



ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΜΑΘΗΜΑ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΚΑΙ
ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Θεόφιλος Παπαδόπουλος

Αν. Καθηγητής Δ.Π.Θ.

Ξάνθη, Οκτώβριος 2022

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος των σημειώσεων είναι να υποστηρίξουν το προπτυχιακό μάθημα «Ανάλυση Σφαλμάτων και Μεταβατικών Καταστάσεων στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας» που διδάσκεται στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών υπολογιστών του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΚΕΦΑΛΑΙΟ	XVII
1.1	Γενικά.....	xvii
1.2	Πολύ γρήγορα μεταβατικά φαινόμενα.....	xix
1.3	Γρήγορα μεταβατικά φαινόμενα	xx
1.4	Αργά μεταβατικά φαινόμενα	xx
2	ΚΕΦΑΛΑΙΟ	1
2.1	Εισαγωγή.....	1
2.2	Ορισμός συμμετρικών συνιστωσών.....	1
2.3	Ισχύς στις συμμετρικές συνιστώσες.....	10
2.4	Ακολουθιακές σύνθετες αντιστάσεις.....	11
2.4.1	Τριφασικό σύστημα	11
2.4.2	Τριφασικό σύστημα με ζεύξεις μεταξύ φάσεων και μεταξύ φάσεων και τέταρτου αγωγού	15
2.4.3	Η έννοια των συνθέτων αντιστάσεων συμμετρικών συνιστωσών.....	16
2.5	Στοιχεία δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας σε συμμετρικές συνιστώσες.....	18
2.5.1	Σύγχρονες γεννήτριες.....	18
2.5.2	Ασύγχρονες μηχανές	20
2.5.3	Μετασχηματιστές.....	21
2.5.4	Εναέριες γραμμές μεταφοράς και καλώδια ισχύος	26
2.5.5	Φορτία.....	28
2.5.6	Δίκτυα συμμετρικών συνιστωσών	30
3	ΚΕΦΑΛΑΙΟ	33
3.1	Εισαγωγή.....	33
3.2	Τριπολικό βραχυκύκλωμα.....	34
3.3	Διπολικό βραχυκύκλωμα	36
3.3.1	Διπολικό βραχυκύκλωμα χωρίς επαφή γης.....	37
3.3.2	Διπολικό βραχυκύκλωμα με επαφή γης.....	40
3.3.3	Μονοπολικό βραχυκύκλωμα	43
3.3.4	Σύνοψη	47
4	ΚΕΦΑΛΑΙΟ	49
4.1	Εισαγωγή.....	49
4.2	Μεταβατική απόκριση ρεύματος βραχυκυκλώματος	53
4.2.1	Σφάλματα μακριά από γεννήτρια.....	54

4.2.2 Σφάλματα κοντά σε γεννήτρια.....	58
4.3 Πρότυπο IEC 60909	61
4.3.1 Βασικοί ορισμοί.....	61
4.3.2 Κατηγορίες σφαλμάτων	66
4.4 Σύνθετες αντιστάσεις	68
4.4.1 Υποσταθμοί τροφοδοσίας.....	68
4.4.2 Σύγχρονες γεννήτριες.....	69
4.4.3 Μετασηματιστές.....	71
4.4.4 Εναέριες γραμμές ή συστήματα καλωδίων	73
4.4.5 Πηνίο περιορισμού ρεύματος βραχυκυκλώσεως.....	73
4.4.6 Ασύγχρονοι κινητήρες.....	74
4.4.7 Ανεμογεννήτριες	75
4.4.8 Σταθμοί παραγωγής ισχύος με μετατροπείς	75
4.5 Υπολογισμός ρευμάτων βραχυκυκλώσεως.....	76
4.5.1 Γενικά	76
4.5.2 Υπολογισμός μέγιστου και ελάχιστου αρχικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως ...	77
4.5.3 Συνεισφορά των ασύγχρονων μηχανών στο ρεύμα βραχυκυκλώσεως.....	78
4.6 Αρχικά ρεύματα βραχυκυκλώσεως.....	78
4.6.1 Τριπολικό βραχυκύκλωμα.....	78
4.6.2 Διπολικό βραχυκύκλωμα	79
4.6.3 Διπολικό βραχυκύκλωμα με επαφή γης.....	80
4.6.4 Μονοπολικό βραχυκύκλωμα	80
4.7 Κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως.....	81
4.8 Ρεύμα διακοπής	84
4.8.1 Ρεύμα διακοπής σύγχρονων μηχανών	84
4.8.2 Ρεύμα διακοπής ασύγχρονων μηχανών	85
4.8.3 Ρεύμα διακοπής δικτύων	86
4.8.4 Συνολικό ρεύμα διακοπής	87
4.8.5 Ρεύμα διακοπής ασύμμετρου βραχυκυκλώματος	87
4.9 Συνιστώσα συνεχούς ρεύματος του ρεύματος βραχυκυκλώσεως.....	87
4.10 Μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως.....	88
4.10.1 Τριφασικό βραχυκύκλωμα	88
4.10.2 Ασύμμετρο βραχυκύκλωμα.....	91
5 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΕΩΣ	93
5.1 Γενικά.....	93
5.2 Απλό δίκτυο διανομής μέσης και χαμηλής τάσης	93

5.2.1 Υπολογισμοί σφάλματος F1	94
5.3 Σύνθετο δίκτυο ΣΗΕ.....	103
5.3.1 Υπολογισμοί σφάλματος F1	105
5.3.2 Υπολογισμοί σφάλματος F2	123
5.3.3 Υπολογισμοί σφάλματος F3	134
5.4 Δίκτυο με ΑΠΕ	144
5.4.1 Υπολογισμοί σφάλματος F2	144
6 ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΕΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΑ ΣΗΕ.....	152
6.1 Γενικά.....	152
6.2 Κύκλωμα RL	152
6.3 Κύκλωμα RLC.....	154
6.3.1 Υποαπόσβεση ή ασθενής απόσβεση	155
6.3.2 Υπεραπόσβεση	156
6.4 Ρεύμα βραχυκυκλώσεως.....	156
6.5 Συστοιχίες πυκνωτών	157
6.6 Μεταβατικές καταστάσεις διακοπής λειτουργίας κυκλώματος.....	159
6.6.1 Διακοπτόμενα ρεύματα βραχυκυκλώσεως	160
6.6.2 Αποσύνδεση φορτίου	162
6.6.3 Διακοπή τριφασικού κυκλώματος	163
6.6.4 Διακοπή συστοιχίας πυκνωτών	167
6.6.5 Σφάλματα σε γραμμές μικρού μήκους	170
7 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ.....	175
7.1 Εισαγωγή	175
7.2 Κύκλωμα RL	175
7.2.1 Επίλυση με υπολογισμούς	175
7.2.2 Προσομοιώσεις με το λογισμικό ATP-EMTP	179
7.3 Ρεύμα βραχυκυκλώσεως.....	181
7.4 Κύκλωμα RLC.....	184
7.4.1 Επίλυση με υπολογισμούς	184
7.4.2 Προσομοιώσεις με το λογισμικό ATP-EMTP	186
7.5 Κύκλωμα LC (συστοιχίες πυκνωτών).....	188
7.5.1 Επίλυση με υπολογισμούς	188
7.5.2 Προσομοιώσεις με το λογισμικό ATP-EMTP	189
7.6 Διακοπή ρεύματος βραχυκυκλώματος	190
7.6.1 Επίλυση με υπολογισμούς	191
7.6.2 Προσομοιώσεις με το λογισμικό ATP-EMTP	192
7.7 Διακοπή ρεύματος τριπολικού βραχυκυκλώματος με σύνδεση γης.....	193

7.8 Διακοπή ρεύματος τριπολικού βραχυκυκλώματος χωρίς επαφή γης.....	195
7.9 Αποσύνδεση φορτίου.....	198
8 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	201
8.1 Ομοπολική σύνθετη αντίσταση μετασχηματιστών.....	201
8.2 Διερευνήσεις βραχυκυκλωμάτων	202
8.2.1 Διπολικό βραχυκύκλωμα με επαφή γης.....	202
8.2.2 Μονοπολικό βραχυκύκλωμα	204
9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	207

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Κατάταξη χαρακτηριστικών περιοχών συχνότητας υπερτάσεων.....	xviii
Σχήμα 1.2: Κεραυνικό πλήγμα σε ανεμογεννήτρια.....	xix
Σχήμα 2.1: Απλό τριφασικό σύστημα.....	2
Σχήμα 2.2: Στοιχεία ιδιοδιανυσμάτων πινάκων με κυκλική συμμετρία.....	3
Σχήμα 2.3: Διανύσματα τάσης ορθής ακολουθίας.....	7
Σχήμα 2.4: Διανύσματα τάσης αντίστροφης ακολουθίας.....	8
Σχήμα 2.5: Διανύσματα τάσης ομοπολικής ακολουθίας.....	8
Σχήμα 2.6: Ανάλυση συστήματος τάσεων abc σε συμμετρικές συνιστώσες.....	9
Σχήμα 2.7: Τριφασικό σύστημα με ζεύξεις μεταξύ των φάσεων.....	12
Σχήμα 2.8: Κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών σύγχρονων μηχανών.....	19
Σχήμα 2.9: Κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών ασύγχρονων μηχανών. α) Ευθύ σύστημα στη λειτουργία κινητήρα, β) αντίστροφο σύστημα στη λειτουργία κινητήρα, γ) ευθύ σύστημα κατά την τροφοδότηση σφάλματος, δ) αντίστροφο σύστημα κατά την τροφοδότηση σφάλματος.....	21
Σχήμα 2.10: Μετασχηματιστής ΥΔ με γειωμένο δευτερεύον (α) τριφασικό κύκλωμα (β) κύκλωμα ομοπολικής συνιστώσας.....	23
Σχήμα 2.11: Μετασχηματιστής ΥΔ με γειωμένο δευτερεύον (α) τριφασικό κύκλωμα (β) κύκλωμα ομοπολικής συνιστώσας.....	24
Σχήμα 2.12: Μετασχηματιστής ΥΔ με γειωμένο δευτερεύον (α) τριφασικό κύκλωμα (β) κύκλωμα ομοπολικής συνιστώσας.....	25
Σχήμα 2.13: Μετασχηματιστής ΥΔ με γειωμένο δευτερεύον (α) τριφασικό κύκλωμα (β) κύκλωμα ομοπολικής συνιστώσας.....	25
Σχήμα 2.14: Κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών φορτίου σε σύνδεση αστέρα....	29
Σχήμα 2.15: Κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών φορτίου σε σύνδεση τριγώνου.	30
Σχήμα 2.16: Μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος.....	31
Σχήμα 2.17: Κύκλωμα ορθής συνιστώσας.....	31
Σχήμα 2.18: Κύκλωμα αντίστροφης συνιστώσας.....	31
Σχήμα 2.19: Κύκλωμα ομοπολικής συνιστώσας.....	32
Σχήμα 3.1: Τριπολικό βραχυκύκλωμα με επαφή γης.....	34

Σχήμα 3.2: Κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών για το τριπολικό βραχυκύκλωμα με επαφή γης.....	35
Σχήμα 3.3: Διπολικό βραχυκύκλωμα χωρίς επαφή γης.	37
Σχήμα 3.4: Κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών για το διπολικό βραχυκύκλωμα χωρίς επαφή γης.	38
Σχήμα 3.5: Διπολικό βραχυκύκλωμα με επαφή γης.	40
Σχήμα 3.6: Κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών για το διπολικό βραχυκύκλωμα με επαφή γης.....	41
Σχήμα 3.7: Διπολικό βραχυκύκλωμα χωρίς επαφή γης.	44
Σχήμα 3.8: Κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών για το μονοπολικό βραχυκύκλωμα.	45
Σχήμα 3.9: Διπολικό βραχυκύκλωμα χωρίς επαφή γης.	47
Σχήμα 4.1: Τύπου βραχυκυκλωμάτων: α) τριπολικό βραχυκύκλωμα, β) διπολικό βραχυκύκλωμα χωρίς επαφή γης, γ) διπολικό βραχυκύκλωμα με επαφή γης, δ) μονοπολικό βραχυκύκλωμα.....	50
Σχήμα 4.2: Παράδειγμα καταστροφής μόνωσης από βραχυκύκλωμα.....	51
Σχήμα 4.3: Απλό παράδειγμα μίας ισοδύναμη πηγής τάσης στη θέση του βραχυκυκλώματος F.	52
Σχήμα 4.4: Ισοδύναμο κύκλωμα δικτύου.....	53
Σχήμα 4.5: Ανάλυση του ρεύματος βραχυκυκλώσεως για την περίπτωση σφάλματος μακριά από γεννήτριες.....	54
Σχήμα 4.6: Ασύμμετρο ρεύμα βραχυκυκλώσεως.	56
Σχήμα 4.7: Ρεύμα βραχυκύκλωσης σε πλήρη συμμετρία για την περίπτωση σφάλματος μακριά από γεννήτρια.....	58
Σχήμα 4.8: Ρεύμα βραχυκύκλωσης σε πλήρη ασυμμετρία για την περίπτωση σφάλματος μακριά από γεννήτρια.	58
Σχήμα 4.9: Ανάλυση του ρεύματος βραχυκυκλώματος για την περίπτωση σφάλματος κοντά σε γεννήτρια.....	60
Σχήμα 4.10: Ανάλυση του ρεύματος βραχυκυκλώματος για την περίπτωση σφάλματος κοντά σε γεννήτρια.....	61

Σχήμα 4.11: Κυματομορφή ρεύματος βραχυκυκλώσεως για την περίπτωση σφάλματος μακριά από γεννήτρια, όταν η τιμή της τάσης έχει μηδενική τιμή.	67
Σχήμα 4.12: Κυματομορφή ρεύματος βραχυκυκλώσεως για την περίπτωση σφάλματος κοντά σε γεννήτρια, όταν η τιμή της τάσης έχει μηδενική τιμή.	67
Σχήμα 4.13: Στοιχείο και ισοδύναμο κύκλωμα υποσταθμού τροφοδοσίας.....	69
Σχήμα 4.14: Στοιχείο και ισοδύναμο κύκλωμα μετασηματιστή.....	72
Σχήμα 4.15: Διάγραμμα R/X-κ και X/R-κ [4]	81
Σχήμα 4.16: πολλαπλό βραχυκύκλωμα μίας τροφοδοσίας στη θέση F [4]	82
Σχήμα 4.17: βραχυκύκλωμα πολλαπλών τροφοδοσιών στη θέση F [4]	82
Σχήμα 4.18: Συντελεστής μ για τον υπολογισμό του ρεύματος διακοπής σύγχρονων μηχανών [4]	85
Σχήμα 4.19: Συντελεστής q για τον υπολογισμό του ρεύματος διακοπής σύγχρονων μηχανών [4]	86
Σχήμα 4.20: Συντελεστές $\lambda_{\min}, \lambda_{\max}$ για γεννήτρια με κυλινδρικό δρομέα: α) Για $E_{\delta_{\max}} = 1,3 \cdot E_{\delta n}$ και β) Για $E_{\delta_{\max}} = 1,6 \cdot E_{\delta n}$ [4]	89
Σχήμα 4.21: Συντελεστές $\lambda_{\min}, \lambda_{\max}$ για γεννήτρια με έκτυπους πόλους: α) Για $E_{\delta_{\max}} = 1,6 \cdot E_{\delta n}$ και β) για $E_{\delta_{\max}} = 2,0 \cdot E_{\delta n}$ [4]	90
Σχήμα 5.1: δίκτυο διανομής με βραχυκύκλωμα στον ζυγό N1	94
Σχήμα 5.2: (α) φαίνεται το τριφασικό βραχυκύκλωμα στο σημείο F1, (β) το μονοφασικό στο σημείο F1.	102
Σχήμα 5.3: Σύνθετο δίκτυο ΣΗΕ.	104
Σχήμα 5.4: Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα για βραχυκύκλωμα στο σημείο F1. ..	110
Σχήμα 5.5: αποτελέσματα για τριπολικό βραχυκύκλωμα στο σημείο F1	121
Σχήμα 5.6: Δίκτυο του Σχήματος 5.3 με αντικατάσταση του σταθμού παραγωγής S και του δικτύου Q από το δίκτυο SQ.....	123
Σχήμα 5.7: Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα για βραχυκύκλωμα στο σημείο F2. ..	126
Σχήμα 5.8: αποτελέσματα για τριπολικό βραχυκύκλωμα στο σημείο F2.	133
Σχήμα 5.9: Αποτελέσματα ελάχιστου μόνιμου ρεύματος βραχυκυκλώσεως για τριπολικό βραχυκύκλωμα στο σημείο F2.	133

Σχήμα 5.10: Δίκτυο του Σχήματος 5.3 με αντικατάσταση του σταθμού παραγωγής S, του δικτύου Q και του μετασχηματιστή T3 από το δίκτυο SQT3.	134
Σχήμα 5.11: Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα για βραχυκύκλωμα στο σημείο F3.	137
Σχήμα 5.12: αποτελέσματα για τριπολικό βραχυκύκλωμα στο σημείο F3	143
Σχήμα 5.13: Σύνθετο δίκτυο ΣΗΕ με ΑΠΕ.	144
Σχήμα 5.14: Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα για βραχυκύκλωμα στο σημείο F2.	146
Σχήμα 5.15: αποτελέσματα για τριπολικό βραχυκύκλωμα στο σημείο F2	150
Σχήμα 6.1: κύκλωμα RL [9].	152
Σχήμα 6.2: κύκλωμα RLC [9].	154
Σχήμα 6.3: Κυματομορφή ρεύματος ανάλογα με την απόσβεση [9].	156
Σχήμα 6.4: Κύκλωμα μονοπολικού βραχυκυκλώματος [9].	157
Σχήμα 6.5: Συστοιχίες πυκνωτών με την μονοφασική αναπαράσταση ενός πυκνωτή [9].	158
Σχήμα 6.6: Διακοπή βραχυκυκλώματος [9].	160
Σχήμα 6.7: παράδειγμα τάσης TRV στις επαφές του διακόπτη με $R/(2 \cdot L) = 250$, $f_0 = 1,125 \text{ kHz}$, $f = 50 \text{ Hz}$ [9].	162
Σχήμα 6.8: (α) Παράλληλο κύκλωμα RLC, (β) μεταβατική απόκριση τάσης του φορτίου, (γ) μεταβατική απόκριση τάσης του διακόπτη [9].	163
Σχήμα 6.9: τριπολικό βραχυκύκλωμα με σύνδεση γης [9].	164
Σχήμα 6.10: διαγράμματα ρεύματος και τάσης κατά μήκος των διακοπών για τριπολικό βραχυκύκλωμα με σύνδεση γης σε στερεό γειωμένο δίκτυο [9].	165
Σχήμα 6.11: Τριπολικό βραχυκύκλωμα χωρίς σύνδεση γης [9].	165
Σχήμα 6.12: Διαγράμματα ρεύματος και τάσης κατά μήκος των διακοπών για τριπολικό βραχυκύκλωμα χωρίς ουδέτερο [9].	165
Σχήμα 6.13: (α): κυματομορφή ρεύματος και τάσης της πηγής (β) κυματομορφή τάσης πυκνωτή, (γ) κυματομορφή τάσης στον διακόπτη [9].	167
Σχήμα 6.14: διακόπτης πυκνωτή με πολλαπλές επανεκκινήσεις [9].	169
Σχήμα 6.15: κατανομή της τάσης σε ένα βραχυκυκλωμένο σύστημα [9].	171
Σχήμα 6.16: κατανομή τάσης σε μία βραχυκυκλωμένη γραμμή μικρού μήκους. (α) αρχικά και (β) αφού τα κύματα έχουν αρχίσει να χωρίζονται [9].	173

Σχήμα 6.17: τάση TRV κατά μήκος του διακόπτη για βραχυκυκλωμένη γραμμή μικρού μήκους [9].....	174
Σχήμα 7.1: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για $\theta=0^\circ$	177
Σχήμα 7.2: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για $\theta=90^\circ$	177
Σχήμα 7.3: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για $\theta=180^\circ$	178
Σχήμα 7.4: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για $\theta=270^\circ$	178
Σχήμα 7.5: κύκλωμα RL στο λογισμικό ATP-EMTP.....	179
Σχήμα 7.6: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για $\theta=0^\circ$	179
Σχήμα 7.7: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης σε σχέση με τον χρόνο για $\theta=90^\circ$..	180
Σχήμα 7.8: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για $\theta=180^\circ$	180
Σχήμα 7.9: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για $\theta=270^\circ$	180
Σχήμα 7.10: Κύκλωμα με φορτίο Z_L τροφοδοτούμενο από πηγή τάσης V μέσω γραμμής L.....	181
Σχήμα 7.11: Κύκλωμα RL στο λογισμικό ATP-EMTP.....	182
Σχήμα 7.12: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για $\theta=0^\circ$	182
Σχήμα 7.13: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για $\theta=90^\circ$	183
Σχήμα 7.14: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για $\theta=180^\circ$	183
Σχήμα 7.15: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για $\theta=270^\circ$	183
Σχήμα 7.16: Κυματομορφές πηγής τάσης και ρεύματος κυκλώματος.....	186
Σχήμα 7.17: Κύκλωμα RLC στο λογισμικό ATP-EMTP.....	186
Σχήμα 7.18: Κυματομορφές πηγής τάσης και ρεύματος κυκλώματος για $R=150 \Omega$ (υποαπόσβεση).....	187
Σχήμα 7.19 Κυματομορφές πηγής τάσης και ρεύματος κυκλώματος για $R=632,455 \Omega$ (κρίσιμη απόσβεση).....	187
Σχήμα 7.20: Κυματομορφές πηγής τάσης και ρεύματος κυκλώματος για $R=1200 \Omega$ (υπεραπόσβεση).....	187
Σχήμα 7.21: Κυματομορφές πηγής τάσης και ρεύματος κυκλώματος.....	189
Σχήμα 7.22: Κύκλωμα LC στο λογισμικό ATP-EMTP.....	189
Σχήμα 7.23: Κυματομορφές πηγής τάσης και ρεύματος κυκλώματος.....	190
Σχήμα 7.24: Αναπαράσταση διακοπής μονοφασικού βραχυκυκλώματος.....	191

Σχήμα 7.25: Κυματομορφή τάσης κατά μήκος του διακόπτη.....	192
Σχήμα 7.26: Κύκλωμα διακοπής μονοφασικού βραχυκυκλώματος στο λογισμικό ATP-EMTP.....	192
Σχήμα 7.27: Κυματομορφή τάσης κατά μήκος του διακόπτη.....	193
Σχήμα 7.28: Κύκλωμα διακοπής τριπολικού βραχυκυκλώματος με επαφή γης στο λογισμικό ATP-EMTP.	194
Σχήμα 7.29: Κυματομορφές ρευμάτων διακοπών.	195
Σχήμα 7.30: Κυματομορφές φασικών τάσεων κατά μήκος διακοπών.....	195
Σχήμα 7.31: Κύκλωμα διακοπής τριπολικού βραχυκυκλώματος χωρίς επαφή γης στο λογισμικό ATP-EMTP.	197
Σχήμα 7.32: Κυματομορφή φασικών ρευμάτων διακοπών.	198
Σχήμα 7.33: Κυματομορφή φασικών τάσεων κατά μήκος διακοπών.....	198
Σχήμα 7.34: Κύκλωμα αποσύνδεσης παράλληλου φορτίου RLC στο λογισμικό ATP-EMTP.....	199
Σχήμα 7.35: Κυματομορφές ρεύματος (μπλε χρώμα), τάσης του πυκνωτή (κόκκινο χρώμα) και του διακόπτη (κόκκινο χρώμα).	199
Σχήμα 8.1: Ομοπολική αντίσταση μετασχηματιστών.	201
Σχήμα 8.2: Μεταβολή ρεύματος διπολικού βραχυκυκλώματος με επαφή γης σε συνάρτηση με τον λόγο $ \bar{z}_0 / \bar{z}_1 $	203
Σχήμα 8.3: Μεταβολή ρεύματος διπολικού βραχυκυκλώματος με επαφή γης σε συνάρτηση με τον λόγο $ \bar{z}_0 / \bar{z}_1 $	204
Σχήμα 8.4: Μεταβολή ρεύματος μονοπολικού βραχυκυκλώματος σε συνάρτηση με τον λόγο $ \bar{z}_0 / \bar{z}_1 $	205
Σχήμα 8.5: Μεταβολή ρεύματος διπολικού βραχυκυκλώματος με επαφή γης σε συνάρτηση με τον λόγο $ \bar{z}_0 / \bar{z}_1 $	206

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1-1: Προέλευση μεταβατικών φαινομένων και αντιστοιχία περιοχών συχνότητας [1].....	xviii
Πίνακας 2-1: Ιδιοδιανύσματα πίνακα με κυκλική συμμετρία	3
Πίνακας 2-2: Επαγωγικές αντιδράσεις σύγχρονων γεννητριών (ρ).....	20
Πίνακας 2-3: Κυκλώματα ομοπολικής συνιστώσας για διάφορες συνδεσμολογίες τριφασικών μετασχηματιστών δύο τυλιγμάτων.....	26
Πίνακας 2-4: Δεδομένα τυπικών εναέριων γραμμών μεταφοράς.	27
Πίνακας 2-5: Δεδομένα τυπικών συστημάτων καλωδίων.	28
Πίνακας 2-6: Εμπειρικές τιμές σύνθετης αντίστασης ομοπολικής συνιστώσας.	28
Πίνακας 4-1: Παράμετροι ιδιοτιμών για διάφορες συνθήκες αρχικοποίησης.....	65
Πίνακας 4-2: Εφαρμογές χρήσης ρευμάτων	65
Πίνακας 4-3: Αντίσταση R σύγχρονων γεννητριών	70
Πίνακας 4-4: Παράγοντας μ για διάφορες τιμές του t_{\min}	85
Πίνακας 4-5: Παράγοντας για διάφορες τιμές του q	86
Πίνακας 4-6: λόγος f_c / f	88
Πίνακας 5-1: Δεδομένα δικτύου	93
Πίνακας 5-2: Σύγκριση αποτελεσμάτων των τριών μεθόδων επίλυσης.....	102
Πίνακας 5-3: Δεδομένα δικτύου	103
Πίνακας 5-4: Σύγκριση αποτελεσμάτων των τριών μεθόδων επίλυσης.....	122
Πίνακας 5-5: Σύγκριση αποτελεσμάτων των τριών μεθόδων επίλυσης.....	133
Πίνακας 5-6: Σύγκριση αποτελεσμάτων των τριών μεθόδων επίλυσης.....	143
Πίνακας 5-7: Δεδομένα δικτύου	144
Πίνακας 5-8: Σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων επίλυσης	151
Πίνακας 7-1: Δεδομένα κυκλώματος	175
Πίνακας 7-2: Δεδομένα κυκλώματος	181
Πίνακας 7-3: Δεδομένα κυκλώματος	184
Πίνακας 7-4: Δεδομένα κυκλώματος	188
Πίνακας 7-5: Δεδομένα κυκλώματος	190

Πίνακας 7-6: Δεδομένα κυκλώματος	193
Πίνακας 7-7: Δεδομένα κυκλώματος	196
Πίνακας 7-8: Δεδομένα κυκλώματος	199

1 Κεφάλαιο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

1.1 Γενικά

Ως μεταβατικά φαινόμενα χαρακτηρίζεται μια ευρεία κατηγορία γεγονότων, τα οποία αλλάζουν σε μικρό ή μεγάλο βαθμό ένα ηλεκτρικό κύκλωμα από την κανονική κατάσταση λειτουργίας και δημιουργούν μεταβατικές καταστάσεις, μικρής σχετικά διάρκειας και έντονης παρουσίας [1], [2]. Τα μεταβατικά φαινόμενα, παρά τη μικρή τους διάρκεια, δημιουργούν ισχυρότατες καταπονήσεις στον εξοπλισμό και τα συστήματα προστασίας εξαιτίας των υπερτάσεων και των υπερεντάσεων που αναπτύσσονται. Πιο συγκεκριμένα:


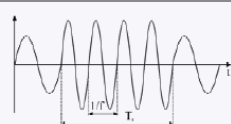
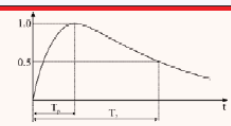
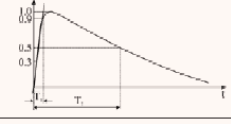
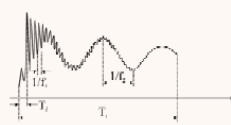
- Οι **υπερτάσεις** καταπονούν τα συστήματα προστασίας και τις μονώσεις του εξοπλισμού. Εμφανίζονται ανάμεσα σε φάση και γη ή ανάμεσα σε φάσεις. Οι μέγιστες (peak) τιμές προκαλούν τη μέγιστη καταπόνηση.
- Τα **υπερρεύματα** προκαλούν θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις στον εξοπλισμό. Η κατηγοριοποίησή τους είναι ανάλογη των υπερτάσεων. Οι θερμικές καταπονήσεις σχετίζονται με την r.m.s. τιμή και τη διάρκεια ενώ οι μηχανικές καταπονήσεις που προκαλούν σχετίζονται με τις μέγιστες (peak) τιμές.

