,1);
    Ploss_per=zeros(200,1);
    Idif=zeros(200,1);
    Idif_per=zeros(200,1);
    DI=zeros(200,1);
    IL1=zeros(200,1);
    IL2=zeros(200,1);
    IL3=zeros(200,1);
    Rd=zeros(200,1);
    for i=0.1:0.1:20
        m=(r+i);
        I1(p)=((m*xa*Vdc2)+(Vdc2*RL*(xa-1-xc)))/(m*(m+(3*RL)));
        I2(p)=((m*Vdc2)+(Vdc2*RL*(xc+1-xa)))/(m*(m+(3*RL)));
        I3(p)=((m*xc*Vdc2)+(Vdc2*RL*(xc+1-xa)))/(m*(m+(3*RL)));
        Ic1(p)=(Vdc2*RL*(xa-1-xc))/(m*(m+(3*RL)));
        Ic2(p)=(Vdc2*RL*(xc+1-xa))/(m*(m+(3*RL)));
        Ic3(p)=(Vdc2*RL*(xc+1-xa))/(m*(m+(3*RL)));
        Ploss(p)=m*((I1(p))^2+(I2(p))^2+(I3(p))^2);
        Ploss_per(p)=m*((I1(p))^2+(I2(p))^2+(I3(p))^2)*Np;
        Idif(p)=abs((2*I1(p))-I3(p))+abs(I1(p)+I2(p))+abs(I3(p)+(2*I2(p)));
        Idif_per(p)=abs((2*I1(p))-I3(p))+abs(I1(p)+I2(p))+abs(I3(p)+(2*I2(p)))*Ni;
        DI(p)=((1/2)*(Idif(p))*Ni)+((1/2)*(Ploss(p))*Np);
        IL1(p)=I1(p)-Ic1(p);
        IL2(p)=I2(p)-Ic2(p);
        IL3(p)=I3(p)-Ic3(p);
        p=p+1;
    end
    l=1;
    for l=1:1:200
        Rd(l)=1*0.1;
        if DI(l)<min
            min=DI(l);
            Rd2=1*0.1;
        end
    end
    Rd1=Rd2;
    Rd3=Rd2;
else
    Rd1=0;
    Rd2=0;
    Rd3=0;
end
end

```


Βιβλιογραφία

- [1] Abdullah S. Emhemed , Graeme M. Burt “Protecting the last mile – enabling an LVDC distribution network”, University of Strathclyde Transformation of the Top and Tail, EPSRC/Top&Tail/TR/2013-001, 2013.
- [2] Augustine, Sijo, Mahesh K., MishraN, Lakshmi Narasamma “Adaptive Droop Control Strategy for Load Sharing and Circulating Current Minimization in Low Voltage Standalone DC Microgrid, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, TSTE-00077-2014.R1, 23 May 2014.
- [3] Christina Papadimitriou, Erietta Zountouridou, Nikos Hatziargyriou - Professor, “Review of Hierarchical Control in DC Microgrids”, EPSR-D-14-00267R2, 12 March 2014
- [4] Jenni Rekola, “DC distribution and power electronics applications in Smart Grids”.