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) υπόκεινται σε πολλούς τύπους μεταβατικών φαινομένων, τα οποία ποικίλουν από αργά μεταβατικά φαινόμενα που σχετίζονται με χειρισμούς απόρριψης φορτίου μέχρι πολύ γρήγορα μεταβατικά φαινόμενα που οφείλονται σε κεραυνικά πλήγματα στις γραμμές μεταφοράς (ΓΜ). Οι μεταβατικές αποκρίσεις των τάσεων και των ρευμάτων περιέχουν συνιστώσες των οποίων η συχνότητα κυμαίνεται από 0,1 Hz έως και δεκάδες MHz, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1-1. Σύμφωνα με τη CIGRE, μια τυπική κατάταξη των περιοχών συχνότητας

φαίνεται στο Σχήμα 1.1, όπου διακρίνονται η περιοχή **χαμηλής συχνότητας** και η **μεταβατική**. Η πρώτη διαχωρίζεται περαιτέρω στις διαρκείς και τις παροδικές υπερτάσεις, ενώ η δεύτερη σε αυτές του αργού, γρήγορου και πολύ γρήγορου μετώπου, οι οποίες αντιστοιχούν σε διακοπτικές υπερτάσεις, κεραυνικές υπερτάσεις και υπερτάσεις σε υποσταθμούς τύπου GIS (gas insulated substation).

Πίνακας 1-1: Προέλευση μεταβατικών φαινομένων και αντιστοιχία περιοχών συχνότητας [1]

Προέλευση	Περιοχή συχνοτήτων
Ενεργοποίηση ΜΣ, συντονισμός πυρήνα	0,1 Hz - 1 kHz
Απόρριψη φορτίου	0,1 Hz - μερικά (<10) kHz
Βραχυκυκλώματα	50 Hz - 20 kHz
Ενεργοποίηση ΓΜ	50 Hz – δεκάδες kHz
Σφάλματα κοντής ΓΜ	50 Hz – 100 kHz
Πολλαπλή επανάφλεξη διακόπτη	10 kHz – εκατοντάδες kHz
Κεραυνικά φαινόμενα, σφάλματα σε υποσταθμούς	10 kHz – 1 MHz
Αποζεύξεις και σφάλματα GIS	100 kHz – δεκάδες MHz

Είδος	Κυματομορφή	Εύρος χρόνου ή συχνότητα	Διάρκεια
Χαμηλής Συχνότητας	Συνεχείς		$f=50 \text{ Hz or } 60 \text{ Hz}$ $T_1 \geq 3600 \text{ s}$
	Παροδικές		$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $3600 \text{ s} \geq T_1 \geq 0.03 \text{ s}$
Μεταβατικές	Αργού μετώπου		$5000 \mu\text{s} \geq T_p \geq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$
	Γρήγορου μετώπου		$20 \mu\text{s} \geq T_1 \geq 0.1 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$
	Πολύ γρήγορου μετώπου		$100 \text{ ns} \geq T_1 \geq 3 \text{ ns}$ $0.3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$ $T_1 \leq 3 \text{ ms}$

Σχήμα 1.1: Κατάταξη χαρακτηριστικών περιοχών συχνότητας υπερτάσεων

Γενικά, οι διαταραχές που εμφανίζονται στα ΣΗΕ, ανάλογα με τη διάρκεια ή διαφορετικά την ταχύτητά τους, κατατάσσονται στις εξής βασικές κατηγορίες [2], [3]:

- Πολύ γρήγορα μεταβατικά φαινόμενα (very fast transients)
- Γρήγορα μεταβατικά φαινόμενα (fast transients)
- Αργά μεταβατικά φαινόμενα (slow transients)

Η κάθε μια από τις παραπάνω κατηγορίες αναλύεται στις επόμενες ενότητες.

1.2 Πολύ γρήγορα μεταβατικά φαινόμενα

Τα πολύ γρήγορα μεταβατικά φαινόμενα προκαλούνται από ατμοσφαιρικές εκκενώσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2, οι οποίες πλήγουν στα εκτεθειμένα μέρη των ΓΜ (εξωτερικές υπερτάσεις) ή από απότομες αλλαγές λόγω χειρισμών στους διακόπτες του δικτύου (προκαλούνται εσωτερικές υπερτάσεις), όπως ενεργοποίηση ΓΜ, εκκαθάριση σφαλμάτων, έναρξη και παύση λειτουργίας εξοπλισμού, κ.α. [2]. Τα φαινόμενα αυτά σχετίζονται συνήθως με την όδευση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων κατά μήκος των ΓΜ των οποίων η ταχύτητα όδευσης καθορίζεται από το μέσο διάδοσης (εναέρια γραμμή, υπόγειο ή υποθαλάσσιο σύστημα καλωδίων). Επομένως, ο χρόνος διάρκειας των πολύ γρήγορων μεταβατικών φαινομένων είναι πολύ περιορισμένος. Συγκεκριμένα τα κεραυνικά πλήγματα έχουν τιμές μεταξύ 5 και 100 kA και διάρκεια από ns για τα μεγάλα ρεύματα έως κάποια ms, για τα μικρά ρεύματα· διάρκειας μερικών ms είναι και οι μεταβατικές αποκρίσεις που προκαλούνται από διακοπτικές λειτουργίες.



Σχήμα 1.2: Κεραυνικό πλήγμα σε ανεμογεννήτρια

Ο βασικός λόγος για τον οποίο είναι αναγκαία η κατανόηση των πολύ γρήγορων μεταβατικών φαινομένων, ειδικά όσων αφορά αυτά που προκαλούνται από ατμοσφαιρικές εκκενώσεις, είναι ο προσδιορισμός της μόνωσης των στοιχείων του δικτύου και η μορφή των κυματικών αποκρίσεων, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη δοκιμή των διάφορων στοιχείων των ΣΗΕ (εκτροπείς υπέρτασης, μονωτήρες, κτλ).

1.3 Γρήγορα μεταβατικά φαινόμενα

Στην κατηγορία αυτή μεταβατικών φαινομένων ανήκουν οι διαταραχές που προκαλούνται από απότομες αλλαγές της τοπολογίας του δικτύου, δηλ. από βραχυκυκλώματα [2]. Η πλειοψηφία των βραχυκυκλωμάτων εμφανίζεται στα εκτεθειμένα μέρη των εναέριων γραμμών μεταφοράς, λόγω διάσπασης της μόνωσης, η οποία προκαλείται από κυματικές υπερτάσεις της προηγούμενης παραγράφου εξαιτίας κάποιου κεραυνικού πλήγματος, λόγω πτώσης δέντρων ή πουλιών, λόγω δυνατών ανέμων ή σπάσιμο των αγωγών εξαιτίας επικάθισης πάγου. Ωστόσο, βραχυκυκλώματα εντοπίζονται και στα υπόγεια συστήματα καλωδίων, σπανιότερα λόγω φθοράς της μόνωσης του καλωδίου (εσωτερικό βραχυκύκλωμα) είτε πιο συχνά στα άκρα του καλωδίου στις μούφες ή στους υποσταθμούς. Η διάρκεια των μεταβατικών φαινομένων αυτής της κατηγορίας είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την πρώτη (άρα μπορούν να θεωρηθούν βραδύτερα) και προσδιορίζεται από την υπομεταβατική σταθερά των γεννητριών και είναι της τάξης των 10 – 100 ms. Τα ρεύματα των βραχυκυκλωμάτων φτάνουν τιμές μεγαλύτερες των ονομαστικών τιμών των στοιχείων του δικτύου (υπερρεύματα). Παρά το γεγονός ότι περίπου το 70% με 80% των βραχυκυκλωμάτων είναι παροδικά, στις περιπτώσεις που αυτά παραμείνουν προκαλούν θερμικές καταπονήσεις στα στοιχεία του δικτύου και πιο σπάνια μπορεί να οδηγήσουν σε δυνάμεις που μπορεί να αποκολλήσουν τα τυλίγματα των μηχανών ή να αποσυνδέσουν καλώδια ή αγωγούς στα σημεία σύσφιξης [3]. Μόνιμα βραχυκυκλώματα μπορούν να προκληθούν από την πτώση των γραμμών στη γη λόγω πχ θύελλας ή σεισμού, από το σπάσιμο των μονωτήρων λόγω πάγου και από τη δυσλειτουργία των εκτροπέων υπέρτασης.

1.4 Αργά μεταβατικά φαινόμενα

Αν ένα βραχυκύκλωμα συμβεί σε ένα ζωτικής σημασίας τμήμα του δικτύου, προκαλούνται σοβαρές διαταραχές μεταβατικής κατάστασης, όπου το ηλεκτρικό

σύστημα υποβάλλεται σε μηχανικές ταλαντώσεις των δρομέων των σύγχρονων μηχανών. Τα ηλεκτρομηχανικά αυτά μεταβατικά φαινόμενα σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να οδηγήσουν σε αποσυγχρονισμό μερικών ή όλων των μηχανών του συστήματος, λόγω απώλειας συγχρονισμού. Τέτοια περιστατικά μπορεί να οδηγήσουν σε μερική (brownout) ή ολική (blackout) διακοπή της λειτουργίας του συστήματος και είναι αντικείμενο μελέτης της μεταβατικής ευστάθειάς του [3].

Η φύση των ταλαντώσεων των δρομέων είναι μηχανική, επομένως η περίοδος ταλάντωσής τους είναι αρκετά μεγάλη και είναι συνάρτηση του μεγέθους του δικτύου που εμπλέκεται σε αυτές. Για μικρά δίκτυα της τάξης των μερικών MW, οι δρομείς θα συμπληρώσουν τρεις με τέσσερις κύκλους ταλάντωσης ανά δευτερόλεπτο. Για μεγάλα δίκτυο όμως, της τάξης των μερικών GW, θα συμπληρώσουν τρεις με τέσσερις κύκλους σε ένα λεπτό. Επομένως, η μεταβατική ευστάθεια των ΣΗΕ αφορά χρονική περίοδο από κλάσματα του δευτερολέπτου έως μερικά λεπτά [2].

2 Κεφάλαιο

ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΕΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ

2.1 Εισαγωγή

Η ανάλυση συμμετρικών τριφασικών συστημάτων είναι απλή, καθώς κάθε τέτοιο σύστημα μπορεί να αναχθεί στο ισοδύναμο μονοφασικό σύστημα. Κατά βάση όμως τα ΣΗΕ δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως συμμετρικά κυκλώματα, καθώς οι σύνθετες αντιστάσεις των γραμμών για κάθε φάση δεν είναι ίσες, ούτε τα μεγέθη των τάσεων και των ρευμάτων είναι απόλυτα συμμετρικά. Επίσης, η συμμετρία ενός ΣΗΕ μπορεί να διαταραχθεί τόσο από ασύμμετρα φορτία (λόγω των μονοφασικών καταναλωτών) όσο και κατά την εμφάνιση μεταβατικών φαινομένων (βραχυκύκλωμα, κεραυνικό πλήγμα, κτλ.).

Η ανάλυση των ασύμμετρων τριφασικών συστημάτων είναι σύνθετη, καθώς περιλαμβάνει περίπλοκους υπολογισμούς, λόγω των ζεύξεων μεταξύ των αγωγών. Μπορεί όμως να απλοποιηθεί χρησιμοποιώντας κατάλληλους μετασχηματισμούς, όπως αυτόν των συμμετρικών συνιστωσών που παρουσιάζεσαι στο παρόν κεφάλαιο.

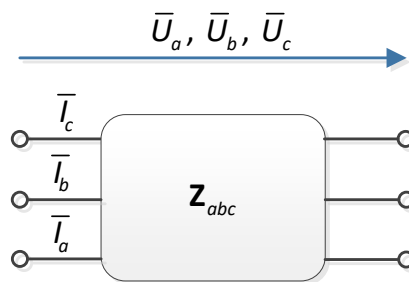
2.2 Ορισμός συμμετρικών συνιστωσών

Για το τριφασικό σύστημα του Σχήματος 2.1, το οποίο περιλαμβάνει μόνο παθητικά στοιχεία, η σχέση που συνδέει τα ρεύματα και τις διαμήκεις τάσεις είναι

$$\mathbf{U}_{abc} = \mathbf{z}_{abc} \mathbf{I}_{abc} \Leftrightarrow \underbrace{\begin{pmatrix} \bar{U}_a \\ \bar{U}_b \\ \bar{U}_c \end{pmatrix}}_{\mathbf{u}_{abc}} = \underbrace{\begin{pmatrix} \bar{Z}_{aa} & \bar{Z}_{ab} & \bar{Z}_{ac} \\ \bar{Z}_{bc} & \bar{Z}_{bb} & \bar{Z}_{bc} \\ \bar{Z}_{ca} & \bar{Z}_{cb} & \bar{Z}_{ca} \end{pmatrix}}_{\mathbf{z}_{abc}} \underbrace{\begin{pmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{pmatrix}}_{\mathbf{I}_{abc}} \quad (2.1)$$

Τέτοια μορφή πινάκων παρουσιάζουν τα στρεφόμενα μέσα (γεννήτριες και κινητήρες), καθώς λόγω της περιστροφικής κίνησης οι αμοιβαίες αντιδράσεις μεταξύ δύο τυλιγμάτων του στάτη είναι διαφορετικές. Γενικά όμως, ο πίνακας συνθέτων αντιστάσεων των τριφασικών συστημάτων ηλεκτρικής ισχύος είναι *κυκλικά συμμετρικός*, οπότε η (2.1) μπορεί να απλοποιηθεί στην (2.2).

$$\begin{pmatrix} \bar{U}_a \\ \bar{U}_b \\ \bar{U}_c \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \bar{Z}_a & \bar{Z}_b & \bar{Z}_c \\ \bar{Z}_c & \bar{Z}_a & \bar{Z}_b \\ \bar{Z}_b & \bar{Z}_c & \bar{Z}_a \end{pmatrix}}_{\text{κυκλική συμμετρία}} \begin{pmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{pmatrix} \quad (2.2)$$



Σχήμα 2.1: Απλό τριφασικό σύστημα

Η ανάλυση ενός τριφασικού συστήματος στο οποίο ο πίνακας συνθέτων αντιστάσεων είναι πλήρης όπως στην (2.1) είναι αρκετά σύνθετη διαδικασία. Σύμφωνα με το θεώρημα του Fortescue, η ανάλυση ενός τέτοιου συστήματος μπορεί να απλοποιηθεί εισάγοντας την έννοια των *συμμετρικών συνιστωσών* (*symmetrical components*). Η μέθοδος των συμμετρικών συνιστωσών στηρίζεται στο γεγονός ότι ένα ασύμμετρο σύστημα N διανυσμάτων μπορεί να αναλυθεί σε συμμετρικά συστήματα N διανυσμάτων. Τα N αυτά συμμετρικά συστήματα ονομάζονται *συμμετρικές συνιστώσες* ή *ακολουθιακά συστήματα*. Ειδικότερα, στην περίπτωση ενός τριφασικού συστήματος, αυτό αναπαρίσταται από τρία μονοφασικά συστήματα-συνιστώσες, δηλ. το *ορθό* ή *ευθύ σύστημα* ή *σύστημα θετικής (positive) ακολουθίας*, στο οποίο αντιστοιχεί η *ορθή συνιστώσα*, το *αντίστροφο σύστημα* ή *αρνητικής (negative) ακολουθίας*, στο οποίο αντιστοιχεί η *αντίστροφη συνιστώσα* και το *ομοπολικό* ή *μηδενικό σύστημα* ή *μηδενικής (zero) ακολουθίας*, στο οποίο αντιστοιχεί η *ομοπολική συνιστώσα*. Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι ο μετασχηματισμός του φυσικού συστήματος (abc) σε συστήματα, τα οποία μπορούν να αναλυθούν από τα ιδιοδιανύσματα του \mathbf{Z}_{abc} . Εν γένει, τα ιδιοδιανύσματα και οι αντίστοιχες ιδιοτιμές ενός πίνακα με κυκλική συμμετρία δίνονται στον Πίνακα 2-1. Σημειώνεται ότι ο δείκτης 1 αντιστοιχεί στην ορθή

συνιστώσα, ο δείκτης 2 στην αντίστροφη συνιστώσα και ο δείκτης 0 στην ομοπολική συνιστώσα. Το διάνυσμα \bar{a} ορίζεται ως εξής:

$$\bar{a} = e^{j120^\circ} = \frac{-1 + j\sqrt{3}}{2} \quad (2.3\alpha)$$

δηλαδή, είναι ένα διάνυσμα με μέτρο μονάδα και γωνία $+120^\circ$. Αντίστοιχα ορίζονται και

$$\bar{a}^2 = e^{j240^\circ} = e^{-j120^\circ} = \frac{-1 - j\sqrt{3}}{2} \quad (2.3\beta)$$

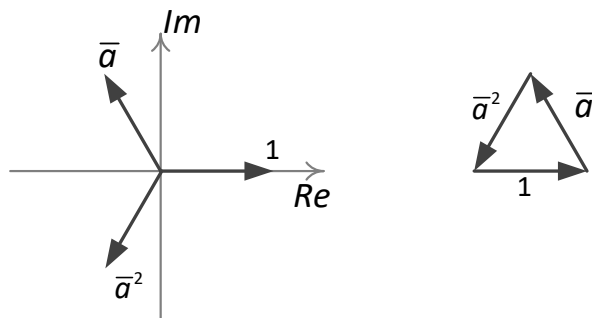
$$\bar{a}^3 = 1 \quad (2.3\beta)$$

Επομένως, τα στοιχεία των ιδιοδιανυσμάτων αντιστοιχούν σε τρία διανύσματα, ίσα σε μέτρο με διαφορές ορισμάτων (γωνία μεταξύ δύο διαδοχικών φάσεων) 120° , όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2. Από το Σχήμα αυτό φαίνεται επίσης ότι ισχύει

$$1 + \bar{a} + \bar{a}^2 = 0 \quad (1.4)$$

Πίνακας 2-1: Ιδιοδιανύσματα πίνακα με κυκλική συμμετρία

Κυκλική συμμετρία	Ιδιοδιανύσματα	Ιδιοτιμές
Ομοπολική ή μηδενική συνιστώσα	$\mathbf{x}_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$	$\bar{\lambda}_0 = \bar{Z}_a + \bar{Z}_b + \bar{Z}_c$
Ορθή συνιστώσα	$\mathbf{x}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ \bar{a}^2 \\ \bar{a} \end{pmatrix}$	$\bar{\lambda}_1 = \bar{Z}_a + \bar{Z}_b \bar{a}^2 + \bar{Z}_c \bar{a}$
Αντίστροφη συνιστώσα	$\mathbf{x}_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ \bar{a} \\ \bar{a}^2 \end{pmatrix}$	$\bar{\lambda}_2 = \bar{Z}_a + \bar{Z}_b \bar{a} + \bar{Z}_c \bar{a}^2$



Σχήμα 2.2: Στοιχεία ιδιοδιανυσμάτων πινάκων με κυκλική συμμετρία

Χρησιμοποιώντας τα ιδιοδιανύσματα του \mathbf{Z}_{abc} ορίζεται ο πίνακας μετασχηματισμού \mathbf{T}

$$\mathbf{T} = (\mathbf{x}_0 \quad \mathbf{x}_2 \quad \mathbf{x}_1) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

ο οποίος διαγωνοποιεί τον πίνακα συνθέτων αντιστάσεων

$$\mathbf{Z}_{012} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{Z}_{abc} \mathbf{T} = \begin{pmatrix} \bar{\lambda}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{\lambda}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{\lambda}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{Z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_2 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Ο \mathbf{Z}_{012} είναι διαγώνιος, οπότε δεν εμφανίζονται ζεύξεις μεταξύ της ορθής, της αντίστροφης και της ομοπολικής συνιστώσας. Επομένως, οι συμμετρικές συνιστώσες είναι πλήρως αποζευγμένες μεταξύ τους και έτσι οι υπολογισμοί στο σύστημα 012 είναι πιο εύκολοι. Ο αντίστροφος πίνακας μετασχηματισμού \mathbf{S} του \mathbf{T} ορίζεται ως

$$\mathbf{S} = \mathbf{T}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Σε στατά μέσα, π.χ. γραμμές μεταφοράς και σε τμήματα του δικτύου μακριά από γεννήτριες ισχύει στην (2.6) ότι $\bar{Z}_b = \bar{Z}_c$, δηλ. ο \mathbf{Z}_{abc} παρουσιάζει *αξονική* ή *πλήρη συμμετρία*. Σε αυτή την περίπτωση από την (2.6) και τον Πίνακα 2-1 γίνεται αντιληπτό ότι η σύνθετη αντίσταση της ορθής και της αντίστροφης συνιστώσας είναι ίσες. Συνοψίζοντας, ο μετασχηματισμός $abc \rightarrow 012$ και $012 \rightarrow abc$ πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τις (2.8) και (2.9), αντίστοιχα.

$$\mathbf{Z}_{012} = \mathbf{S} \mathbf{Z}_{abc} \mathbf{T} \quad (2.8)$$

$$\mathbf{Z}_{abc} = \mathbf{T} \mathbf{Z}_{012} \mathbf{S} \quad (2.9)$$

όπου

$$\mathbf{S} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{S}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

Με βάση τους παραπάνω ορισμούς, οι τάσεις του δικτύου (\mathbf{U}_{abc}) αναλύονται στις αντίστοιχες συμμετρικές συνιστώσες (\mathbf{U}_{012}) με βάση τη σχέση

$$\begin{pmatrix} \bar{U}_a \\ \bar{U}_b \\ \bar{U}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{U}_0 \\ \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \end{pmatrix} \Leftrightarrow \mathbf{U}_{abc} = \mathbf{T}\mathbf{U}_{012} \Leftrightarrow \mathbf{U}_{012} = \mathbf{S}\mathbf{U}_{abc} \quad (2.12)$$

Αντίστοιχα, τα ρεύματα του δικτύου αναλύονται σε συμμετρικές συνιστώσες

$$\begin{pmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{I}_0 \\ \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \end{pmatrix} \Leftrightarrow \mathbf{I}_{abc} = \mathbf{T}\mathbf{I}_{012} \Leftrightarrow \mathbf{I}_{012} = \mathbf{S}\mathbf{I}_{abc} \quad (2.13)$$

Χρησιμοποιώντας τις (2.8) και (2.9) προκύπτει από την (2.1):

$$\mathbf{U}_{abc} = \mathbf{T}\mathbf{U}_{012} = \mathbf{Z}_{abc} \mathbf{T}\mathbf{I}_{012} \quad (2.14)$$

$$\mathbf{U}_{012} = \mathbf{S}\mathbf{Z}_{abc} \mathbf{T}\mathbf{I}_{012} \quad (2.15)$$

Γνωρίζοντας τον \mathbf{Z}_{012} προκύπτει η διατύπωση του νόμου του Ohm για τις συμμετρικές συνιστώσες ως

$$\mathbf{U}_{012} = \mathbf{Z}_{012} \mathbf{I}_{012} \quad (2.16)$$

$$\mathbf{I}_{012} = \mathbf{Z}_{012}^{-1} \mathbf{U}_{012} \quad (2.17)$$

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση μπορούν να επισημανθούν τα παρακάτω βασικά σημεία:

- Ο μετασχηματισμός $abc \rightarrow 012$ των τάσεων και των ρευμάτων γίνεται πολλαπλασιάζοντας με τον \mathbf{S} .
- Οι υπολογισμοί στο σύστημα 012 πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας τον διαγώνιο πίνακα \mathbf{Z}_{012}
- Ο μετασχηματισμός $012 \rightarrow abc$ των τάσεων και των ρευμάτων γίνεται πολλαπλασιάζοντας με τον \mathbf{T} .

τα παραπάνω συνοψίζονται επίσης μαθηματικά στην (2.18).

abc	012	
$\mathbf{I}_{abc} = \mathbf{T}\mathbf{I}_{012}$	$\mathbf{I}_{012} = \mathbf{S}\mathbf{I}_{abc}$	
$\mathbf{U}_{abc} = \mathbf{T}\mathbf{U}_{012}$	$\mathbf{U}_{012} = \mathbf{S}\mathbf{U}_{abc}$	
$\mathbf{Z}_{abc} = \mathbf{T}\mathbf{Z}_{012}\mathbf{S}$	$\mathbf{Z}_{012} = \mathbf{S}\mathbf{Z}_{abc}\mathbf{T}$	(2.18)
$\mathbf{U}_{abc} = \mathbf{Z}_{abc}\mathbf{I}_{abc}$	$\mathbf{U}_{012} = \mathbf{Z}_{012}\mathbf{I}_{012}$	

Πιο αναλυτικά, η τάση κάθε φάσης υπολογίζεται ως το άθροισμα των αντίστοιχων συνιστωσών της και με βάση την (2.18) είναι:

$$\begin{aligned}\bar{U}_a &= \bar{U}_a^1 + \bar{U}_a^2 + \bar{U}_a^0 = \bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_0 \\ \bar{U}_b &= \bar{U}_b^1 + \bar{U}_b^2 + \bar{U}_b^0 = \bar{a}^2\bar{U}_1 + \bar{a}\bar{U}_2 + \bar{U}_0 \\ \bar{U}_c &= \bar{U}_c^1 + \bar{U}_c^2 + \bar{U}_c^0 = \bar{a}\bar{U}_1 + \bar{a}^2\bar{U}_2 + \bar{U}_0\end{aligned}\quad (2.19)$$

Αντίστοιχες σχέσεις ισχύουν και για τα ρεύματα. Επίσης, η αντίστροφη διαδικασία, δηλ. γνωρίζοντας τις τάσεις abc υπολογίζονται τα αντίστοιχα μεγέθη του συστήματος 012, οπότε η (2.19) χρησιμοποιώντας την (2.20) γράφεται αναλυτικότερα:

$$\begin{aligned}\bar{U}_0 &= \frac{1}{3}(\bar{U}_a + \bar{U}_b + \bar{U}_c) \\ \bar{U}_1 &= \frac{1}{3}(\bar{U}_a + \bar{a}\bar{U}_b + \bar{a}^2\bar{U}_c) \\ \bar{U}_2 &= \frac{1}{3}(\bar{U}_a + \bar{a}^2\bar{U}_b + \bar{a}\bar{U}_c)\end{aligned}\quad (2.20)$$

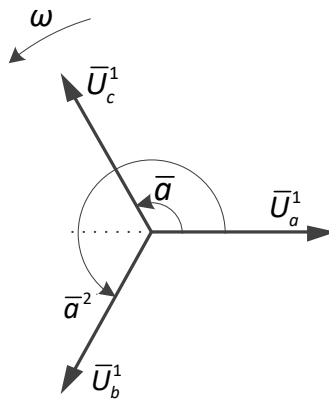
Ειδικότερα όσον αφορά τις συμμετρικές συνιστώσες:

Ορθή συνιστώσα: Οι συνιστώσες ορθής ακολουθίας κάθε φάσης αναλύονται σε τρία διανύσματα με ίσο μέτρο, γωνία μεταξύ δύο διαδοχικών διανυσμάτων ίση με 120° και ακολουθία abc, δηλ. ίδια με αυτή των φασικών τάσεων:

$$\left. \begin{aligned}\bar{U}_a^1 &= \bar{U}_1 \\ \bar{U}_b^1 &= \bar{a}^2\bar{U}_1 \\ \bar{U}_c^1 &= \bar{a}\bar{U}_1\end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{pmatrix} \bar{U}_a^1 \\ \bar{U}_b^1 \\ \bar{U}_c^1 \end{pmatrix} = \bar{U}_1 \begin{pmatrix} 1 \\ \bar{a}^2 \\ \bar{a} \end{pmatrix}\quad (2.21)$$

Προκύπτουν δηλαδή με πολλαπλασιασμό του ιδιοδιανύσματος \mathbf{x}_1 με το \mathbf{U}_1 . Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται η γραφική ανάλυση του συστήματος θετικής ακολουθίας. Ένα συμμετρικό (balanced) τριφασικό σύστημα χαρακτηρίζεται από συμμετρικές τάσεις (δηλ. τάσεις ίσες σε μέτρο και ίσες γωνίες μεταξύ δύο διαδοχικών φάσεων) και

συμμετρικά ρεύματα, αντίστοιχα. Επομένως, σε ένα τριφασικό συμμετρικό σύστημα εμφανίζεται μόνο η ορθή συνιστώσα και η ανάλυσή του απαιτεί αντίστοιχα μόνο την επίλυση του ορθού συστήματος.



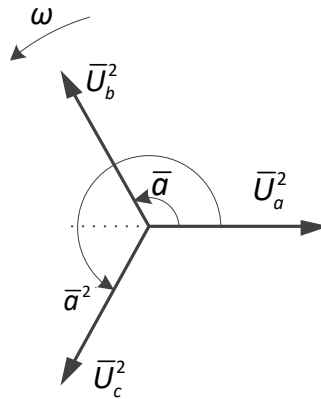
Σχήμα 2.3: Διανύσματα τάσης ορθής ακολουθίας.

Επειδή σε ένα συμμετρικό σύστημα το άθροισμα των ρευμάτων είναι μηδέν, το ρεύμα στον ουδέτερο των στοιχείων που είναι συνδεδεμένα σε αστέρα θα είναι επίσης μηδέν. Επομένως, ο τρόπος γείωσης του συστήματος δεν έχει σημασία στην ανάλυση του κυκλώματος. Ωστόσο, σε περίπτωση που τα ρεύματα είναι ασύμμετρα, αυτό έχει ως αποτέλεσμα το άθροισμά τους να μην είναι πλέον μηδέν και έτσι η επίδραση του συστήματος γείωσης να είναι σημαντική.

Αντίστροφη συνιστώσα: Τα ιδιοδιανύσματα \mathbf{x}_2 και \mathbf{x}_0 περιγράφουν τις αποκλίσεις από την ιδεατή συμμετρική λειτουργία. Οι συνιστώσες του συστήματος αρνητικής ακολουθίας είναι:

$$\left. \begin{array}{l} \bar{U}_a^2 = \bar{U}_2 \\ \bar{U}_b^2 = \bar{a}\bar{U}_2 \\ \bar{U}_c^2 = \bar{a}^2\bar{U}_2 \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{pmatrix} \bar{U}_a^2 \\ \bar{U}_b^2 \\ \bar{U}_c^2 \end{pmatrix} = \bar{U}_2 \begin{pmatrix} 1 \\ \bar{a} \\ \bar{a}^2 \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

Πολλαπλασιάζοντας το ιδιοδιάνυσμα \mathbf{x}_2 με το \bar{U}_2 προκύπτουν οι φασικές τάσεις του συστήματος αρνητικής ακολουθίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Και στην περίπτωση αυτή πρόκειται για ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα, του οποίου όμως η φορά ακολουθίας είναι a-c-b, δηλ. αντίθετη από αυτή του ορθού συστήματος. Αν ένα δίκτυο είναι σε λειτουργία υπό το αντίστροφο σύστημα, πχ με εναλλαγή δύο φάσεων, τότε τα στρεφόμενα μέσα στρέφονται με φορά ανάποδη από την ονομαστική. Συνεπώς η ορθή συνδεσμολογία των φάσεων είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη λειτουργία των τριφασικών γεννητριών και κινητήρων.



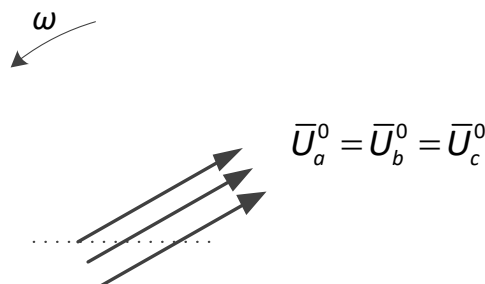
Σχήμα 2.4: Διανύσματα τάσης αντίστροφης ακολουθίας.

Στο σύστημα αρνητικής ακολουθίας το άθροισμα των ρευμάτων στον ουδέτερο όσον αφορά στοιχεία που είναι συνδεδεμένα σε αστέρα είναι μηδέν. Καθώς η σύνθετη αντίσταση των παθητικών στοιχείων (μετασχηματιστές, γραμμές, φορτία) δεν εξαρτάται από τη φορά ακολουθίας, η τιμή της σύνθετης αντίστασης της αρνητικής συνιστώσας είναι ίση με αυτή της ορθής. Αντίθετα, στα στρεφόμενα μέσα (γεννήτριες κινητήρες), η φορά ακολουθίας επιδρά στις τιμές των συνθέτων αντιστάσεων και για το λόγο αυτό η τιμή της σύνθετης αντίστασης της αντίστροφης συνιστώσας διαφέρει από αυτή της ορθής.

Ομοπολική συνιστώσα: Οι φασικές τάσεις στο σύστημα μηδενικής ακολουθίας είναι:

$$\left. \begin{array}{l} \bar{U}_a^0 = \bar{U}_0 \\ \bar{U}_b^0 = \bar{U}_0 \\ \bar{U}_c^0 = \bar{U}_0 \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{pmatrix} \bar{U}_a^0 \\ \bar{U}_b^0 \\ \bar{U}_c^0 \end{pmatrix} = \bar{U}_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

Οι φασικές τάσεις προκύπτουν πολλαπλασιάζοντας το ιδιοδιάνυσμα \mathbf{x}_0 με το \mathbf{U}_0 , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Επομένως το σύστημα μηδενικής ακολουθίας περιγράφεται από τρία διανύσματα τάσεων και ρευμάτων, το καθένα εκ των οποίων έχει το ίδιο μέτρο και γωνία μηδέν.

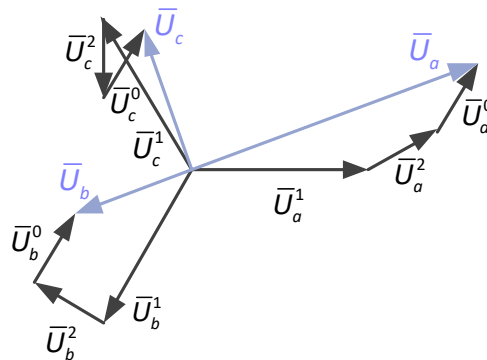


Σχήμα 2.5: Διανύσματα τάσης ομοπολικής ακολουθίας.

Τα ρεύματα μηδενικής ακολουθίας ρέουν μόνο μέσω του ουδέτερου σημείου N στις συνδεσμολογίες αστέρα· εάν αυτός ο δρόμος επιστροφής δεν υπάρχει, τότε είναι μηδέν. Έτσι, σε αντίθεση με τα συστήματα ορθής και αντίστροφης ακολουθίας, η γείωση του ουδέτερου σημείου είναι μείζονος σημασίας για τον προσδιορισμό του συστήματος μηδενικής ακολουθίας. Σημειώνεται ότι η σύνθετη αντίσταση των γραμμών μεταφοράς και των μετασχηματιστών στο ομοπολικό σύστημα είναι κατά κανόνα μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή στα άλλα δύο συστήματα.

Σύνοψη - παρατηρήσεις:

Παριστάνοντας γραφικά την (2.20) στο Σχήμα 2.6 φαίνεται ότι ένα τριφασικό σύστημα που δεν είναι συμμετρικό (balanced) μπορεί να αναλυθεί προσθέτοντας διανυσματικά τα αντίστοιχα διανύσματα των συμμετρικών συνιστωσών (μετασχηματισμός $012 \rightarrow abc$) και το αντίστροφο.



Σχήμα 2.6: Ανάλυση συστήματος τάσεων abc σε συμμετρικές συνιστώσες.

Στην περίπτωση συμμετρικής (balanced) λειτουργίας ενός τριφασικού συστήματος, μόνο η ορθή συνιστώσα θεωρείται ότι επιδρά, καθώς οι τάσεις και τα ρεύματα των υπολοίπων δύο συνιστωσών είναι μηδέν. Αντίθετα, θεωρώντας μη συμμετρική (unbalanced) λειτουργία, οι τιμές των συνιστωσών της αντίστροφης και της ομοπολικής συνιστώσας δεν είναι πλέον μηδέν. Σε αυτή την περίπτωση είναι προτιμότερη η ανάλυση του κυκλώματος χρησιμοποιώντας τις συμμετρικές συνιστώσες, καθώς τα αντίστοιχα συστήματα είναι πλήρως αποζευγμένα μεταξύ τους, ή τουλάχιστον η ύπαρξη τυχόν ζεύξης μεταξύ τους είναι πολύ μικρή συγκριτικά με τις ζεύξεις μεταξύ των φάσεων στο σύστημα abc .

Οι συμμετρικές συνιστώσες φαίνεται ότι έχουν φυσική υπόσταση και δεν είναι απλά απόρροια ενός μαθηματικού μετασχηματισμού. Αυτό διαπιστώνεται και από το γεγονός ότι μπορούν να μετρηθούν. Υποθέτοντας ότι κάθε μια συνιστώσα επιδρά ανεξάρτητα σε ένα τριφασικό σύστημα μπορεί να διαπιστωθεί ότι

- Στις τριφασικές στρεφόμενες μηχανές μόνο η ορθή συνιστώσα συμμετέχει στη μετατροπή ενέργειας.
- Η αντίστροφη συνιστώσα προκαλεί στις σύγχρονες μηχανές ασύμμετρη φόρτιση και θερμική καταπόνηση των τυλιγμάτων αποσβέσεως και των πελμάτων των πόλων από δινορεύματα. Στις ασύγχρονες μηχανές οδηγεί σε πέδηση. Για τον λόγο αυτό προδιαγράφεται η μέγιστη επιτρεπόμενη σχέση I_2/I_1 σε σύγχρονες γεννήτριες, ασύγχρονους κινητήρες και κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος.
- Η ομοπολική συνιστώσα δεν παράγει ροπή σε στρεφόμενες μηχανές. Ωστόσο, η επίδρασή της σε γειτονικά κυκλώματα, πχ γειτονικά ηλεκτρικά δίκτυα, δίκτυα σωληνώσεων ή τηλεπικοινωνιών γίνεται εμφανής κατά την εμφάνιση σφαλμάτων. Συγκεκριμένα, επαγόμενες τάσεις σε γειτονικά κυκλώματα εμφανίζονται είτε από τη ροή ομοπολικών ρευμάτων λόγω επαγωγικής ζεύξης είτε από ομοπολικές τάσεις λόγω χωρητικής ζεύξης. Συνήθως, σε περίπτωση σφαλμάτων με επαφή γης είναι επιθυμητό να περιοριστεί η ομοπολική συνιστώσα στο τμήμα του δικτύου που εμφανίζεται το σφάλμα. Μετρώντας επομένως την ομοπολική συνιστώσα μπορεί να εντοπιστεί το τμήμα του δικτύου στο οποίο έχει εμφανιστεί το σφάλμα.

2.3 Ισχύς στις συμμετρικές συνιστώσες

Γενικά, η ισχύς ενός τριφασικού συστήματος υπολογίζεται ως το άθροισμα της ισχύος σε κάθε φάση

$$\mathbf{S} = \bar{U}_a \bar{I}_a^* + \bar{U}_b \bar{I}_b^* + \bar{U}_c \bar{I}_c^* = \mathbf{U}^T \mathbf{I}^* \quad (2.25)$$

Αντικαθιστώντας την (2.18) προκύπτει

$$\mathbf{S} = (\mathbf{U}_{012})^T \underbrace{(\mathbf{T})^T (\mathbf{T})^*}_{3\mathbf{E}} (\mathbf{I}_{012})^* \quad (2.26)$$

όπου \mathbf{E} είναι ο μοναδιαίος πίνακας και ισχύει η σχέση

$$(\mathbf{T})^T (\mathbf{T})^* = \begin{pmatrix} 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \end{pmatrix} = 3 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = 3\mathbf{E} \quad (2.27)$$

οπότε η (2.26) γράφεται:

$$\mathbf{S} = 3(\mathbf{U}_{012})^T (\mathbf{I}_{012})^* = 3(\bar{U}_1 \bar{I}_1^* + \bar{U}_2 \bar{I}_2^* + \bar{U}_0 \bar{I}_0^*) = 3\mathbf{S}_{012} \quad (2.28)$$

Ο συντελεστής 3 στην (2.28) έχει προκύψει εξαιτίας της επιλογής των συγκεκριμένων ιδιοδιανυσμάτων (μετασχηματισμός τριφασικού συστήματος σε συμμετρικές συνιστώσες ίδιου πλάτους, γι' αυτό και ο μετασχηματισμός χαρακτηρίζεται ως αμετάβλητου πλάτους, amplitude invariant) και σημαίνει ότι η ισχύς στο σύστημα 012 δεν είναι ίδια με αυτή στο σύστημα abc. Στην ειδική περίπτωση συμμετρικού τριφασικού συστήματος, όπου $\bar{I}_0 = 0$, $\bar{I}_2 = 0$ η (2.28) γράφεται

$$\mathbf{S} = 3\bar{U}_1 \bar{I}_1^* \quad (2.29)$$

Ο συντελεστής 3 είναι ο αριθμός των φάσεων και τα \bar{U}_1 και \bar{I}_1 τα φασικά διανύσματα τάσης και έντασης.

2.4 Ακολουθιακές σύνθετες αντιστάσεις

2.4.1 Τριφασικό σύστημα

Στο Σχήμα 2.7 φαίνεται ένα τριφασικό κύκλωμα με ζεύξεις μεταξύ των αγωγών των φάσεων, το οποίο περιγράφεται από την (2.30), στην οποία οι όροι \bar{Z}_{ij} αναπαριστούν τις ίδιες και οι \bar{Z}_{ij} τις αμοιβαίες σύνθετες αντιστάσεις, αντίστοιχα, ενώ \bar{Z}_E είναι η σύνθετη αντίσταση γείωσης του ουδέτερου κόμβου.

$$\begin{pmatrix} \bar{E}_a \\ \bar{E}_b \\ \bar{E}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{U}_a \\ \bar{U}_b \\ \bar{U}_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \bar{Z}_{aa} + \bar{Z}_E & \bar{Z}_{ab} + \bar{Z}_E & \bar{Z}_{ac} + \bar{Z}_E \\ \bar{Z}_{bc} + \bar{Z}_E & \bar{Z}_{bb} + \bar{Z}_E & \bar{Z}_{bc} + \bar{Z}_E \\ \bar{Z}_{ca} + \bar{Z}_E & \bar{Z}_{cb} + \bar{Z}_E & \bar{Z}_{ca} + \bar{Z}_E \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{pmatrix} \quad (2.30)$$

Σημειώνεται ότι ο \mathbf{Z}_{abc} είναι πλήρης και συμμετρικός προς την κύρια διαγώνιο, καθώς αναφέρεται σε παθητικά στοιχεία του δικτύου για τα οποία ισχύει $\bar{Z}_{ij} = \bar{Z}_{ji}$. Ο αντίστοιχος πίνακας \mathbf{Z}_{012} υπολογίζεται από την (2.6) και γράφεται γενικά ως

$$\mathbf{Z}_{012} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{Z}_{abc} \mathbf{T} = \underbrace{\begin{pmatrix} \bar{Z}_{00} & \bar{Z}_{01} & \bar{Z}_{02} \\ \bar{Z}_{10} & \bar{Z}_{11} & \bar{Z}_{12} \\ \bar{Z}_{20} & \bar{Z}_{21} & \bar{Z}_{22} \end{pmatrix}}_{\mathbf{Z}_{012}} \quad (2.31)$$

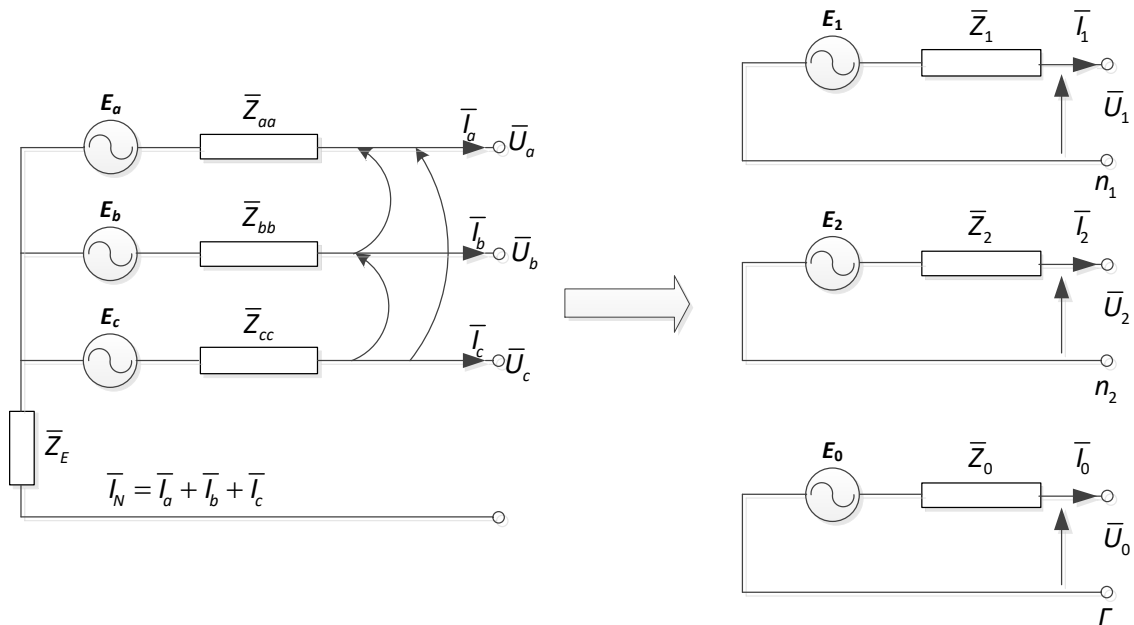
όπου για τους **ίδιους όρους** του \mathbf{Z}_{012} ισχύει

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{00} &= 1/3 \left[(\bar{Z}_{aa} + \bar{Z}_{bb} + \bar{Z}_{cc}) + 2(\bar{Z}_{ab} + \bar{Z}_{bc} + \bar{Z}_{ac}) + 9\bar{Z}_E \right] \\ \bar{Z}_{11} &= 1/3 \left[(\bar{Z}_{aa} + \bar{Z}_{bb} + \bar{Z}_{cc}) - (\bar{Z}_{ab} + \bar{Z}_{bc} + \bar{Z}_{ac}) \right] \\ \bar{Z}_{22} &= \bar{Z}_{11}\end{aligned}\quad (2.32)$$

και για τους **αμοιβαίους όρους**

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{01} &= 1/3 \left[(\bar{Z}_{aa} + \alpha^2 \bar{Z}_{bb} + \alpha \bar{Z}_{cc}) - (\bar{Z}_{bc} + \alpha \bar{Z}_{ab} + \alpha^2 \bar{Z}_{ac}) \right] \\ \bar{Z}_{02} &= 1/3 \left[(\bar{Z}_{aa} + \alpha \bar{Z}_{bb} + \alpha^2 \bar{Z}_{cc}) - (\bar{Z}_{bc} + \alpha^2 \bar{Z}_{ab} + \alpha \bar{Z}_{ac}) \right] \\ \bar{Z}_{10} &= \bar{Z}_{02} \\ \bar{Z}_{12} &= 1/3 \left[(\bar{Z}_{aa} + \alpha^2 \bar{Z}_{bb} + \alpha \bar{Z}_{cc}) + 2(\bar{Z}_{bc} + \alpha \bar{Z}_{ab} + \alpha^2 \bar{Z}_{ac}) \right] \\ \bar{Z}_{20} &= \bar{Z}_{01} \\ \bar{Z}_{21} &= 1/3 \left[(\bar{Z}_{aa} + \alpha \bar{Z}_{bb} + \alpha^2 \bar{Z}_{cc}) + 2(\bar{Z}_{bc} + \alpha^2 \bar{Z}_{ab} + \alpha \bar{Z}_{ac}) \right]\end{aligned}\quad (2.33)$$

Από την (2.33) φαίνεται ότι ο \mathbf{Z}_{012} στη γενικευμένη του μορφή δεν είναι διαγώνιος και επομένως οι συμμετρικές συνιστώσες δεν είναι αποζευγμένες μεταξύ τους. Ωστόσο, σε συγκεκριμένες περιπτώσεις ή θεωρώντας κατάλληλες παραδοχές η (2.32) και (2.33) μπορούν να απλοποιηθούν και να προκύψουν αποζευγμένα κυκλώματα, όπως αναλύεται στις επόμενες υποενότητες.



Σχήμα 2.7: Τριφασικό σύστημα με ζεύξεις μεταξύ των φάσεων.

2.4.1.1 Ανεξάρτητες σύνθετες αντιστάσεις

Κυκλώματα ανεξάρτητων σύνθετων αντιστάσεων στα οποία **δεν υπάρχουν ζεύξεις μεταξύ των φάσεων**, είναι οι τριφασικές συσκευές, οι συστοιχίες αντιστάθμισης, κτλ. Σε αυτή την περίπτωση οι (2.32) και (2.33), παραλείποντας τον ουδέτερο αγωγό, απλοποιούνται στην

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{00} = \bar{Z}_{11} = \bar{Z}_{22} &= 1/3(\bar{Z}_{aa} + \bar{Z}_{bb} + \bar{Z}_{cc}) \\ \bar{Z}_{01} = \bar{Z}_{12} = \bar{Z}_{20} &= 1/3(\bar{Z}_{aa} + \bar{a}^2\bar{Z}_{bb} + \bar{a}\bar{Z}_{cc}) \\ \bar{Z}_{10} = \bar{Z}_{21} = \bar{Z}_{02} &= 1/3(\bar{Z}_{aa} + \bar{a}\bar{Z}_{bb} + \bar{a}^2\bar{Z}_{cc})\end{aligned}\quad (2.34)$$

Θεωρώντας περαιτέρω **συμμετρικό τριφασικό σύστημα σύνθετων αντιστάσεων**, δηλ. $\bar{Z}_{aa} = \bar{Z}_{bb} = \bar{Z}_{cc} = \bar{Z}_s$, εξασφαλίζοντας δηλαδή κυκλική συμμετρία, προκύπτει

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{00} = \bar{Z}_{11} = \bar{Z}_{22} &= \bar{Z}_s \\ \bar{Z}_{01} = \bar{Z}_{12} = \bar{Z}_{20} &= 0 \\ \bar{Z}_{10} = \bar{Z}_{21} = \bar{Z}_{02} &= 0\end{aligned}\quad (2.35)$$

και η (2.31) γράφεται

$$\mathbf{Z}_{012} = \begin{pmatrix} \bar{Z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_2 \end{pmatrix} = \bar{Z}_s \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\quad (2.36)$$

όπου τα στοιχεία του διαγώνιου πίνακα \mathbf{Z}_{012} προς χάριν απλότητας γράφονται

- $\bar{Z}_{00} = \bar{Z}_0$: σύνθετη αντίσταση του ομοπολικού συστήματος ή ομοπολική σύνθετη αντίσταση
- $\bar{Z}_{11} = \bar{Z}_1$: σύνθετη αντίσταση του ορθού συστήματος ή ορθή σύνθετη αντίσταση
- $\bar{Z}_{22} = \bar{Z}_2$: σύνθετη αντίσταση του αντίστροφου συστήματος ή αντίστροφη σύνθετη αντίσταση

Από την (2.36) φαίνεται ότι ο πίνακας των συμμετρικών συνιστωσών ταυτίζεται απόλυτα με το φυσικό σύστημα.

Σύνοψη - παρατηρήσεις:

- Αν οι σύνθετες αντιστάσεις των φάσεων ενός τριφασικού συστήματος είναι **ανεξάρτητες μεταξύ τους και ίσες**, τότε και τα συστήματα των συμμετρικών συνιστωσών είναι ανεξάρτητα.

2.4.1.2 Ίσες ίδιες και αμοιβαίες σύνθετες αντιστάσεις

Στην περίπτωση που στο κύκλωμα μπορούν να θεωρηθούν ίσες οι ίδιες σύνθετες $\bar{Z}_{aa} = \bar{Z}_{bb} = \bar{Z}_{cc} = \bar{Z}_s$ καθώς και οι αμοιβαίες σύνθετες αντιστάσεις $\bar{Z}_{ab} = \bar{Z}_{bc} = \bar{Z}_{ac} = \bar{Z}_m$, εξασφαλίζοντας δηλαδή κυκλική συμμετρία, τότε ισχύει $\bar{Z}_{01} = \bar{Z}_{02} = \bar{Z}_{10} = \bar{Z}_{12} = \bar{Z}_{20} = \bar{Z}_{21} = 0$ και οι (2.32) και (2.33) απλοποιούνται

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{00} &= \bar{Z}_0 = \bar{Z}_s + 2\bar{Z}_m \\ \bar{Z}_{11} &= \bar{Z}_1 = \bar{Z}_s - \bar{Z}_m \\ \bar{Z}_{22} &= \bar{Z}_2 = \bar{Z}_1\end{aligned}\tag{2.37}$$

οπότε η (2.31) γράφεται

$$\mathbf{Z}_{012} = \begin{pmatrix} \bar{Z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{Z}_s + 2\bar{Z}_m & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_s - \bar{Z}_m & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_s - \bar{Z}_m \end{pmatrix}\tag{2.38}$$

Σύνοψη - παρατηρήσεις:

- Αν ένα τριφασικό σύστημα με ζεύξεις μεταξύ των φάσεων είναι **κατασκευαστικά συμμετρικό**, δηλ. τόσο οι ίδιες όσο και οι αμοιβαίες σύνθετες αντιστάσεις είναι ίσες μεταξύ τους, τότε τα συστήματα 012 είναι ανεξάρτητα (αποζευγμένα) μεταξύ τους.
- Όλα τα στοιχεία των ΣΗΕ παρουσιάζουν κυκλική συμμετρία εκτός των εναέριων γραμμών και των υπόγειων καλωδίων. Ωστόσο, στις *εναέριες γραμμές υπερύψηλης και υψηλής τάσης* εξασφαλίζεται η κυκλική συμμετρία με αντιμετάθεση των αγωγών. Τα *εναέρια δίκτυα διανομής* (μέσης και χαμηλής τάσης) θεωρούνται εν γένει κατασκευαστικά συμμετρικά (κατά προσέγγιση), καθώς λόγω των μικρών αποστάσεων μεταξύ των αγωγών η μη συμμετρική τους διάταξη προκαλεί μόνο μικρές διαφορές στις αμοιβαίες σύνθετες αντιστάσεις. Στα *υπόγεια συστήματα καλωδίων*, η κυκλική συμμετρία επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση των αγωγών σε τριγωνική διάταξη (trefoil), ενώ στα *εναέρια συστήματα καλωδίων χαμηλής τάσης* με συστροφή μεταξύ τους (συνεστραμμένα καλώδια).
- Η συμμετρία ενός συστήματος διαταράσσεται από τα *ασύμμετρα σφάλματα* (μονοπολικό και διπολικό βραχυκύκλωμα, πολλαπλά σφάλματα, διακοπή ενός ή δύο αγωγών), από τα *μέσα ζεύξης* (μονοπολικοί διακόπτες και αυτόματης επαναφοράς) και από τα *ασύμμετρα φορτία* λόγω των μονοφασικών συσκευών.

2.4.2 Τριφασικό σύστημα με ζεύξεις μεταξύ φάσεων και μεταξύ φάσεων και τέταρτου αγωγού

2.4.2.1 Συμμετρικές συνιστώσες

Στην περίπτωση τριφασικού κυκλώματος με ουδέτερο αγωγό όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7

$$\begin{pmatrix} \bar{E}_a \\ \bar{E}_b \\ \bar{E}_c \\ \bar{E}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{Z}_{aa} & \bar{Z}_{ab} & \bar{Z}_{ac} & \bar{Z}_{an} \\ \bar{Z}_{ab} & \bar{Z}_{bb} & \bar{Z}_{bc} & \bar{Z}_{bn} \\ \bar{Z}_{ac} & \bar{Z}_{bc} & \bar{Z}_{cc} & \bar{Z}_{cn} \\ \bar{Z}_{an} & \bar{Z}_{bn} & \bar{Z}_{cn} & \bar{Z}_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \\ \bar{I}_n \end{pmatrix} \quad (2.39)$$

επειδή ισχύει

$$\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c + \bar{I}_n = 0 \quad (2.40)$$

η (2.39) γράφεται

$$\begin{pmatrix} \bar{E}_a \\ \bar{E}_b \\ \bar{E}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{U}_a \\ \bar{U}_b \\ \bar{U}_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta \bar{U}_a \\ \Delta \bar{U}_b \\ \Delta \bar{U}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{U}_a \\ \bar{U}_b \\ \bar{U}_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \bar{U}_a - \bar{U}_n \\ \bar{U}_b - \bar{U}_n \\ \bar{U}_c - \bar{U}_n \end{pmatrix} \quad (2.41)$$

οπότε ο πίνακας \mathbf{Z}_{012} υπολογίζεται πάλι από την (2.31) έχοντας ως στοιχεία τα

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{00} &= 1/3 [(\bar{Z}_{aa} + \bar{Z}_{bb} + \bar{Z}_{cc}) + 2(\bar{Z}_{ab} + \bar{Z}_{bc} + \bar{Z}_{ac})] + 3\bar{Z}_{nn} - 2(\bar{Z}_{an} + \bar{Z}_{bn} + \bar{Z}_{cn}) \\ \bar{Z}_{11} = \bar{Z}_{22} &= 1/3 [(\bar{Z}_{aa} + \bar{Z}_{bb} + \bar{Z}_{cc}) - (\bar{Z}_{ab} + \bar{Z}_{bc} + \bar{Z}_{ac})] \\ \bar{Z}_{01} = \bar{Z}_{20} &= 1/3 [(\bar{Z}_{aa} + \bar{a}^2 \bar{Z}_{bb} + \bar{a} \bar{Z}_{cc}) - (\bar{Z}_{bc} + \bar{a} \bar{Z}_{ab} + \bar{a}^2 \bar{Z}_{ac})] - (\bar{Z}_{an} + \bar{a}^2 \bar{Z}_{bn} + \bar{a} \bar{Z}_{cn}) \\ \bar{Z}_{02} = \bar{Z}_{10} &= 1/3 [(\bar{Z}_{aa} + \bar{a} \bar{Z}_{bb} + \bar{a}^2 \bar{Z}_{cc}) - (\bar{Z}_{bc} + \bar{a}^2 \bar{Z}_{ab} + \bar{a} \bar{Z}_{ac})] - (\bar{Z}_{an} + \bar{a} \bar{Z}_{bn} + \bar{a}^2 \bar{Z}_{cn}) \\ \bar{Z}_{12} &= 1/3 [(\bar{Z}_{aa} + \bar{a}^2 \bar{Z}_{bb} + \bar{a} \bar{Z}_{cc}) + 2(\bar{Z}_{bc} + \bar{a} \bar{Z}_{ab} + \bar{a}^2 \bar{Z}_{ac})] \\ \bar{Z}_{21} &= 1/3 [(\bar{Z}_{aa} + \bar{a} \bar{Z}_{bb} + \bar{a}^2 \bar{Z}_{cc}) + 2(\bar{Z}_{bc} + \bar{a}^2 \bar{Z}_{ab} + \bar{a} \bar{Z}_{ac})] \end{aligned} \quad (2.42)$$

Από την (2.42) φαίνεται ότι τα μεγέθη \bar{Z}_{11} , \bar{Z}_{22} , \bar{Z}_{12} , \bar{Z}_{21} είναι ανεξάρτητα από τον αγωγό γης. Εάν τόσο οι ίδιες ($\bar{Z}_{aa} = \bar{Z}_{bb} = \bar{Z}_{cc} = \bar{Z}_s$) όσο και οι αμοιβαίες ($\bar{Z}_{ab} = \bar{Z}_{bc} = \bar{Z}_{ca} = \bar{Z}_m$) και ($\bar{Z}_{an} = \bar{Z}_{bn} = \bar{Z}_{cn}$) σύνθετες αντιστάσεις είναι ίσες μεταξύ τους, εξασφαλίζοντας δηλαδή κυκλική συμμετρία, τα στοιχεία του \mathbf{Z}_{012} πλην της κυρίας διαγωνίου μηδενίζονται και προκύπτει

$$\mathbf{Z}_{012} = \begin{pmatrix} \bar{Z}_{aa} + 2\bar{Z}_{ab} + 3(\bar{Z}_{nn} - 2\bar{Z}_{an}) & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_{aa} - \bar{Z}_{ab} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_{aa} - \bar{Z}_{ab} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{Z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_2 \end{pmatrix} \quad (2.43)$$

Επομένως, και στην περίπτωση αυτή τα συστήματα 012 είναι πλήρως αποζευγμένα μεταξύ τους.

2.4.2.2 Ουδέτερος

Ειδικότερα όσον αφορά τον ουδέτερο, η (2.40) λαμβάνοντας υπόψη την (2.18) γράφεται

$$\bar{I}_{a_0} = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c) \quad (2.44)$$

από τις οποίες με σύγκριση προκύπτει

$$\bar{I}_n = 3\bar{I}_{a_0} \quad (2.45)$$

δηλ. το ρεύμα του ουδετέρου ισούται με το τριπλάσιο του ρεύματος μηδενικής ακολουθίας. Όταν δεν υπάρχει δρόμος επιστροφής σε ένα τριφασικό σύστημα, πχ φορτίο συνδεδεμένο σε τρίγωνο, το ρεύμα ουδετέρου είναι μηδέν και επομένως δεν υπάρχει ρεύμα μηδενικής ακολουθίας. Το γεγονός αυτό στο σύστημα συμμετρικών συνιστωσών ερμηνεύεται ως ότι η σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας \bar{Z}_0 είναι άπειρη, προκαλώντας έτσι διακοπή στη λειτουργία του αντίστοιχου κυκλώματος μηδενικής ακολουθίας.

2.4.3 Η έννοια των συνθέτων αντιστάσεων συμμετρικών συνιστωσών

Όπως προέκυψε από την ανάλυση των προηγούμενων ενοτήτων ένα τριφασικό σύστημα, του οποίου ο πίνακας συνθέτων αντιστάσεων είναι κυκλικά συμμετρικός μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα ισοδύναμο σύστημα το οποίο αποτελείται από τρία αποζευγμένα κυκλώματα, ήτοι το κύκλωμα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας. Πιο συγκεκριμένα

Κύκλωμα θετικής ακολουθίας: Το κύκλωμα αυτό αντιστοιχεί στο μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα κατά τη λειτουργία ενός συμμετρικού τριφασικού συστήματος με ένα ευθύ συμμετρικό σύστημα τάσεων. Μόνο το κύκλωμα θετικής ακολουθίας περιλαμβάνει πηγή τάσης, της οποίας η τιμή είναι ίση με τη φασική τάση του αντίστοιχου συμμετρικού συστήματος τάσεων. Η σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας \bar{Z}_1 είναι ανεξάρτητη της σύνθετης αντίστασης του ουδετέρου \bar{Z}_E . Έτσι, το

κύκλωμα θετικής ακολουθίας δεν επηρεάζεται από τον τρόπο γείωσης του ουδετέρου, καθώς το άθροισμα των αντίστοιχων ρευμάτων είναι μηδέν. Για την ανάλυση στοιχείων του κυκλώματος συνδεδεμένων σε τρίγωνο θα πρέπει να μετασχηματιστούν σε αστέρα. Ανεξάρτητα του τρόπου γείωσης των σημείων ουδετέρου στο κύκλωμα, σε ένα συμμετρικό τριφασικό κύκλωμα, τα σημεία αυτά έχουν το ίδιο δυναμικό (Σημείο n_1 στο Σχήμα 2.7). Επομένως, και στο ισοδύναμο κύκλωμα θετικής ακολουθίας όλα τα σημεία ουδετέρου μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους.

Κύκλωμα αρνητικής ακολουθίας: Το αντίστοιχο κύκλωμα αρνητικής ακολουθίας λαμβάνεται παρόμοια όπως το κύκλωμα θετικής ακολουθίας. Ωστόσο, στο κύκλωμα αυτό δεν υπάρχουν πηγές τάσης. Όσον αφορά το παθητικό τμήμα του δικτύου η \bar{Z}_2 είναι ίση με την \bar{Z}_1 . Επίσης και σε αυτή την περίπτωση ο τρόπος γείωσης του ουδετέρου (Σημείο n_2 στο Σχήμα 2.7) δεν επιδρά στο σχεδιασμό του κυκλώματος αρνητικής ακολουθίας. Επομένως, όπως και στο κύκλωμα θετικής ακολουθίας τα στοιχεία του κυκλώματος σε τρίγωνο μετασχηματίζονται σε αστέρα και όλα τα σημεία ουδετέρου ενώνονται μεταξύ τους. Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, για σύγχρονες και ασύγχρονες μηχανές τα μεγέθη \bar{Z}_1 και \bar{Z}_2 διαφέρουν, καθώς η περιστροφή του δρομέα προκαλεί διαφορετικές συνθήκες στα δύο συστήματα.

Κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας: Το κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας τροφοδοτείται από τη συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας της πηγής τάσης, η οποία για ένα συμμετρικό σύστημα τάσεων είναι μηδέν. Η τιμή της σύνθετης αντίστασης μηδενικής ακολουθίας \bar{Z}_0 διαφέρει από τις \bar{Z}_1 και \bar{Z}_2 , ενώ σε αυτή την περίπτωση ο τρόπος σύνδεσης του ουδετέρου είναι ιδιαίτερα σημαντικός, καθώς τα ομοπολικά ρεύματα ρέουν μόνο μέσω του ουδετέρου. Οι συνδέσεις στο σύστημα μηδενικής ακολουθίας αντιστοιχούν στις συνθήκες γείωσης του φυσικού συστήματος (Σημείο Γ στο Σχήμα 2.7). Οι σύνθετες αντιστάσεις στα σημεία γείωσης του ουδετέρου θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη με τιμή τριπλάσια αυτής του φυσικού συστήματος, καθώς μέσω του ουδετέρου ρέει ρεύμα με τιμή τριπλάσια του ομοπολικού ρεύματος. Επομένως, προκειμένου να επιτευχθεί ίδια τιμή πτώσης τάσης είναι αναγκαίος ο πολλαπλασιασμός της σύνθετης αντίστασης με τον συντελεστή τρία.

2.5 Στοιχεία δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας σε συμμετρικές συνιστώσες

2.5.1 Σύγχρονες γεννήτριες

Στο Σχήμα 2.8 φαίνεται μια γεννήτρια γειωμένη μέσω ενός πηνίου και στο Σχήμα 2.8 τα αντίστοιχα ακολουθιακά κυκλώματα. Όπως φαίνεται στα κυκλώματα αυτά έχουν παραληφθεί οι αντιστάσεις και περιλαμβάνονται μόνο οι επαγωγικές αντιδράσεις, καθώς είναι συγκριτικά πολύ μεγαλύτερες. Λαμβάνονται υπόψη μόνο σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα ο υπολογισμός του κρουστικού ρεύματος. Ειδικότερα

Κύκλωμα θετικής ακολουθίας: Οι παραγόμενες τάσεις είναι προσεγγιστικά μόνο θετικής ακολουθίας, καθώς η γεννήτρια είναι σχεδιασμένη να τροφοδοτεί μόνο συμμετρικές τριφασικές τάσεις. Έτσι, το ισοδύναμο κύκλωμα αποτελείται από μια ΗΕΔ (τερματική τάση γεννήτριας ως προς τον ουδέτερο της αφόρτιστης γεννήτριας, ο οποίος αποτελεί και τον κόμβο αναφοράς) σε σειρά με την αντίδραση του ορθού συστήματος, ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας που μελετάται, δηλ. υπομεταβατική, μεταβατική και μόνιμη. Και στις τρεις καταστάσεις, επειδή το κύκλωμα θετικής ακολουθίας ουσιαστικά αντιστοιχεί στο κύκλωμα της γεννήτριας σε συμμετρικές συνθήκες λειτουργίας, η αντίδραση θετικής ακολουθίας της γεννήτριας ταυτίζεται με την επαγωγική αντίδραση του άξονα- d των σύγχρονων μηχανών. Επομένως:

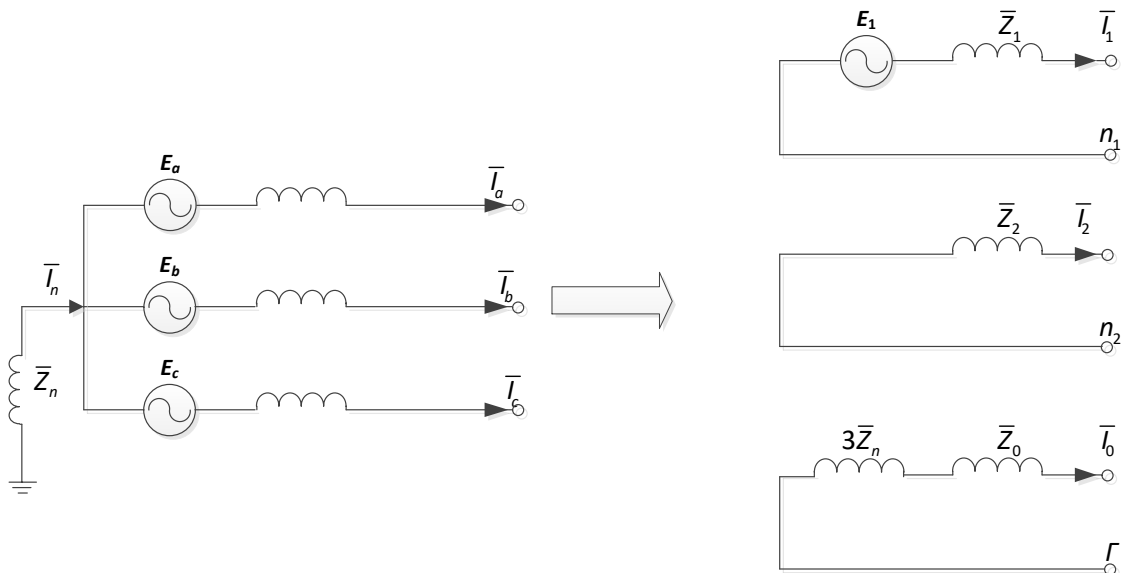
- Κατά τη μελέτη σφαλμάτων, συνήθως θεωρείται η αρχική (υπομεταβατική) κατάσταση της γεννήτριας και επομένως είναι $E_1 = E''$ και $X_1 = X_d'' = X_q''$ (καθώς τόσο για τις στροβιλογεννήτριες όσο και για τις γεννήτριες έκτυπων πόλων στην κατάσταση αυτή δεν υπεισέρχεται η διαφορετική μαγνητική αγωγιμότητα στους δύο άξονες d και q του δρομέα).
- Αν μελετάται το βραχυκύκλωμα 3-4 κύκλους μετά την εμφάνισή του τότε $X_1 = X_d'$.
- Αν μελετάται το βραχυκύκλωμα στη μόνιμη κατάσταση τότε $X_1 = X_d$.

Κύκλωμα αρνητικής ακολουθίας: Δεν περιλαμβάνει ΗΕΔ και ο κόμβος αναφοράς είναι ο ουδέτερος. Στο κύκλωμα αυτό όπως και στο κύκλωμα θετικής ακολουθίας ο ουδέτερος κόμβος είναι σε δυναμικό μηδέν. Η αντίδραση αρνητικής ακολουθίας είναι

ανεξάρτητη από την κατάσταση λειτουργίας και δίνεται από τη σχέση:

$$X_2 = \frac{X_d'' + X_q''}{2} = X_d''.$$

Κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας: Ομοίως δεν περιλαμβάνει ΗΕΔ. Ωστόσο, ως κόμβος αναφοράς Γ θεωρείται η γη στη γεννήτρια, καθώς στη γενική περίπτωση η αντίδραση γείωσης X_n διαρρέεται από τα ρεύματα μηδενικής ακολουθίας που αθροίζονται στον ουδέτερο. Η αντίδραση μηδενικής ακολουθίας λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των πηνίων αποσβέσεως είναι: $X_0 = (0,4 \dots 0,8)X_d'' + 3X_n$. Συνήθως όμως η X_n έχει πολύ μεγάλη τιμή για την εφαρμογή προστασίας έναντι εσωτερικών σφαλμάτων του τυλίγματος του στάτη προς το σίδηρο του στάτη και επομένως σφάλματα προς τη γη στην πλευρά των γεννητριών προκαλούν τη ροή πολύ μικρών ομοπολικών ρευμάτων. Στη συνήθη περίπτωση δε σύνδεσης γεννήτριας με το δίκτυο μέσω μετασχηματιστή συνδεσμολογίας τριγώνου-αστέρα (τρίγωνο στην πλευρά της γεννήτριας), πιθανά σφάλματα στο δίκτυο δεν μπορούν να προκαλέσουν τη ροή ομοπολικών ρευμάτων στη γεννήτρια. Επομένως, η συνιστάμενη αντίδραση του ομοπολικού συστήματος μπορεί να θεωρηθεί άπειρη και έτσι στο αντίστοιχο κύκλωμα στο Σχήμα 1.8 μπορεί να θεωρηθεί ότι δεν υπάρχει σύνδεση του ουδέτερου κόμβου με τη γη.



Σχήμα 2.8: Κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών σύγχρονων μηχανών.

Οι αντιδράσεις των γεννητριών συνήθως εκφράζονται σε per-unit με βάση τα ονομαστικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας:

$$x = \frac{X}{X_n} = \frac{X}{U_n / \sqrt{3} I_n} = \frac{X}{U_n^2 / S_n} \quad (2.46)$$

όπου:

- x : ανηγμένη τιμή αντίδρασης σε pu
- X : αντίδραση σε Ω
- X_n : ονομαστική αντίδραση
- U_n : ονομαστική πολική τάση
- S_n : ονομαστική ισχύς

Στον Πίνακα 2-2 παρουσιάζονται μερικές αντιπροσωπευτικές τιμές επαγωγικών αντιδράσεων σύγχρονων γεννητριών στο σύστημα re.

Πίνακας 2-2: Επαγωγικές αντιδράσεις σύγχρονων γεννητριών (pu)

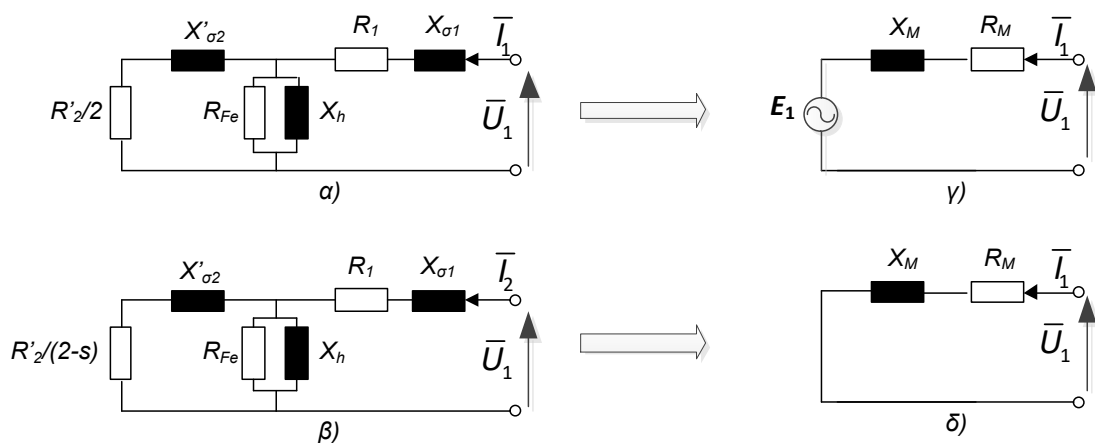
Επαγωγικές αντιδράσεις	Μηχανές με κυλινδρικό δρομέα	Μηχανές με έκτυπους πόλους
x_d''	0,09...0,22	0,12...0,30
x_q''	$(1...1,1)x_d''$	$(1...1,2)x_d''$
x_d	1,4...3,0	0,8...1,4
x_q	$(0,9...1,0)x_d$	$(0,6...0,7)x_d$
x_2	$x_2 = \frac{x_d'' + x_q''}{2} = x_d''$	
x_0	0,03...0,1	0,05...0,2

2.5.2 Ασύγχρονες μηχανές

Στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα ασύγχρονης μηχανής στο ευθύ και στο αντίστροφο σύστημα. Παρουσιάζονται δύο κυκλώματα που αντιστοιχούν στην κανονική λειτουργία της μηχανής ως κινητήρας και όταν τροφοδοτεί ένα βραχυκύκλωμα. Στο Σχήμα 2.9 ο δείκτης 1 αντιστοιχεί σε στοιχεία του στάτη, ενώ ο δείκτης 2 σε στοιχεία του δρομέα. R_{fe} η αντίσταση που εκφράζει τις απώλειες σιδήρου και X_h η επαγωγική αντίδραση, η οποία διαρρέεται από το ρεύμα μαγνήτισης.

Στην **κανονική λειτουργία** στο ευθύ σύστημα εμφανίζεται η αντίσταση R'_2/s , όπου R'_2 είναι η ανηγμένη αντίσταση του δρομέα στον στάτη. Ο δρομέας στρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω παρουσιάζοντας ολίσθηση s ως προς το μαγνητικό πεδίο των ρευμάτων του ευθέως συστήματος, το οποίο στρέφεται με τη σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα ω_s . Στο αντίστροφο σύστημα εμφανίζεται η αντίσταση $R'_2/(2-s)$. Ο δρομέας παρουσιάζει ολίσθηση s_2 ως προς το μαγνητικό πεδίο των ρευμάτων του αντίστροφου συστήματος, το οποίο στρέφεται με γωνιακή ταχύτητα $-\omega_s$ και ασκεί ροπή πεδήσεως στο δρομέα.

Στην περίπτωση **τριπολικού βραχυκυκλώματος** η τάση στους οπλισμούς του κινητήρα γίνεται πολύ μικρή. Ωστόσο, λόγω αδράνειας και ελλείψει διέγερσης κινητήρα εξακολουθεί να περιστρέφεται και το μαγνητικό πεδίο δεν μπορεί να μηδενιστεί αμέσως. Επομένως, η επαγωγική μηχανή περνάει από τη λειτουργία κινητήρα σε λειτουργία γεννήτριας και έτσι τροφοδοτεί αρχικά το σφάλμα συμβάλλοντας στο υπομεταβατικό ρεύμα (ο κινητήρας συμπεριφέρεται ως πηγή στην υπομεταβατική κατάσταση). Μετά την απόσβεση του μαγνητικού πεδίου η ασύγχρονη μηχανή δεν τροφοδοτεί πλέον το σφάλμα (μόνιμο ρεύμα), οπότε τόσο στο ευθύ όσο και στο αντίστροφο σύστημα εμφανίζεται η αντίσταση R_M και η αντίδραση X_M των τυλιγμάτων.



Σχήμα 2.9: Κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών ασύγχρονων μηχανών. α) Ευθύ σύστημα στη λειτουργία κινητήρα, β) αντίστροφο σύστημα στη λειτουργία κινητήρα, γ) ευθύ σύστημα κατά την τροφοδότηση σφάλματος, δ) αντίστροφο σύστημα κατά την τροφοδότηση σφάλματος.

2.5.3 Μετασηματιστές

Τα κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών των τριφασικών μετασηματιστών εξαρτώνται από τη συνδεσμολογία του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλιγματος. Οι

διαφορετικοί συνδυασμοί των συνδεσμολογιών (Δ ή Y) των τυλιγμάτων καθορίζουν τη σύνθετη αντίσταση της ομοπολικής συνιστώσας και τη διαφορά φάσης στα κυκλώματα ορθής και αντίστροφης συνιστώσας (η οποία στο παρόν σύγγραμμα παραλείπεται προς χάριν απλότητας). Τα κυκλώματα των συμμετρικών συνιστωσών σχεδιάζονται λαμβάνοντας υπόψη ότι αν αμελήσουμε τα ρεύματα μαγνήτισης (σχετικά μικρά) τότε στο πρωτεύον του μετασχηματιστή ρέει ρεύμα μόνο εφόσον ρέει ρεύμα και στο δευτερεύον του. Στην περίπτωση αυτή το ρεύμα στο πρωτεύον καθορίζεται από το ρεύμα στο δευτερεύον και τον λόγο των σπειρών. Όσον αφορά τα ρεύματα ομοπολικής συνιστώσας, όπως αναλύθηκε παραπάνω, αυτά μπορούν να ρέουν στα σκέλη της συνδεσμολογίας αστέρα μόνο όταν αυτός είναι γειωμένος [3]. Επίσης, ρεύματα ομοπολικής συνιστώσας ρέουν μόνο στα σκέλη της συνδεσμολογία τριγώνου (προκαλούμενα από τις τάσεις μηδενικής ακολουθίας), αλλά δεν ρέουν στις γραμμές που συνδέονται στα τυλίγματα αυτά. Με βάση τις θεωρήσεις αυτές σχεδιάζονται τα κυκλώματα των συμμετρικών συνιστωσών όπως παραγράφεται στις επόμενες παραγράφους.

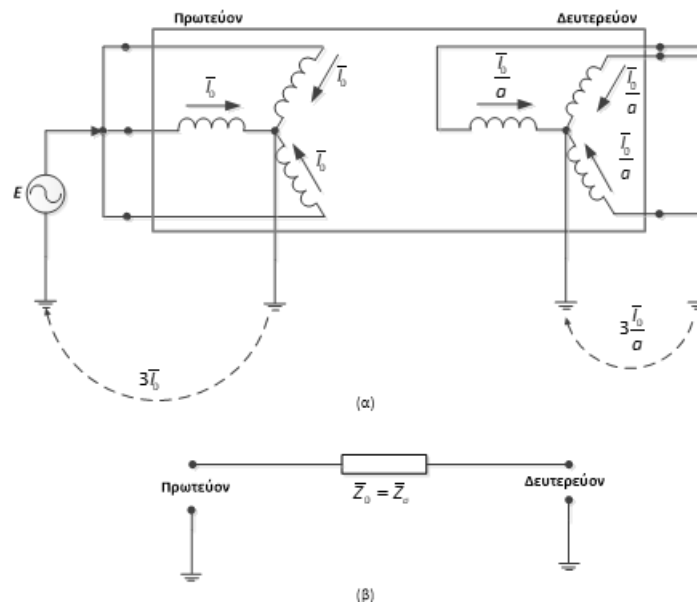
Κύκλωμα θετικής και αρνητικής ακολουθίας: Η σύνθετη αντίσταση της ορθής συνιστώσας μετασχηματιστή, Z_1 , είναι ίση με τη σύνθετη αντίσταση σκέδασης του μετασχηματιστή, Z_σ . Συνήθως αγνοούνται οι απώλειες οπότε προσεγγιστικά θεωρούνται μόνο οι επαγωγικές αντιδράσεις. Καθώς ο μετασχηματιστής είναι παθητικό στοιχείο, η σύνθετη αντίστασης σκέδασης δεν αλλάζει αν μεταβληθεί η ακολουθία των φάσεων από abc σε acb, οπότε η σύνθετη αντίσταση της αντίστροφης συνιστώσας είναι ίση με αυτή της ορθής και τα αντίστοιχα κυκλώματα ταυτίζονται. Συνοψίζοντας ισχύει:

$$Z_1 = Z_2 = Z_\sigma \Rightarrow X_1 = X_2 = X_\sigma \quad (2.47)$$

Κύκλωμα ομοπολικής συνιστώσας: Το κύκλωμα της ομοπολικής συνιστώσας εξετάζεται για διάφορες συνδεσμολογίες, όπως αυτές συνοψίζονται στον Πίνακα 2-3. Στα σχήματα του Πίνακα τα βέλη στα κυκλώματα δείχνουν τη φορά των ρευμάτων της ομοπολικής συνιστώσας. Η απουσία βέλους δηλώνει ότι στη συγκεκριμένη συνδεσμολογία δεν είναι δυνατή η ροή ρεύματος ομοπολικής συνιστώσας. Σημειώνεται ότι τα κυκλώματα αυτά έχουν σχεδιαστεί κατά προσέγγιση καθώς αγνοούνται οι αντιστάσεις και το ρεύμα μαγνήτισης του μετασχηματιστή.

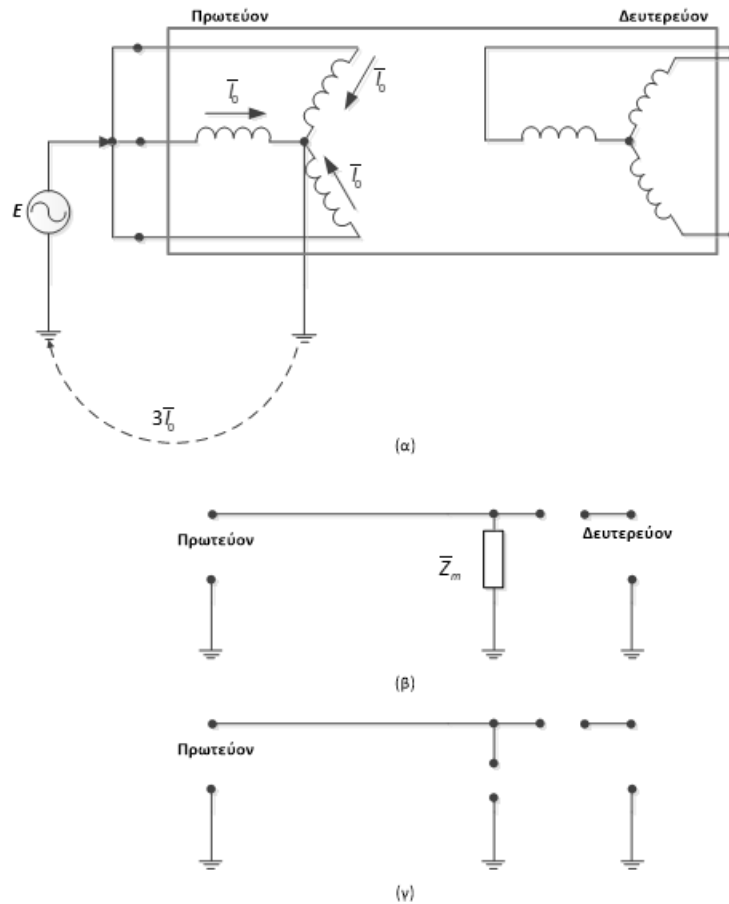
Μετασχηματιστής σε συνδεσμολογία YY και οι δύο ουδέτεροι γειωμένοι: Στο Σχήμα 2.10(α) φαίνεται το κύκλωμα του μετασχηματιστή, ενώ στο Σχήμα 2.10(β) το

ισοδύναμο κύκλωμα της ομοπολικής συνιστώσας. Η μεταλλική γείωση των ουδετέρων είναι αυτή που εξασφαλίζει τη ροή ομοπολικών ρευμάτων $3I_0$ στο δευτερεύον (πλευρά τροφοδοσίας) και $3I_0/(N_1/N_2)$ στο πρωτεύον, αντίστοιχα. Καθώς το ρεύμα περιορίζεται μόνο από την αντίδραση σκέδασης, το Σχήμα 2.10(β), η σύνθετη αντίσταση ομοπολικής συνιστώσας του μετασχηματιστή είναι ίση με την αντίδραση σκέδασης. Σε per-unit η σύνθετη αντίσταση ομοπολικής συνιστώσας είναι ίδια και από τις δύο πλευρές. Σε περίπτωση γείωσης του ουδετέρου μέσω αντιστάσεων Z_N και Z_n στο πρωτεύον και στο δευτερεύον αντίστοιχα, στο Σχήμα 2.10(β), η συνολική σύνθετη αντίσταση ομοπολικής συνιστώσας του μετασχηματιστή ανηγμένη στην πλευρά του πρωτεύοντος θα είναι: $Z_0 = Z_\sigma + 3Z_N + 3Z_n(N_1/N_2)^2$.



Σχήμα 2.10: Μετασχηματιστής ΥΔ με γειωμένο πρωτεύον και δευτερεύον (α) τριφασικό κύκλωμα (β) κύκλωμα ομοπολικής συνιστώσας.

Μετασχηματιστής σε συνδεσμολογία ΥΥ και γειωμένος μόνο ο ένας ουδέτερος: Στην περίπτωση αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 2.11, ομοπολικό ρεύμα ρέει μόνο στο τύλιγμα που είναι γειωμένο, καθώς η απουσία γείωσης δεν παρέχει δρόμο στα ομοπολικό ρεύματα να ρέουν προς τη γη. Έτσι, για τα ρεύματα ομοπολικής συνιστώσας, το δευτερεύον όπως και η σύνδεση των δύο τυλιγμάτων είναι ανοιχτοκυκλωμένα. Έτσι, από την πλευρά του πρωτεύοντος φαίνεται μόνο η σύνθετη αντίσταση μαγνήτισης Z_m (Σχήμα 2.11(β)), η οποία είναι πρακτικά είναι πολύ μεγάλη και μπορεί προσεγγιστικά να θεωρηθεί άπειρη, οπότε προκύπτει το απλοποιημένο κύκλωμα του Σχήματος 2.11(γ).

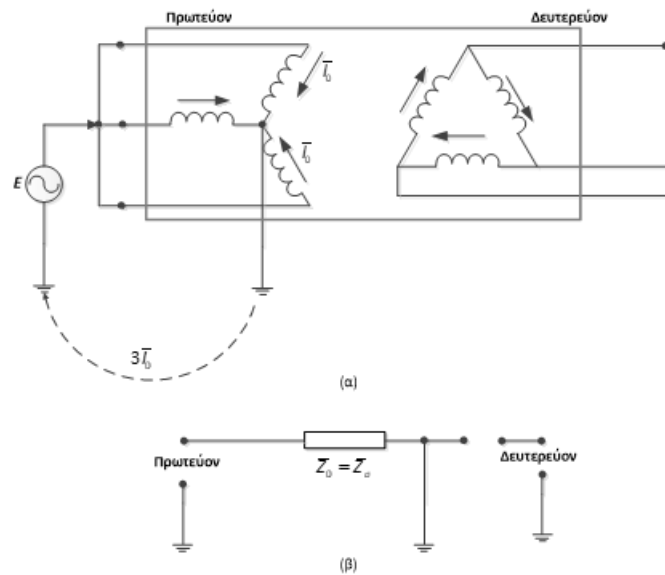


Σχήμα 2.11: Μετασχηματιστής ΥΔ με γειωμένο πρωτεύον (α) τριφασικό κύκλωμα (β) κύκλωμα ομοπολικής συνιστώσας.

Μετασχηματιστής σε συνδεσμολογία ΔΔ: Στη συνδεσμολογία αυτή αν και μεταξύ των τυλιγμάτων μπορεί να υπάρχει ροή ομοπολικού ρεύματος, καθώς μπορούν να κυκλοφορούν στα τυλίγματα στο τρίγωνο, ωστόσο, δεν μπορούν να κυκλοφορούν ρεύματα στους ακροδέκτες τους. Το πρώτο παριστάνεται με βραχυκυκλώματα προς τη γη, ενώ το δεύτερο με ανοιχτό κύκλωμα στις δύο πλευρές του ισοδύναμου.

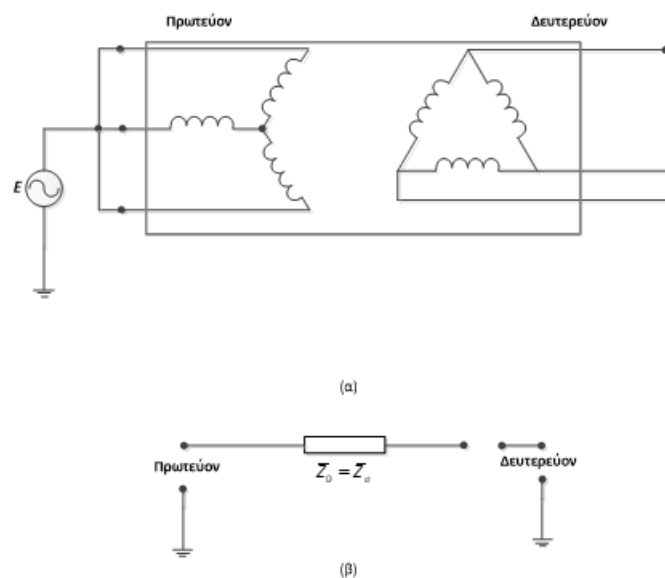
Μετασχηματιστής σε συνδεσμολογία ΥΔ με γειωμένο αστέρα: Στο Σχήμα 2.12(α) φαίνεται το κύκλωμα του μετασχηματιστή, ενώ στο Σχήμα 2.12(β) το ισοδύναμο κύκλωμα της ομοπολικής συνιστώσας. Η γείωση του ουδετέρου είναι αυτή που εξασφαλίζει τη ροή ομοπολικών ρευμάτων στην πλευρά του αστέρα. Ομοπολικά ρεύματα ρέουν και στα τυλίγματα του τριγώνου, αλλά δεν μπορούν να ρέουν στις γραμμές στις οποίες συνδέονται τα τυλίγματα καθώς δεν υπάρχει δρόμος επιστροφής. Τα παραπάνω αντιστοιχούν στο κύκλωμα ομοπολικής συνιστώσας με το

βραχυκύκλωμα στο έδαφος στην πλευρά του αστέρα και το ανοιχτό κύκλωμα στην πλευρά του τριγώνου.



Σχήμα 2.12: Μετασχηματιστής ΥΔ με γειωμένο πρωτεύουσα (α) τριφασικό κύκλωμα (β) κύκλωμα ομοπολικής συνιστώσας.

Μετασχηματιστής σε συνδεσμολογία ΥΔ με αγείωτο αστέρα: Το κύκλωμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.13 από όπου φαίνεται ότι καθώς η αντίσταση γείωσης του ουδετέρου είναι άπειρη, αυτό ισοδυναμεί με ανοιχτό κύκλωμα, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ροή ρεύματος ομοπολικής συνιστώσας.



Σχήμα 2.13: Μετασχηματιστής ΥΔ με αγείωτο αστέρα (α) τριφασικό κύκλωμα (β) κύκλωμα ομοπολικής συνιστώσας.

Πίνακας 2-3: Κυκλώματα ομοπολικής συνιστώσας για διάφορες συνδεσμολογίες τριφασικών μετασχηματιστών δύο τυλιγμάτων.

CASE	SYMBOLS	CONNECTION DIAGRAMS	ZERO-SEQUENCE EQUIVALENT CIRCUITS
1			
2			
3			
4			
5			

2.5.4 Εναέριες γραμμές μεταφοράς και καλώδια ισχύος

Οι εναέριες γραμμές μεταφοράς και τα συστήματα καλωδίων αποτελούν διατάξεις οι οποίες παρουσιάζουν ασυμμετρία. Πρακτικά, η πλήρης συμμετρία είναι περισσότερο ιδεατή παρά πραγματοποιήσιμη, αλλά εφόσον η επίδρασή της απόκλιση από τη συμμετρία είναι συνήθως μικρά, συχνά ειδικά στις γραμμές μεταφοράς που αντιμετωπίζονται κατά μήκος τους αλλά και στα συστήματα καλωδίων, θεωρείται τέλεια συμμετρία μεταξύ των φάσεων. Η θεώρηση των γραμμών ότι είναι κατασκευαστικά συμμετρικές διευκολύνει την ανάλυση σε συμμετρικές συνιστώσες, καθώς οι εξισώσεις θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας αποσυνδέονται η μία από την άλλη και τα αντίστοιχα κυκλώματα μπορούν να σχεδιαστούν χωρίς καμία σύζευξη μεταξύ τους. Στους Πίνακες 2-4 και 2-5, δίνονται ενδεικτικές τιμές συνθέτων αντιστάσεων ορθής και ομοπολικής συνιστώσας για συγκεκριμένες διατάξεις εναέριων γραμμών μεταφοράς και συστημάτων καλωδίων [4].

Κύκλωμα θετικής και αρνητικής ακολουθίας: Καθώς οι γραμμές μεταφοράς και τα συστήματα καλωδίων αποτελούν παθητικά στοιχεία, η σύνθετη αντίσταση της ορθής και της αντίστροφης συνιστώσας τους ταυτίζεται.

Κύκλωμα ομοπολικής συνιστώσας: Κατά την εκδήλωση σφαλμάτων ο δρόμος επιστροφής των ρευμάτων ομοπολικής συνιστώσας περιλαμβάνει τη γη, τους αγωγούς γης της γραμμής ή τους μανδύες των καλωδίων και τα αντίστοιχα συστήματα γείωσης. Επομένως, ανάλογα με τον πραγματικό δρόμο επιστροφής η σύνθετη αντίσταση ομοπολικής συνιστώσας λαμβάνει διάφορες τιμές. Όσον αφορά την αντίσταση γης, αυτή εξαρτάται από το είδος του εδάφους, την υγρασία, τη θερμοκρασία, κ.α. επομένως είναι αναγκαίο να θεωρηθούν ορισμένες απλοποιητικές παραδοχές. Αν δεν είναι διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των εναέριων γραμμών/συστημάτων καλωδίων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της σύνθετης αντίστασης της ομοπολικής συνιστώσας οι εμπειρικές τιμές του Πίνακα 2-6.

Πίνακας 2-4: Δεδομένα τυπικών εναέριων γραμμών μεταφοράς.

No	Type of line/ number of circuits (Fig. 9)	Voltage kV	Conductors/ subcon- ductors number material g_B mm ²	Earth wire number material g_A mm ²	Geometric data (see 2.4 and Figure 8)					Positive- sequence impedance ^{a)} $Z'_{(1)} =$ $R'_{(1)} + jX'_{(1)}$ Ω/km	Zero- sequence Impedance ^{a)} $Z'_{(0)} =$ $R'_{(0)} + jX'_{(0)}$ Ω/km	National Commit- tee		
					r	d	d_{mL1M2}	d_{Q1Q2}	d_{QL}				$Z'_{(0)}$	$R'_{(0)} + jX'_{(0)}$
					r_B	d_{LM}	d_{mL1M1}							
1	A/1	0,40	1 × Al 95	(PEN)	6,25	0,6	-	-	-	0,31+j0,302	0,63+j0,941	Austria		
2	B/1	20	1 × Cu 25	-	3,15	1,23	-	-	-	0,746+j0,396	0,854+j1,643	Italy		
3	D/1	66	1 × Al/St Condor	Al/St 25	13,86	3,77	-	3,0	4,9	0,072+j0,365	0,410+j0,882	Norway		
4	F/1	110	1 × Al/St 240/40	1 × St 50	10,95	4,06	-	-	10,8	0,119+j0,387	0,309+j1,382	Germany		
5	C/1	110	1 × Al/St 185/25	1 × St 50	9,2	4,61	-	-	4,33	0,156+j0,395	0,370+j1,34	Bulgaria		
6	C/1	132	1 × Al/St 525/68	1 × Al/St 138/68	15,8	5,81	-	-	12	0,061+j0,387	0,202+j0,931	Denmark		
7	E/1	220	1 × Al/St 291/37,2	2 × St 50	11,75	6,39	-	5,8	6,99	0,108+j0,411	0,352+j1,242	China		
8	C/ ^{b)}	220	1 × Al/St 400/51	1 × St 70	13,75	8,0	-	-	11,6	0,075+j0,420	0,250+j1,340	ex-USSR		
9	G/2	220	2 × Al/St 240/40	1 × Al/St 240/40	10,95	6,24	15,8	-	16,3	0,06+j0,299	0,273+j1,479	Germany		
10	K/2	275	4 × Al/St 610/79,4	1 × AS 160	17,1	9,85	16,39	13,0	16,84	0,015+j0,239	0,111+j1,708	Japan (50 Hz)		
11	K/2	380	2 × Al/St 680/85 ^{c)}	1 × Al/St 240/40	18,0	11,5	19,2	-	21,6	0,0215+j0,303	0,243+j1,400	Austria		
12	D/1	500	4 × Al/St 291/37,2	2 × Al/St 120/22	11,75	17,64	-	24,0	18,08	0,031+j0,286	0,233+j0,715	Australia		
13	K/2	500	4 × Al/St 814 / 56	2 × Al/St 150 / 87	38,4	15,13	25,23	20,4	26,92	0,009+j0,304	0,356+j1,224	Japan (60 Hz)		

a) Impedances per circuit and resistances at a temperature of 20 °C.
b) Special design. Two separate lines in one single right-of-way.
c) Since 2006, a new configuration of conductors is typical: 3 × Al/St 635/117.

Πίνακας 2-5: Δεδομένα τυπικών συστημάτων καλωδίων.

No	Rated voltage U_r a)	Conductors		Cross section and type b)	Type c)	No. of cores d)	Sheath (shield)		Positive-sequence impedance $Z'_{(1)} = R'_{(1)} + jX'_{(1)}$ f)	Current return g)	Zero-sequence impedance $Z'_{(0)} = R'_{(0)} + jX'_{(0)}$ f)	Country
		Number	Material				Type e)	Material				
	kV	-	-	mm ²	-	-	-	-	Ω/km	-	Ω/km	
1	0,6/1	4	Al	240/120 rST	NR	3½	-	-	0,129+j0,04	4 th +E	4,2R'_{(1)} + j4,6X'_{(1)}	ex-Czechosl.
2	6/10	3x1	Cu	120 rST	R ^{h)}	SC	W+T	Cu	0,16+j0,116	S+E	-	Hungary
3	10	3	Cu	240 rST	NR	TC	M	Pb	0,088+j0,069	S+E	+j0,242	China
4	22	3	Cu	120 rST	NR ⁱ⁾	TC	FW	Cu	0,153+j0,104	S+E	-	Norway
5	50	3x1	Al	500r	R	SC	W	Cu	0,084+j0,11	S+E	0,456+j0,156	Denmark
6	110	3x1	Cu	240 HO	R ^{j)}	SC	M	Pb/Al	0,079+j0,12	S+E	0,51+j0,30	Germany
7	132	3x1	Cu	220r HO	R	SC	M	Pb	0,084+j0,12	S	0,58+j0,061	Italy
8	275	3x1	Cu	1400sST	R	SC	M	Al	0,0131+j0,14 6	S+E	0,047+j0,047	Japan
9	330	3x1	Cu	1200s HO	R	SC	M	Al	0,0205+j0,18 8	S+E	0,0719+j0,0566	Australia
10	380	3x1	Cu	1200sST	R	SC	M	Al	0,018+j0,188	S	0,047+j0,070	Austria
a) Line-to-line voltage. b) r = round, HO = hollow, s = sector form, ST = stranded. c) R = radial field, NR = non-radial field. d) SC = single core, TC three-core cable. e) T = tapes; W = wires; M = metallic sheath.								f) AC resistance at 20°C. g) S in the sheath (shield), E in earth, 4 th in the fourth conductor. h) N2YSY. i) DKAB. j) Oil pressure.				

Πίνακας 2-6: Εμπειρικές τιμές σύνθετης αντίστασης ομοπολικής συνιστώσας.

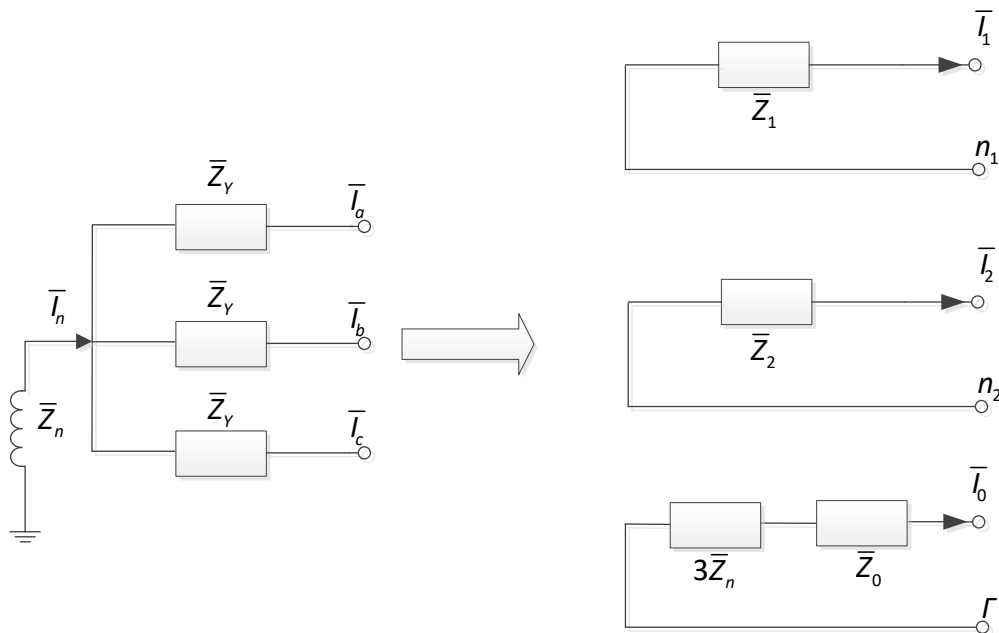
Διάταξη	Z_1/Z_0
Γραμμή απλού κυκλώματος	$Z_1/Z_0 = 3.5$, αν δεν υπάρχει αγωγός γείωσης $Z_1/Z_0 = 2$, αν υπάρχει αγωγός γείωσης
Γραμμή διπλού κυκλώματος	$Z_1/Z_0 = 5.5$, αν δεν υπάρχει αγωγός γείωσης $Z_1/Z_0 = 3$, αν υπάρχει αγωγός γείωσης
Υπόγειο σύστημα καλωδίων	$Z_1/Z_0 = 5.5$, για μονοπολικά $Z_1/Z_0 = 3$, για τριπολικά

2.5.5 Φορτία

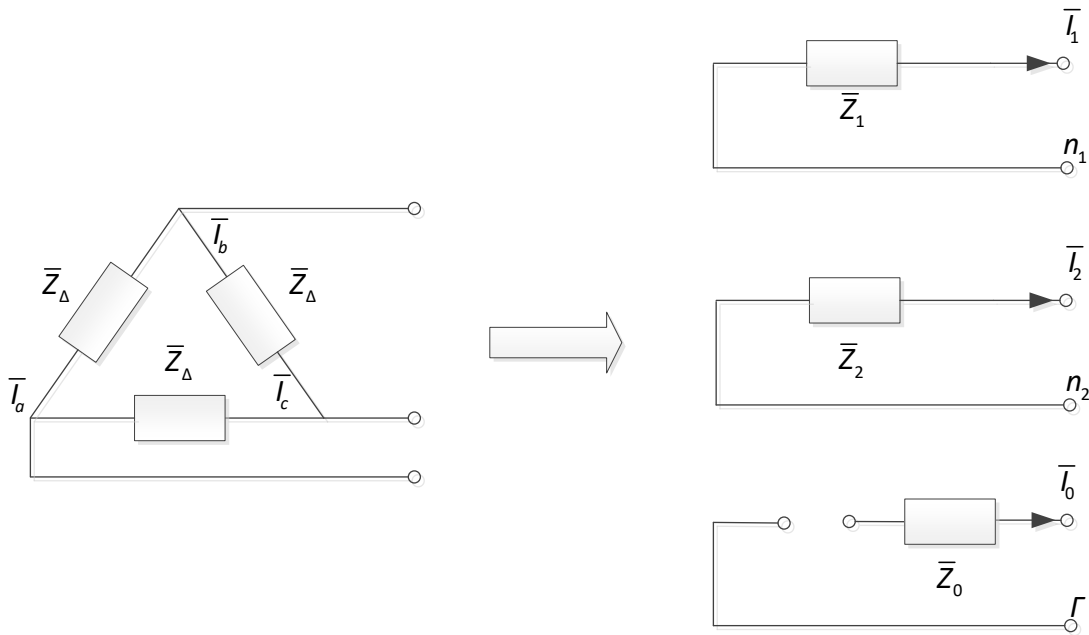
Στο Σχήμα 2.14 απεικονίζεται ένα συμμετρικό φορτίο σε συνδεσμολογία αστέρα και τα αντίστοιχα κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών. Στην περίπτωση που $\bar{Z}_n = 0$,

τότε ισχύει: $\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 = \bar{Z}_0 = \bar{Z}_Y$. Η γείωση του ουδέτερου κόμβου του φορτίου σε αστέρα δεν επηρεάζει τα κυκλώματα ορθής και αντίστροφης συνιστώσας καθώς σε κάθε περίπτωση ισχύει: $\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 = \bar{Z}_Y$ (είτε είναι γειωμένος είτε όχι ο ουδέτερος κόμβος). Οι συνθήκες γείωσης του ουδέτερου επηρεάζουν μόνο το κύκλωμα ομοπολικής συνιστώσας. Εάν ο ουδέτερος είναι γειωμένος, τότε το κύκλωμα της ομοπολικής συνιστώσας είναι όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.14. Εάν είναι αγείωτος, τότε η συνθήκη αυτή αντιστοιχεί σε $\bar{Z}_n \rightarrow \infty$ και το κύκλωμα ομοπολικής συνιστώσας είναι ανοιχτό.

Αντίστοιχα, στην περίπτωση που το φορτίο είναι συνδεδεμένο σε τρίγωνο (Σχήμα 2.15), τα αντίστοιχα κυκλώματα των συμμετρικών συνιστωσών μπορούν να προκύψουν μετασχηματίζοντας το τρίγωνο σε αγείωτο αστέρα, οπότε στην περίπτωση αυτή θα είναι: $\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 = \bar{Z}_\Delta/3$.



Σχήμα 2.14: Κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών φορτίου σε σύνδεση αστέρα.



Σχήμα 2.15: Κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών φορτίου σε σύνδεση τριγώνου.

2.5.6 Δίκτυα συμμετρικών συνιστωσών

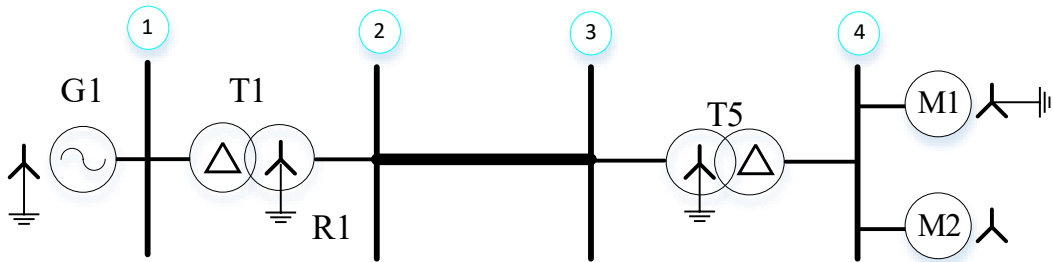
Από την ανάλυση των προηγούμενων ενοτήτων προκύπτουν οι εξής βασικές παρατηρήσεις [5]:

- Σε κάθε τμήμα του δικτύου η πτώση τάσης που προκαλείται από ρεύμα συγκεκριμένης ακολουθίας εξαρτάται μόνο τη σύνθετη αντίσταση και τη ροή του ρεύματος της ίδιας ακολουθίας στο συγκεκριμένο τμήμα του δικτύου.
- Οι σύνθετες αντιστάσεις \bar{Z}_1 και \bar{Z}_2 των παθητικών στοιχείων είναι ίσες και μπορούν να θεωρηθούν περίπου ίσες σε σύγχρονες μηχανές κάτω από υπομεταβατικές συνθήκες.
- Σε κάθε τμήμα του δικτύου γενικά η \bar{Z}_0 διαφέρει από τις \bar{Z}_1 και \bar{Z}_2 .
- Μόνο τα κυκλώματα των στρεφόμενων μέσων περιλαμβάνουν πηγές τάσης, οι οποίες εμφανίζονται μόνο στο κύκλωμα της ορθής συνιστώσας.
- Ο ουδέτερος είναι η αναφορά για τις τάσεις των κυκλωμάτων ορθής και αντίστροφης συνιστώσας.
- Μεταξύ των ουδέτερων κόμβων και της γης δεν ρέουν ρεύματα ορθής και αντίστροφης συνιστώσας.
- Οι σύνθετες αντιστάσεις \bar{Z}_n στις φυσικές συνδέσεις μεταξύ του ουδέτερου και της γης δεν εμφανίζονται στα κυκλώματα ορθής και αντίστροφης συνιστώσας.

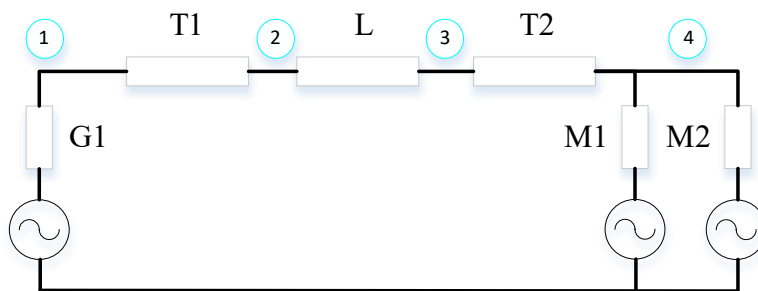
Εμφανίζονται μόνο στο κύκλωμα της ομοπολικής συνιστώσας ως σύνθετες αντιστάσεις με τιμή $3\bar{Z}_n$.

Εφαρμογή των παραπάνω βρίσκει στην ανάλυση σύνθετων δικτύων όπως στο παρακάτω παράδειγμα.

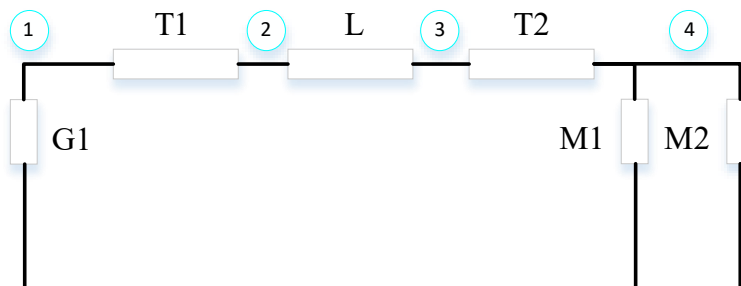
Παράδειγμα:



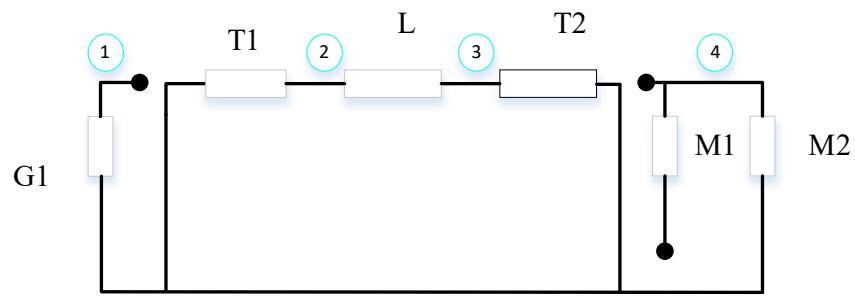
Σχήμα 2.16: Μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος.



Σχήμα 2.17: Κύκλωμα ορθής συνιστώσας.



Σχήμα 2.18: Κύκλωμα αντίστροφης συνιστώσας.



Σχήμα 2.19: Κύκλωμα ομοπολικής συνιστώσας.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΙΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΕΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται διάφορες περιπτώσεις σφαλμάτων που εμφανίζονται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με τη βοήθεια των αντίστοιχων κυκλωμάτων συμμετρικών συνιστωσών. Η επίλυση του προβλήματος στο σύστημα abc λόγω των ζεύξεων που εμφανίζονται είναι δυσχερής και πρακτικά πολλές φορές αδύνατη. Στην ανάλυση αγνοούνται οι μεταβατικές αποκρίσεις που εμφανίζονται αμέσως μετά την εκδήλωση του σφάλματος και επίσης θεωρείται ότι το ρεύμα του σφάλματος έχει ημιτονοειδή μορφή.

Η μέθοδος υπολογισμού που ακολουθείται χωρίζεται στα παρακάτω βήματα:

- Η θέση του βραχυκυκλώματος μεταφέρεται εκτός του δικτύου και καθορίζονται οι συνθήκες του σφάλματος στο σύστημα abc, δηλαδή οι σχέσεις μεταξύ των τάσεων και των εντάσεων στο σημείο του σφάλματος.
- Μετασχηματισμός των συνθηκών της προηγούμενης περίπτωση στο σύστημα συμμετρικών συνιστωσών 012 με τη σχέση (2.18).
- Σχεδίαση των κυκλωμάτων συμμετρικών συνιστωσών και απεικόνιση του σφάλματος με κατάλληλες συνδέσεις στη θέση του σφάλματος, ανάλογα με τις συνθήκες του σφάλματος.
- Υπολογισμός των τάσεων και των εντάσεων στο σύστημα 012.
- Μετασχηματισμός υπολογισμών στο αρχικό τριφασικό σύστημα abc.

Τα σφάλματα που μπορεί να εμφανιστούν σε ένα τριφασικό σύστημα είναι βραχυκυκλώματα ή διακοπή αγωγών ή συνδυασμός τους. Οι βασικότερες περιπτώσεις αναλύονται στις επόμενες ενότητες.

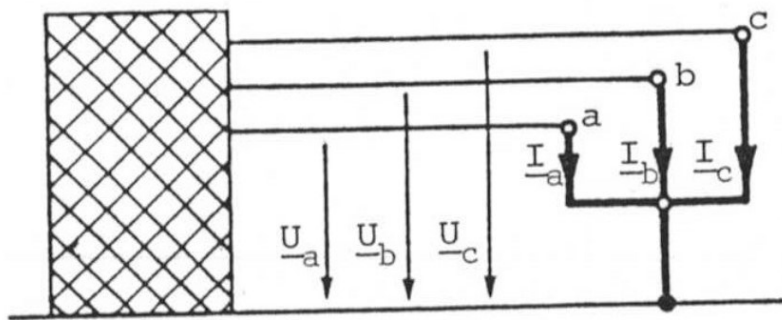
3.2 Τριπολικό βραχυκύκλωμα

Το τριπολικό βραχυκύκλωμα είναι συμμετρικό σφάλμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Επομένως η ανάλυση του μπορεί περιλαμβάνει μόνο το κύκλωμα συμμετρικών συνιστωσών. Ο τύπος αυτός του σφάλματος εμφανίζεται σπάνια, ωστόσο συνήθως προκαλεί το μέγιστο ρεύμα σφάλματος (και επομένως τη μέγιστη θερμική και μηχανική καταπόνηση). Γι' αυτό θεωρείται στους υπολογισμούς βραχυκυκλωμάτων ως το χειρότερο σενάριο. Αναλυτικότερα:

1) Προσδιορισμός συνθηκών

Από το Σχήμα 3.1 προκύπτει ότι οι συνθήκες του σφάλματος στο σύστημα abc είναι:

$$\begin{aligned}\bar{U}_a &= 0 \\ \bar{U}_b &= 0 \\ \bar{U}_c &= 0\end{aligned}\tag{3.1}$$



Σχήμα 3.1: Τριπολικό βραχυκύκλωμα με επαφή γης.

2) Συνθήκες σφάλματος στο 012

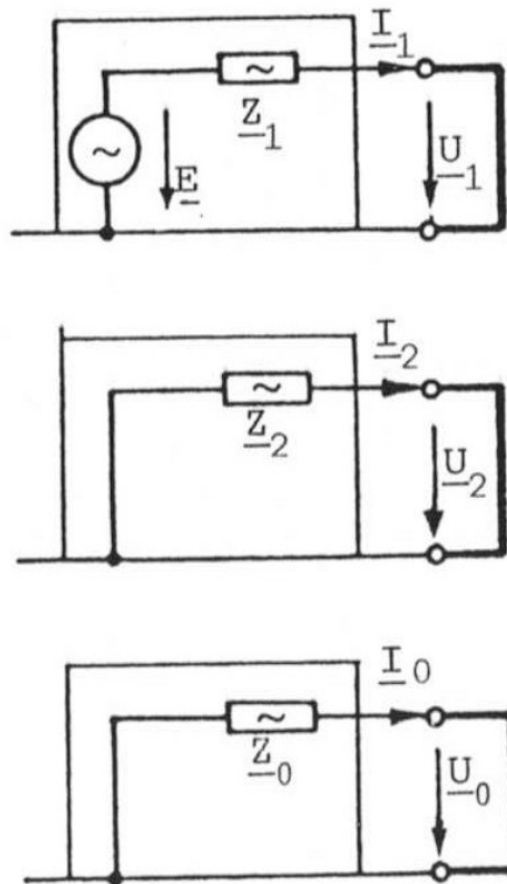
Μετασχηματίζοντας την (3.1) στο σύστημα 012 προκύπτει:

$$\begin{pmatrix} \bar{U}_0 \\ \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{cases} \bar{U}_0 = 0 \\ \bar{U}_1 = 0 \\ \bar{U}_2 = 0 \end{cases}\tag{3.2}$$

3) Κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών

Σχεδιάζονται τα κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Στη συνέχεια σχεδιάζονται οι συνδέσεις που επιβάλλουν οι συνθήκες του σφάλματος (έντονη γραμμή). Να σημειωθεί ότι στο αντίστροφο και ορθό σύστημα δεν

περιλαμβάνονται τάσεις, καθώς οι εσωτερικές τάσεις τροφοδότησης είναι συμμετρικές.



Σχήμα 3.2: Κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών για το τριπολικό βραχυκύκλωμα με επαφή γης.

4) Υπολογισμός μεγεθών στο σύστημα των συμμετρικών συνιστωσών

Από την επίλυση του κυκλώματος του Σχήματος 2.2 που πρακτικά ισοδυναμεί με την επίλυση του κυκλώματος στην ορθή συνιστώσα προκύπτει:

$$I_1 = \bar{E}_1 / \bar{Z}_1, \quad \bar{I}_2 = \bar{I}_0 = 0 \quad (3.3)$$

5) Υπολογισμός μεγεθών στο σύστημα abc

Εφαρμόζοντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό στο σύστημα abc, τα ρεύματα στις τρεις φάσεις είναι:

$$\begin{aligned}
\bar{I}_a &= \bar{I}_0 + \bar{I}_1 + \bar{I}_2 = \bar{I}_1 = \frac{\bar{E}_1}{\bar{Z}_1} \\
\bar{I}_b &= \bar{I}_0 + \bar{a}^2 \bar{I}_1 + \bar{a} \bar{I}_2 = \bar{a}^2 \bar{I}_1 = \bar{a}^2 \frac{\bar{E}_1}{\bar{Z}_1} \\
\bar{I}_c &= \bar{I}_0 + \bar{a} \bar{I}_1 + \bar{a}^2 \bar{I}_2 = \bar{a} \bar{I}_1 = \bar{a} \frac{\bar{E}_1}{\bar{Z}_1}
\end{aligned} \tag{3.4}$$

όπου E_1 η συμμετρική συνιστώσα της εσωτερικής τάσης της φάσης a (φασική τάση). Το μέτρο του ρεύματος κατά το τριπολικό βραχυκύκλωμα (δείκτης k3p) είναι:

$$I_{k3p} = |\bar{I}_a| = E_1 / Z_1 \tag{3.5}$$

Στην περίπτωση τριπολικού βραχυκυκλώματος **χωρίς επαφή γης**, οι συνθήκες σφάλματος στο σύστημα abc είναι:

$$\left. \begin{aligned}
\bar{U}_a = \bar{U}_b = \bar{U}_c \\
\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c = 0
\end{aligned} \right\} \bar{U}_1 = 0, \bar{U}_2 = 0, \bar{U}_0 = \bar{U}_a, \bar{I}_0 = 0 \tag{3.6}$$

Επομένως οι συνδέσεις του ορθού και του αντίστροφου συστήματος παραμένουν όπως στο Σχήμα 3.2 και το ομοπολικό κύκλωμα είναι ανοιχτό, καθώς σε αυτή την περίπτωση δεν εμπλέκεται η γη. Αυτό δεν έχει κάποια επίπτωση στον υπολογισμό των ρευμάτων I_1, I_2, I_a, I_b, I_c , επειδή πάλι ισχύει $I_0=0$. Γενικά, στα τριπολικά βραχυκυκλώματα δεν υπάρχει ομοπολικό ρεύμα, δηλ. δεν υπάρχει επιστροφή από τη γη.

3.3 Διπολικό βραχυκύκλωμα

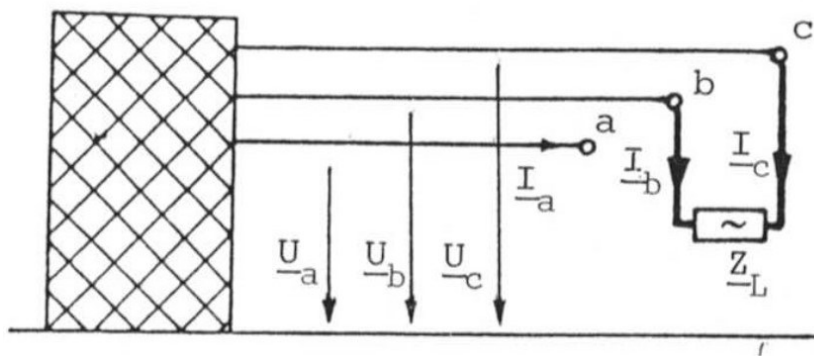
Μια άλλη κατηγορίας βραχυκυκλωμάτων είναι τα διπολικά βραχυκλώματα. Σε περίπτωση που το βραχυκύκλωμα εμφανίζεται μεταξύ δύο φάσεων μέσω μίας αντίστασης Z_L τότε το διπολικό βραχυκύκλωμα είναι χωρίς επαφή γης. Η αντίσταση Z_L σημαίνει ότι δεν υπάρχει μεταλλική επαφή μεταξύ των αγωγών, αλλά ηλεκτρικό τόξο. Εάν υπάρχει επαφή με τη γη τότε η Z_L αντιπροσωπεύει την αντίσταση μεταξύ των βραχυκυκλωμένων αγωγών και της γης. Σε αντίθεση με τα τριπολικά βραχυκυκλώματα και οι δύο κατηγορίες διπολικών βραχυκυκλωμάτων αφορούν σε ασύμμετρα βραχυκυκλώματα και εξετάζονται στη συνέχεια.

3.3.1 Διπολικό βραχυκύκλωμα χωρίς επαφή γης

1) Προσδιορισμός συνθηκών

Από το Σχήμα 3.3 προκύπτει ότι οι συνθήκες του σφάλματος στο σύστημα abc είναι:

$$\begin{aligned} \bar{I}_a &= 0 \\ \bar{I}_b + \bar{I}_c &= 0 \\ \bar{U}_b - \bar{U}_c &= \bar{Z}_L \bar{I}_b \end{aligned} \tag{3.6}$$



Σχήμα 3.3: Διπολικό βραχυκύκλωμα χωρίς επαφή γης.

2) Συνθήκες σφάλματος στο 012

Μετασχηματίζοντας τις συνθήκες του σφάλματος στο σύστημα 012 προκύπτει:

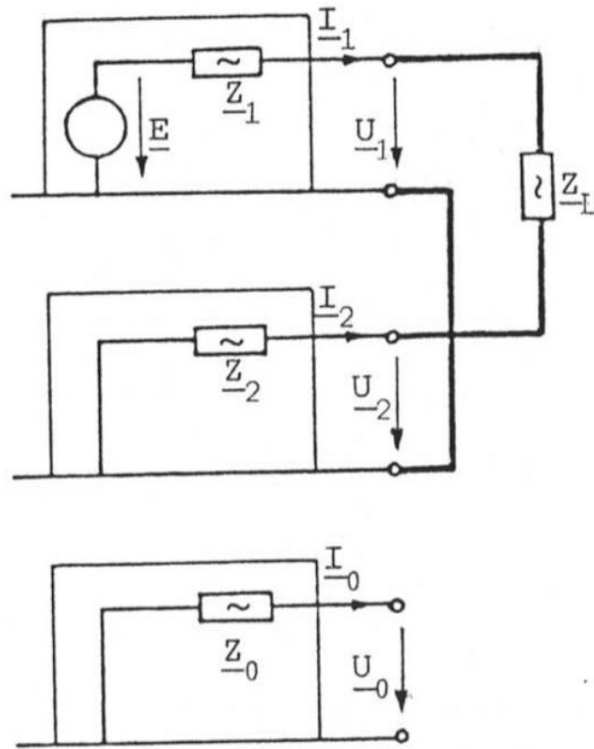
$$\mathbf{I}_{012} = \mathbf{S} \mathbf{I}_{abc} \xrightarrow{I_b=0} \bar{I}_1 + \bar{I}_2 = 0 \tag{3.7}$$

$$\mathbf{U}_{abc} = \mathbf{T} \mathbf{U}_{012} \xrightarrow{\bar{U}_b - \bar{U}_c = \bar{Z}_L \bar{I}_b} \bar{U}_1 - \bar{U}_2 = \bar{Z}_L \bar{I}_1 \tag{3.8}$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση αυτή καθώς δεν υπάρχει επιστροφή του ρεύματος μέσω της γης, ότι το ρεύμα της ομοπολικής συνιστώσας είναι μηδέν.

3) Κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών

Σχεδιάζονται τα κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4 και με έντονη γραμμή οι συνδέσεις που επιβάλλουν οι συνθήκες του σφάλματος. Το γεγονός ότι το ρεύμα της ομοπολικής συνιστώσας είναι μηδέν απεικονίζεται με ανοιχτό το κύκλωμα της αντίστοιχης συνιστώσας.



Σχήμα 3.4: Κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών για το διπολικό βραχυκύκλωμα χωρίς επαφή γης.

4) Υπολογισμός μεγεθών στο σύστημα των συμμετρικών συνιστωσών

Από την επίλυση των κυκλωμάτων του Σχήματος 3.4 προκύπτει:

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_L}, \quad \bar{I}_2 = -\bar{I}_1, \quad \bar{I}_0 = 0 \quad (3.9)$$

και

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= \bar{E} - \bar{I}_1 \bar{Z}_1 = \bar{E} \frac{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_L}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_L} \\ \bar{U}_2 &= -\bar{I}_2 \bar{Z}_2 = \bar{E} \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_L} \\ \bar{U}_0 &= -\bar{I}_0 \bar{Z}_0 = 0 \end{aligned} \quad (3.10)$$

5) Υπολογισμός μεγεθών στο σύστημα abc

Εφαρμόζοντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό στο σύστημα abc, τα ρεύματα και οι τάσεις στις τρεις φάσεις είναι αντίστοιχα:

$$\mathbf{I}_{abc} = \mathbf{T}\mathbf{I}_{012} \longrightarrow \begin{cases} \bar{I}_a = 0 \rightarrow 1^{\text{η}} \text{ συνθήκη} \\ \bar{I}_b = -j\sqrt{3} \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_L} \rightarrow 2^{\text{η}} \text{ συνθήκη} \\ \bar{I}_b = -\bar{I}_c \rightarrow 2^{\text{η}} \text{ συνθήκη} \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\mathbf{U}_{abc} = \mathbf{T}\mathbf{U}_{012} \longrightarrow \begin{cases} \bar{U}_a = \bar{E} \frac{2\bar{Z}_2 + \bar{Z}_L}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_L} \\ \bar{U}_b = \bar{E} \frac{-\bar{Z}_2 + \bar{a}^2\bar{Z}_L}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_L} \\ \bar{U}_c = \bar{E} \frac{-\bar{Z}_2 + \bar{a}\bar{Z}_L}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_L} \end{cases} \quad (3.12)$$

Από την (3.11) φαίνεται απευθείας ότι επαληθεύονται οι αρχικές συνθήκες του σφάλματος όσον αφορά τα μεγέθη των ρευμάτων. Το ίδιο προκύπτει και για τις τάσεις αφαιρώντας τις τάσεις των φάσεων b και c :

$$\bar{U}_b - \bar{U}_c = \bar{Z}_L \bar{I}_b \quad (3.13)$$

Το μέτρο του ρεύματος κατά το διπολικό βραχυκύκλωμα (δείκτης $k2p$) είναι:

$$I_{k2p} = |\bar{I}_b| = \sqrt{3} \frac{E}{|\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2|} = \sqrt{3} \frac{|\bar{Z}_1|}{|\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2|} I_{k3p} \quad (3.14)$$

Στην περίπτωση σφαλμάτων **μακριά από γεννήτριες** ισχύει ότι $\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2$. Οπότε η (3.14) απλοποιείται στην (3.15) και φαίνεται ότι το ρεύμα στο **τριπολικό βραχυκύκλωμα** είναι **μεγαλύτερο από ότι στο διπολικό**:

$$I_{k2p} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{k3p} \quad (3.15)$$

Επίσης, για τυχαία \bar{Z}_L προκύπτει από την (3.12) ότι:

$$\bar{U}_a = \bar{E} \quad (3.16)$$

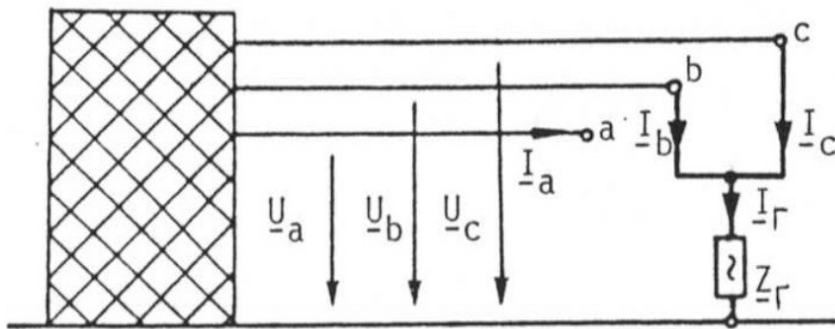
Αυτό σημαίνει ότι κατά το **διπολικό βραχυκύκλωμα μακριά από γεννήτριες** δεν μεταβάλλεται η τάση του υγιούς αγωγού και είναι ίση με την ονομαστική, επομένως **δεν εμφανίζονται υπερτάσεις**.

3.3.2 Διπολικό βραχυκύκλωμα με επαφή γης

1) Προσδιορισμός συνθηκών

Οι συνθήκες του σφάλματος στο σύστημα abc όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.4 είναι:

$$\begin{aligned} \bar{I}_0 &= 0 \\ \bar{U}_b &= \bar{U}_c \\ \bar{I}_b + \bar{I}_c &= \bar{I}_r = \frac{\bar{U}_b}{\bar{Z}_r} \end{aligned} \quad (3.17)$$



Σχήμα 3.5: Διπολικό βραχυκύκλωμα με επαφή γης.

2) Συνθήκες σφάλματος στο 012

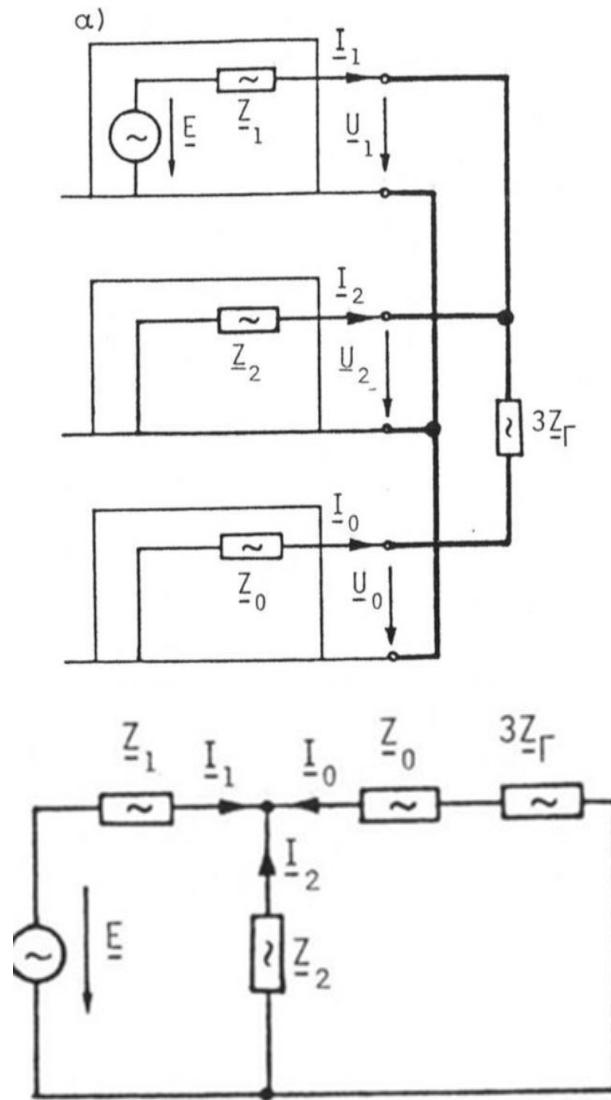
Μετασχηματίζοντας τις συνθήκες του σφάλματος στο σύστημα 012 προκύπτει:

$$\mathbf{I}_{012} = \mathbf{S} \mathbf{I}_{abc} \xrightarrow[\substack{I_a=0 \\ I_r=3I_0}]{\substack{I_a=0 \\ I_r=3I_0}} \bar{I}_0 + \bar{I}_1 + \bar{I}_2 = 0 \quad (3.18)$$

$$\mathbf{U}_{abc} = \mathbf{T} \mathbf{U}_{012} \xrightarrow{\bar{U}_b = \bar{U}_c} \begin{aligned} \bar{U}_1 &= \bar{U}_2 \\ \bar{U}_0 - \bar{U}_1 - \bar{I}_0 3\bar{Z}_r &= 0 \end{aligned} \quad (3.19)$$

3) Κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών

Σχεδιάζονται τα κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών στο Σχήμα 3.6(α) και το ισοδύναμο κύκλωμα στο Σχήμα 3.6(β).



Σχήμα 3.6: Κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών για το διπολικό βραχυκύκλωμα με επαφή γης.

4) Υπολογισμός μεγεθών στο σύστημα των συμμετρικών συνιστωσών

Από την επίλυση των κυκλωμάτων του Σχήματος 2.6 προκύπτει:

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{E}(\bar{Z}_0 + \bar{Z}_2 + 3\bar{Z}_r)}{\underbrace{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + \bar{Z}_1(\bar{Z}_0 + 3\bar{Z}_r) + \bar{Z}_2(\bar{Z}_0 + 3\bar{Z}_r)}_n}$$

$$\bar{I}_2 = -\frac{\bar{E}(\bar{Z}_0 + 3\bar{Z}_r)}{n}$$

$$\bar{I}_0 = -\frac{\bar{E}\bar{Z}_2}{n}$$

(3.20)

και

$$\begin{aligned}
 \bar{U}_1 &= \bar{E} - \bar{I}_1 \bar{Z}_1 = \bar{E} \frac{\bar{Z}_2 (\bar{Z}_0 + 3\bar{Z}_r)}{\Pi} \\
 \bar{U}_2 &= -\bar{I}_2 \bar{Z}_2 = \bar{U}_1 \\
 \bar{U}_0 &= -\bar{I}_0 \bar{Z}_0 = \bar{E} \frac{\bar{Z}_0 \bar{Z}_2}{\Pi}
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

5) Υπολογισμός μεγεθών στο σύστημα abc

Εφαρμόζοντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό στο σύστημα abc, τα ρεύματα και οι τάσεις στις τρεις φάσεις είναι αντίστοιχα:

$$\mathbf{I}_{abc} = \mathbf{T}\mathbf{I}_{012} \longrightarrow \begin{cases} \bar{I}_a = 0 \\ \bar{I}_b = -j\sqrt{3}\bar{E} \frac{\bar{Z}_0 + 3\bar{Z}_r - \bar{a}\bar{Z}_2}{\Pi} \\ \bar{I}_c = j\sqrt{3}\bar{E} \frac{\bar{Z}_0 + 3\bar{Z}_r - \bar{a}^2\bar{Z}_2}{\Pi} \end{cases} \tag{3.22}$$

Η πρώτη εξίσωση της (2.21) αντιστοιχεί στην 1^η θεώρηση των αρχικών συνθηκών, ενώ η 3^η θεώρηση προκύπτει από την δεύτερη και την τρίτη εξίσωση:

$$\bar{I}_b + \bar{I}_c = \frac{\bar{U}_b}{\bar{Z}_r} \tag{2.23}$$

Για τις τάσεις ισχύει:

$$\mathbf{U}_{abc} = \mathbf{T}\mathbf{U}_{012} \longrightarrow \begin{cases} \bar{U}_a = \bar{E} \frac{\bar{Z}_2 (\bar{Z}_0 + 2\bar{Z}_r)}{\Pi} \\ \bar{U}_b = \bar{E} \frac{\bar{Z}_2 \bar{Z}_r}{\Pi} \\ \bar{U}_c = \bar{U}_b \end{cases} \tag{2.24}$$

Για την περίπτωση **μεταλλικού βραχυκυκλώματος** όπου $\bar{Z}_l = 0$, οι (3.20) – (3.21) γράφονται:

$$\begin{aligned}
 \bar{I}_1 &= \frac{\bar{E} (\bar{Z}_0 + \bar{Z}_2)}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 \bar{Z}_1 + \bar{Z}_0 \bar{Z}_2} \\
 \bar{I}_2 &= -\frac{\bar{E} \bar{Z}_0}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 \bar{Z}_1 + \bar{Z}_0 \bar{Z}_2} \\
 \bar{I}_0 &= -\frac{\bar{E} \bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 \bar{Z}_1 + \bar{Z}_0 \bar{Z}_2}
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

και

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2 = \bar{U}_0 = \bar{E} \frac{\bar{Z}_0 \bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 \bar{Z}_1 + \bar{Z}_0 \bar{Z}_2} \quad (3.26)$$

και οι (3.21) – (3.23):

$$\begin{aligned} \bar{I}_a &= 0 \\ \bar{I}_b &= -j\sqrt{3}\bar{E} \frac{\bar{Z}_0 - \bar{a}\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 \bar{Z}_1 + \bar{Z}_0 \bar{Z}_2} \\ \bar{I}_c &= j\sqrt{3}\bar{E} \frac{\bar{Z}_0 - \bar{a}^2 \bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 \bar{Z}_1 + \bar{Z}_0 \bar{Z}_2} \end{aligned} \quad (3.27)$$

και

$$\begin{aligned} \bar{U}_a &= \bar{E} \frac{\bar{Z}_0 \bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 \bar{Z}_1 + \bar{Z}_0 \bar{Z}_2} \\ \bar{U}_b &= \bar{U}_c = 0 \end{aligned} \quad (3.28)$$

και τέλος το ρεύμα προς τη γη είναι:

$$\bar{I}_r = \bar{I}_b + \bar{I}_c = \frac{3\bar{E}\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 \bar{Z}_1 + \bar{Z}_0 \bar{Z}_2} \quad (3.29)$$

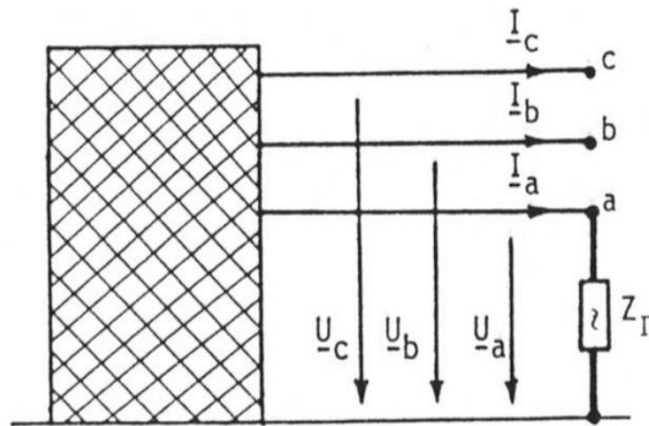
3.3.3 Μονοπολικό βραχυκύκλωμα

Το μονοπολικό βραχυκύκλωμα εμφανίζεται ως σύνδεση μιας φάσης με τη γη μέσω μιας σύνθετης σύνθετης αντίστασης χαμηλής τιμής. Τέτοιου είδους σφάλματα είναι η πτώση στη γη ενός αγωγού μιας εναέριας γραμμής ή η πτώση ενός δέντρου σε έναν από τους αγωγούς μια τριφασικής εναέριας γραμμής κτλ. Η κατηγορία αυτή σφαλμάτων είναι η πιο συνηθισμένη στα δίκτυα μεταφοράς για παράδειγμα σε δίκτυα με επίπεδα τάσης άνω των 130 kV το 80 % των σφαλμάτων αντιστοιχούν σε μονοπολικά βραχυκυκλώματα. Ανάλογα με τις συνθήκες η αντίσταση του σφάλματος μπορεί να διαφέρει σημαντικά.

1) Προσδιορισμός συνθηκών

Από το Σχήμα 3.7 προκύπτει ότι οι συνθήκες του σφάλματος στο σύστημα abc είναι:

$$\begin{aligned} \bar{U}_a &= \bar{Z}_r \bar{I}_a \\ \bar{I}_b &= 0 \\ \bar{I}_c &= 0 \end{aligned} \quad (3.30)$$



Σχήμα 3.7: Διπολικό βραχυκύκλωμα χωρίς επαφή γης.

2) Συνθήκες σφάλματος στο 012

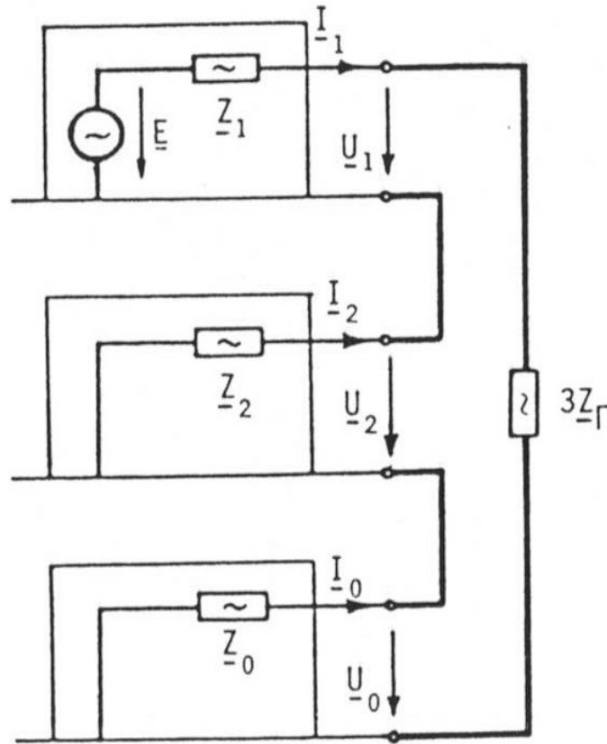
Μετασχηματίζοντας τις συνθήκες του σφάλματος στο σύστημα 012 προκύπτει:

$$\mathbf{I}_{012} = \mathbf{S} \mathbf{I}_{abc} \xrightarrow{\bar{I}_b = 3\bar{I}_0} \left. \begin{array}{l} \bar{I}_1 = \bar{I}_2 \\ \bar{I}_1 = \bar{I}_0 \end{array} \right\} \bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \bar{I}_0 = \frac{\bar{I}_a}{3} \quad (3.31)$$

$$\mathbf{U}_{abc} = \mathbf{T} \mathbf{U}_{012} \xrightarrow{\bar{U}_b = \bar{U}_0} \bar{U}_0 + \bar{U}_1 + \bar{U}_2 = 3\bar{Z}_\Gamma \bar{I}_0 \quad (3.32)$$

3) Κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών

Σχεδιάζονται τα κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8 και με έντονη γραμμή οι συνδέσεις που επιβάλλουν οι συνθήκες του σφάλματος. Το γεγονός ότι το ρεύμα της ομοπολικής συνιστώσας είναι μηδέν απεικονίζεται με ανοιχτό το κύκλωμα της αντίστοιχης συνιστώσας.



Σχήμα 3.8: Κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών για το μονοπολικό βραχυκύκλωμα.

4) Υπολογισμός μεγεθών στο σύστημα των συμμετρικών συνιστωσών

Από την επίλυση των κυκλωμάτων του Σχήματος 3.4 προκύπτει:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \bar{I}_0 = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_0 + \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_r} \quad (3.33)$$

και

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= \bar{E} - \bar{I}_1 \bar{Z}_1 = \bar{E} \frac{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 + 3\bar{Z}_r}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 + 3\bar{Z}_r} \\ \bar{U}_2 &= -\bar{I}_2 \bar{Z}_2 = -\bar{E} \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 + 3\bar{Z}_r} \\ \bar{U}_0 &= -\bar{I}_0 \bar{Z}_0 = -\bar{E} \frac{\bar{Z}_0}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 + 3\bar{Z}_r} \end{aligned} \quad (2.34)$$

5) Υπολογισμός μεγεθών στο σύστημα abc

Εφαρμόζοντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό στο σύστημα abc, τα ρεύματα και οι τάσεις στις τρεις φάσεις είναι αντίστοιχα:

$$\mathbf{I}_{abc} = \mathbf{T}\mathbf{I}_{012} \longrightarrow \begin{cases} \bar{I}_a = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_0 \\ \bar{I}_b = 0 \\ \bar{I}_c = 0 \end{cases} \quad (3.35)$$

$$\mathbf{U}_{abc} = \mathbf{T}\mathbf{U}_{012} \longrightarrow \begin{cases} \bar{U}_a = \bar{Z}_r \bar{I}_a \\ \bar{U}_b = \bar{E} \frac{3\bar{a}^2 \bar{Z}_r - j\sqrt{3}(\bar{Z}_2 - \bar{a}\bar{Z}_0)}{\bar{Z}_0 + \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + 3\bar{Z}_r} \\ \bar{U}_c = \bar{E} \frac{3\bar{a} \bar{Z}_r + j\sqrt{3}(\bar{Z}_2 - \bar{a}^2 \bar{Z}_0)}{\bar{Z}_0 + \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + 3\bar{Z}_r} \end{cases} \quad (3.36)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις επαληθεύουν τις συνθήκες του σφάλματος. Οι (3.28) – (3.31) απλοποιούνται για την περίπτωση **μεταλλικού βραχυκυκλώματος** $\bar{Z}_r = 0$ στις:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \bar{I}_0 = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_0 + \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} \quad (3.37)$$

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= \bar{E} - \bar{I}_1 \bar{Z}_1 = \bar{E} \frac{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_0}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} \\ \bar{U}_2 &= -\bar{I}_2 \bar{Z}_2 = -\bar{E} \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} \\ \bar{U}_0 &= -\bar{I}_0 \bar{Z}_0 = -\bar{E} \frac{\bar{Z}_0}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} \end{aligned} \quad (3.38)$$

και

$$\bar{I} = \frac{3\bar{E}}{\bar{Z}_0 + \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} \quad (3.39)$$

$$\begin{aligned} \bar{U}_a &= 0 \\ \bar{U}_b &= \bar{E} \frac{-j\sqrt{3}(\bar{Z}_2 - \bar{a}\bar{Z}_0)}{\bar{Z}_0 + \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} \\ \bar{U}_c &= \bar{E} \frac{j\sqrt{3}(\bar{Z}_2 - \bar{a}^2 \bar{Z}_0)}{\bar{Z}_0 + \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} \end{aligned} \quad (3.40)$$

Το ρεύμα βραχυκυκλώσεως για μεταλλικό βραχυκύκλωμα γράφεται:

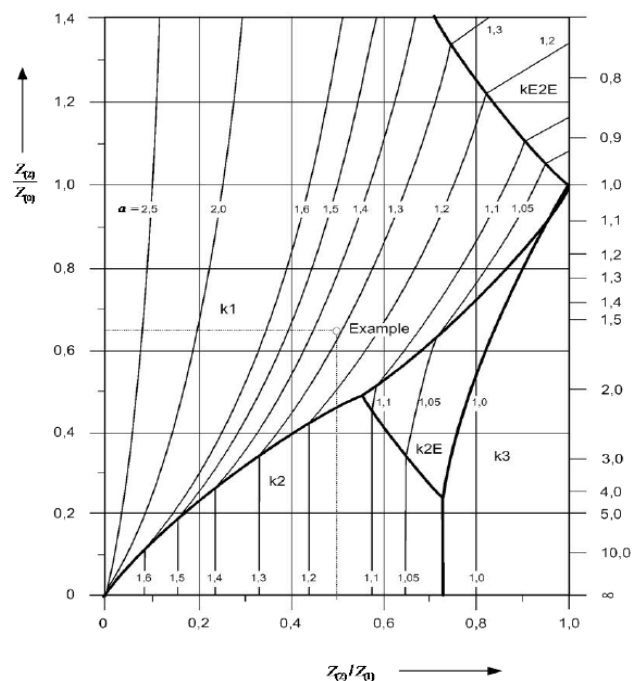
$$I_{k1p} = \frac{3|\bar{Z}_1|}{|\bar{Z}_0 + \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2|} I_{k3p} \quad (3.41)$$

Και ειδικά για την περίπτωση σφαλμάτων **μακριά από γεννήτριες** όπου ισχύει $\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2$:

$$I_{k1p} = \frac{3|\bar{Z}_1|}{|\bar{Z}_0 + 2\bar{Z}_1|} I_{k3p} \quad (3.42)$$

3.3.4 Σύνοψη

Ο τύπος του βραχυκυκλώματος που οδηγεί στη μεγαλύτερη τιμή ρεύματος βραχυκυκλώματος εξαρτάται από τις τιμές της σύνθετης αντίστασης της ορθής, της αντίστροφης, και της ομοπολικής συνιστώσας του δικτύου. Η επίδρασή τους φαίνεται στο Σχήμα 3.9 για την περίπτωση που οι \bar{Z}_1 , \bar{Z}_2 και \bar{Z}_0 έχουν την ίδια γωνία και το Σχήμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί υπολογισμών. Για τη συνήθη περίπτωση όπου η \bar{Z}_0 είναι μεγαλύτερη από $\bar{Z}_2 = \bar{Z}_1$, το μέγιστο αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως εμφανίζεται στην περίπτωση του τριπολικού βραχυκυκλώματος. Ωστόσο, για σφάλματα κοντά σε μετασχηματιστές με $\bar{Z}_0 < \bar{Z}_1$, το μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώσεως καταγράφεται για την περίπτωση διπολικού βραχυκυκλώματος με επαφή γης.



Σχήμα 3.9: Διπολικό βραχυκύκλωμα χωρίς επαφή γης.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΙΕC 60909

4.1 Εισαγωγή

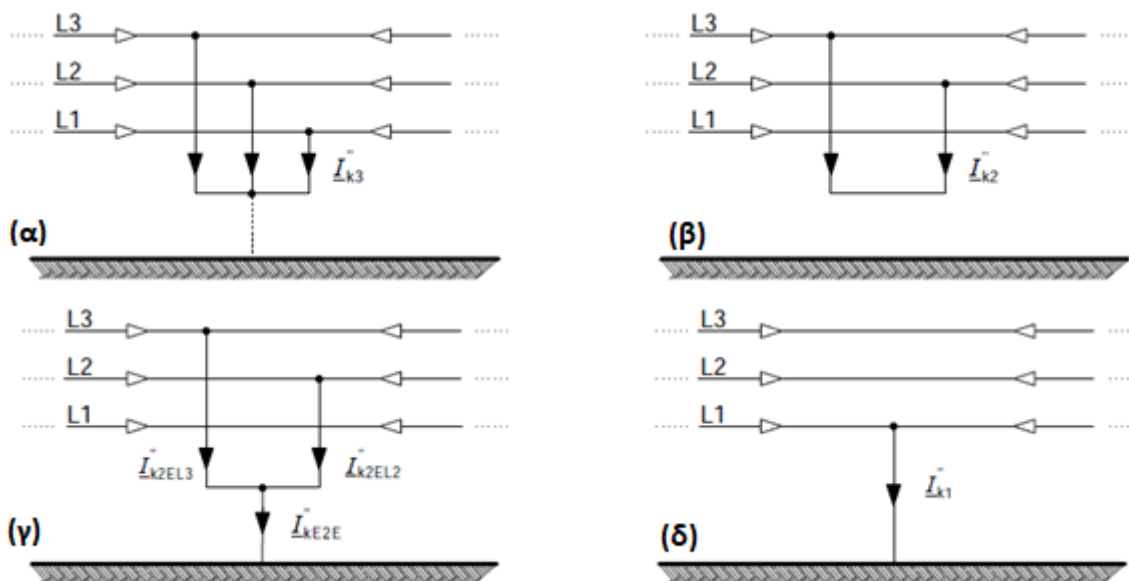
Τα βραχυκυκλώματα παρουσιάζουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Διάρκεια: αποσβενύμενα, παροδικά ή μόνιμα.
- Προέλευση
 - Μηχανική (σπάσιμο αγωγού ή μονωτήρα, τυχαία επαφή αγωγών με ξένο σώμα, μηχανική προσβολή κλπ.). Οι βλάβες σε καλώδια είναι συνήθως λόγω μηχανικών επεμβάσεων.
 - Υπέρταση εσωτερική ή εξωτερική (ατμοσφαιρική). Σφάλματα λόγω ατμοσφαιρικών υπερτάσεων εκδηλώνονται συνήθως σε εναέριες γραμμές Υψηλής Τάσης (ΥΤ). Επίσης, σε εναέριες γραμμές ΥΤ εμφανίζονται και λόγω υπερπηδήσεων και ρύπανσης των μονωτήρων, γεγονός το οποίο παρατηρείται και στις εναέριες γραμμές μέσης τάσης (ΜΤ). Στο δίκτυο μεταφοράς στατιστικά εμφανίζονται 5 σφάλματα ανά 100 km το έτος, ενώ στο δίκτυο διανομής (πρωτεύον και δευτερεύον) εμφανίζονται 15 σφάλματα ανά 100 km το έτος.
 - Εκφυλισμός μόνωσης λόγω θερμοκρασίας, υγρασίας ή γήρανσης
- Θέση βραχυκυκλώματος
 - Εσωτερικό.
 - Εξωτερικό

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζονται οι σημαντικότεροι τύποι βραχυκυκλωμάτων. Πιο συγκεκριμένα:

- Τριπολικό βραχυκύκλωμα (Σχήμα 4.1α). Πρόκειται για συμμετρικό σφάλμα, επομένως τα ρεύματα δεν επηρεάζονται από την ενδεχόμενη επαφή προς γη, η οποία συμβολίζεται με διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα.
- Διπολικό βραχυκύκλωμα χωρίς επαφή γης (Σχήμα 4.1β)
- Διπολικό βραχυκύκλωμα με επαφή γης (Σχήμα 4.1γ)
- Μονοπολικό βραχυκύκλωμα (Σχήμα 4.1δ). Προκαλεί μεγάλα ρεύματα βραχυκυκλώσεως στην περίπτωση στερεά γειωμένων ουδετέρων κόμβων των δικτύων. Σε περίπτωση γειώσεως κόμβων μέσω πηνίου Petersen ή μέσω μεγάλων αντιστάσεων ή μη γειωμένων κόμβων τα ρεύματα βραχυκυκλώσεως είναι μικρά. Ρέουν μόνο χωρητικά ρεύματα προς γη.

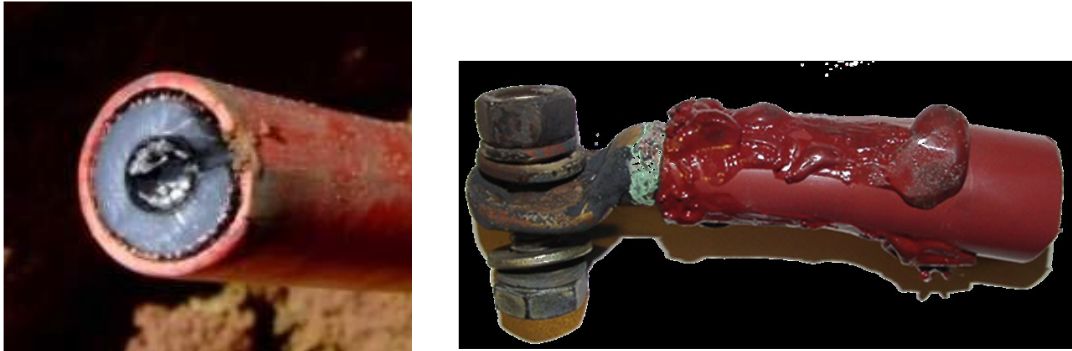
Από το σύνολο των βραχυκυκλωμάτων που εμφανίζονται σε ένα δίκτυο, το 80 % αφορά σε μονοπολικά βραχυκυκλώματα, το 15 % σε διπολικά και μόλις το 5 % σε τριπολικά.



Σχήμα 4.1: Τύπου βραχυκυκλωμάτων: α) τριπολικό βραχυκύκλωμα, β) διπολικό βραχυκύκλωμα χωρίς επαφή γης, γ) διπολικό βραχυκύκλωμα με επαφή γης, δ) μονοπολικό βραχυκύκλωμα

Η σημασία της ανάλυσης των βραχυκυκλωμάτων στα ΣΗΕ έγκειται στη σημασία των συνεπειών που μπορούν να προκαλέσουν. Ειδικότερα, στο **σημείο του βραχυκυκλώματος** δημιουργείται ηλεκτρικό τόξο και λόγω της εκλυόμενης θερμότητας μπορεί να προκληθεί καταστροφή της μόνωσης, τήξη των αγωγών, φωτιά και ενδεχομένως κίνδυνος της ζωής. Γενικότερα, **στο κύκλωμα στο οποίο εκδηλώνεται το σφάλμα** αναπτύσσονται ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις που μπορεί να προκαλέσουν

παραμόρφωση ή και θραύση σε μπάρες ή και αποκόλληση καλωδίων, αύξηση της θερμοκρασίας με κίνδυνο καταστροφής της μόνωσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2. Τέλος, εξαιτίας της ανάπτυξης ρευμάτων μεγάλης τιμής, αλλά και λόγω της μεταβατικής απόκρισης που παρουσιάζουν μπορεί να εμφανιστούν σε **γειτονικά κυκλώματα** βυθίσεις τάσης, απόζευξη κυκλωμάτων, δυναμική αστάθεια ή και απώλεια συγχρονισμού καθώς και διαταραχές σε κυκλώματα ελέγχου, ηλεκτρονικά κλπ.



Σχήμα 4.2: Παράδειγμα καταστροφής μόνωσης από βραχυκύκλωμα.

Για τον υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκυκλώσεως έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι, οι οποίες γενικά μπορούν κατηγοριοποιηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες:

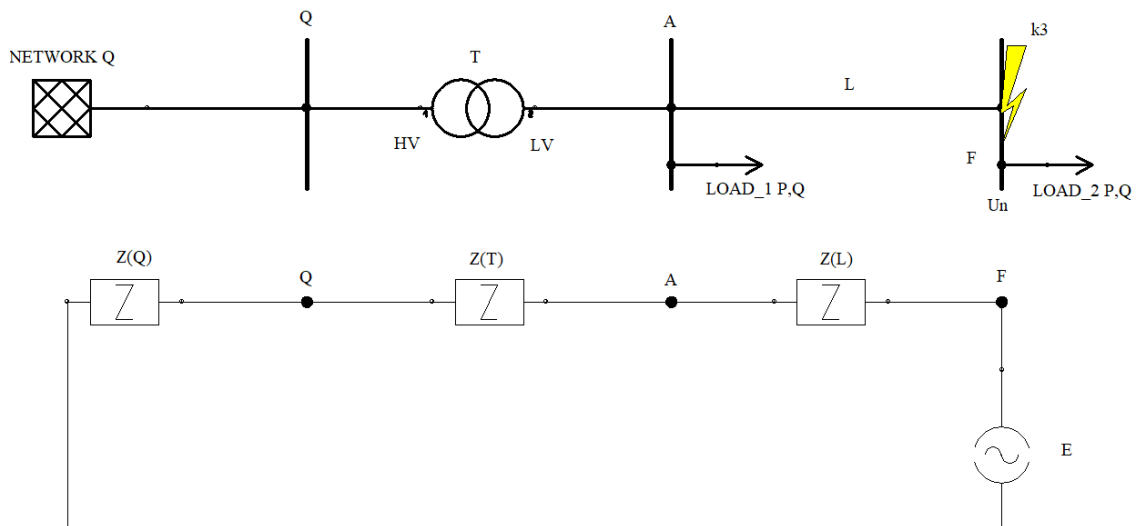
- Επίλυση κυκλώματος στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας, πχ. με ανάλυση σε κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών, υπολογισμός με τη μέθοδο της υπέρθεσης.
- Οδηγίες και υπολογισμοί με βάση πρότυπα εκ των οποίων τα πιο γνωστά είναι το International Electrotechnical Commission (IEC) 60909, το ANSI IEEE C37.5 στις Ηνωμένες Πολιτείες και το G7/4 στο Ηνωμένο Βασίλειο.
- Δυναμικός υπολογισμός με επίλυση διαφορικών εξισώσεων (πχ EMTP, NEPLAN), οπότε προκύπτουν στιγμιαίες τιμές.

Ειδική αναφορά γίνεται για τη μέθοδο της υπέρθεσης, καθώς αποτελεί και τη βάση για την ανάπτυξη της μεθόδου της ισοδύναμη πηγή τάσης στο σημείο του σφάλματος την οποία χρησιμοποιεί το πρότυπο IEC 60909. Η μέθοδος της υπέρθεσης υλοποιείται ακολουθώντας τα εξής βήματα:

- **Βήμα 1:** Πραγματοποιείται αρχικός υπολογισμός της κατάστασης του κυκλώματος πριν την εμφάνιση του σφάλματος, επιλύοντας το πρόβλημα ροής ισχύος.

- **Βήμα 2:** Βραχυκυκλώνονται όλες οι πηγές και εισάγεται στο σημείο του σφάλματος πηγή τάσης ίσης με το αντίθετο της τάσης που προέκυψε από το προηγούμενο βήμα.
- **Βήμα 3:** Από την υπέρθεση των καταστάσεων των δύο προηγούμενων βημάτων προκύπτουν οι καταστάσεις του κυκλώματος μετά την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος.

Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται ένα απλό παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου της υπέρθεσης στη θέση του βραχυκυκλώματος F . Η μέθοδος της υπέρθεσης παρέχει πολύ ακριβή υπολογισμούς των ρευμάτων βραχυκυκλώσεως. Ωστόσο, η ακρίβεια της μεθόδου εξαρτάται από τον ακριβή προσδιορισμό της τάσης στο σημείο του βραχυκυκλώματος, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από τη συνεχώς μεταβαλλόμενη φόρτιση του συστήματος. Επομένως, για τον υπολογισμό του μεγίστου ρεύματος βραχυκυκλώσεως θα πρέπει να γίνει ανάλυση της δυσμενέστερης περίπτωσης, η οποία οδηγεί στο μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώσεως. Η ανάλυση αυτή μπορεί να καταστεί ιδιαίτερη δυσχερής και μη πρακτική αν πρόκειται να εξεταστεί ένας μεγάλος αριθμός κόμβων του συστήματος. Θα πρέπει να σημειωθεί ακόμα ότι κατά τη φάση σχεδιασμού ενός συστήματος η μελλοντική κατάσταση λειτουργίας του δεν μπορεί να είναι πλήρως γνωστή, με αποτέλεσμα με τη μέθοδο αυτή να εισάγεται σημαντική ασάφεια στους υπολογισμούς.



Σχήμα 4.3: Απλό παράδειγμα μίας ισοδύναμη πηγής τάσης στη θέση του βραχυκυκλώματος F .

4.2 Μεταβατική απόκριση ρεύματος βραχυκυκλώματος

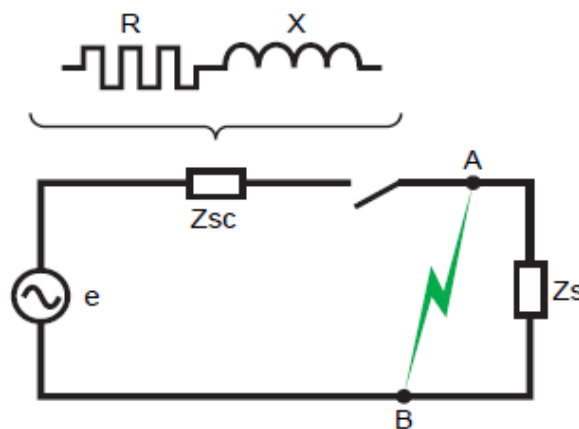
Μια απλοποιημένη αναπαράσταση δικτύου ισχύος φαίνεται στο Σχήμα 4.4 και αποτελείται από μια πηγή AC, έναν διακόπτη, τη σύνθετη αντίσταση Z_{sc} (ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση όλων των στοιχείων ανάντη του διακόπτη) και τη σύνθετη αντίσταση του φορτίου Z_s . Πριν την εκδήλωση του σφάλματος, ο διακόπτης είναι κλειστός και ένα ρεύμα I_s (design current) ρέει στο κύκλωμα τροφοδοτώντας το φορτίο. Κατά την εκδήλωση του σφάλματος, θεωρώντας αμελητέα αντίσταση σφάλματος μεταξύ των σημείων A και B, εμφανίζεται ένα πολύ μεγάλο ρεύμα, καθώς αυτό περιορίζεται μόνο από τη σύνθετη αντίσταση Z_{sc} . Το μεταβατικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως I_{sc} εξαρτάται από την τιμή της επαγωγικής αντίδρασης X και της αντίστασης R της σύνθετης αντίστασης:

$$Z_{sc} = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (4.1)$$

όπου:

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (4.2)$$

Στα δίκτυα μεταφοράς και τα πρωτεύοντα δίκτυα διανομής, το φανταστικό μέρος της Z_{sc} είναι μεγαλύτερο του πραγματικού μέρους (συνήθως ο λόγος R/X λαμβάνει τιμές μεταξύ 0,1 και 0,3). Με βάση την (4.2), για μικρές τιμές του R/X ισχύει $\cos \varphi \approx R/X$.



Σχήμα 4.4: Ισοδύναμο κύκλωμα δικτύου

Η μεταβατική απόκριση του ρεύματος βραχυκυκλώσεως διαφέρει ανάλογα με την απόσταση μεταξύ του βραχυκυκλώματος και της γεννήτριας. Η απόσταση αυτή δεν είναι απαραίτητα συνώνυμη της φυσικής απόστασης, αλλά αναφέρεται στην τιμή της

σύνθετης αντίστασης της γεννήτριας σε σύγκριση με τη σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος μεταξύ της γεννήτριας και του βραχυκυκλώματος.

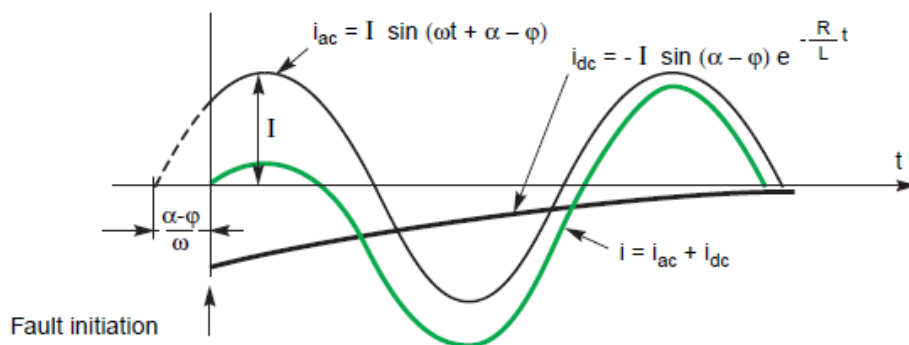
4.2.1 Σφάλματα μακριά από γεννήτρια

Η περίπτωση τους σφάλματος μακριά από γεννήτρια είναι η πιο συνηθισμένη και αναφέρεται σε περιπτώσεις που η σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας είναι αρκετά μικρότερη αυτής που παρεμβάλλεται μεταξύ της γεννήτριας και του βραχυκυκλώματος. Η μεταβατική απόκριση του ρεύματος βραχυκυκλώσεως μπορεί να αναλυθεί θεωρώντας ένα παρόμοιο πρόβλημα κατά το οποίο εφαρμόζεται μια πηγή τάσης με ΗΕΔ E και μορφή όπως στην (4.3), σε ένα κύκλωμα RL τη χρονική στιγμή $t=0$, θεωρώντας το ρεύμα I_s πριν το κλείσιμο του διακόπτη ίσο με το μηδέν.

$$e = E\sqrt{2} \sin(\omega t + \alpha). \quad (4.3)$$

Το ρεύμα $i(t)$ προκύπτει ως το άθροισμα της εναλλασσόμενης και της συνεχούς συνιστώσας:

$$i(t) = i_{ac}(t) + i_{dc}(t). \quad (4.4)$$



Σχήμα 4.5: Ανάλυση του ρεύματος βραχυκυκλώσεως για την περίπτωση σφάλματος μακριά από γεννήτριες.

Οι επιμέρους όροι του ρεύματος βραχυκυκλώσεως στο Σχήμα 4.5 αναλύονται ως εξής:

Εναλλασσόμενη συνιστώσα

Η εναλλασσόμενη συνιστώσα του ρεύματος $i_{ac}(t)$ περιγράφεται από την (4.5). Είναι ένας όρος που μεταβάλλεται ημιτονοειδώς, παρουσιάζοντας μια μετατόπιση φ στη γωνία ως προς την εφαρμοζόμενη τάση. Ο όρος αυτός είναι η τιμή του $i(t)$ στη μόνιμη κατάσταση.

$$i_{ac}(t) = I\sqrt{2} \sin(\omega t + \alpha - \varphi). \quad (4.5)$$

όπου:

$$I = E/Z_{sc}$$

α : η γωνία κατά την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος και της μηδενικής τάσης

Συνεχής συνιστώσα

Η συνεχής συνιστώσα του ρεύματος $i_{dc}(t)$ περιγράφεται από την (4.6). Είναι ένας όρος μη περιοδικός, ο οποίος παρουσιάζει μέγιστη τιμή $\sqrt{2}E/Z_{sc} \sin(\alpha - \varphi)$ τη χρονική στιγμή $t=0$ και φθίνει εκθετικά με τον χρόνο, προκαλώντας με τον τρόπο αυτό την ασυμμετρία στη μορφή του $i(t)$ στους πρώτους κύκλους της μεταβατικής απόκρισης μέχρι να αποσβεστεί πλήρως υπό τη μορφή ωμικών απωλειών I^2R στο κύκλωμα.

$$i_{dc}(t) = -I\sqrt{2} \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (4.6)$$

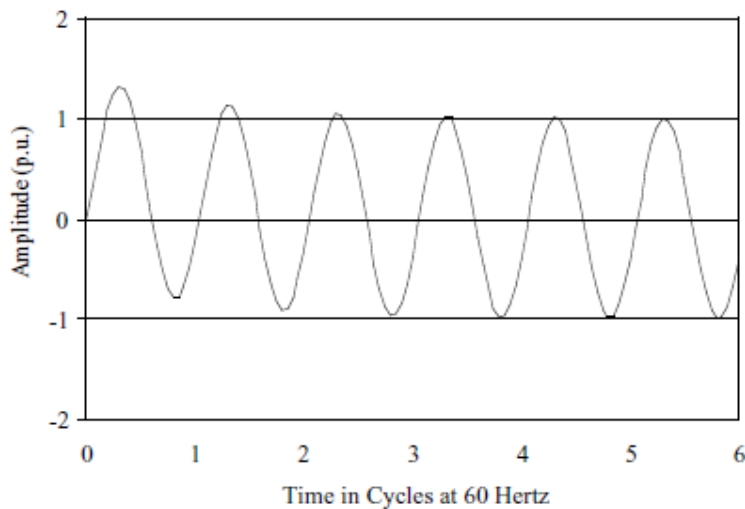
Όσον αφορά την αρχική τιμή της συνεχούς συνιστώσας, αυτή εξαρτάται από τη γωνία α , ενώ η σταθερά απόσβεσης είναι ανάλογη του λόγου R/L . όσο μικρότερη τιμή λαμβάνει ο λόγος R/L , τόσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια της απόσβεσης της μεταβατικής απόκρισης του κυκλώματος, η οποία μπορεί να διαρκέσει από ένα μέχρι 30 κύκλους. Η συνεχής συνιστώσα μιας φάσης εμφανίζεται όταν τη χρονική στιγμή που κλείνει ο διακόπτης είναι $\partial e/\partial t \neq 0$, δηλαδή όταν η $e(t)$ δεν έχει μέγιστη ή ελάχιστη τιμή. Καθώς σε τριφασικά συστήματα οι τάσεις τροφοδοτήσεως είναι συμμετρικές, κατά την εμφάνιση τριπολικών βραχυκυκλώματος εμφανίζονται στα ρεύματα τουλάχιστον δύο φάσεων συνεχείς συνιστώσες. Αν πχ. ισχύει για τη φάση a $\partial e_a/\partial t = 0$ για τις άλλες δύο φάσεις θα είναι $\partial e_b/\partial t = 0$ και $\partial e_c/\partial t = 0$.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, τη στιγμή που κλείνει ο διακόπτης ($t=0$) καθώς $I_s=0$, οι δύο συνιστώσες του ρεύματος παρουσιάζουν το ίδιο μέτρο, αλλά αντίθετα πρόσημα, όπως φαίνεται στην (4.7). Δηλαδή, η συνεχής συνιστώσα εμφανίζεται στη λύση του προβλήματος για να ικανοποιηθεί η φυσική συνθήκη μηδενικού ρεύματος ($i(0)=I_s=0$) τη στιγμή που εφαρμόζεται η τάση e . Επίσης, η συνθήκη αυτή ισχύει λόγω του γεγονότος ότι το ρεύμα δεν μπορεί στιγμιαία να γίνει lagging, λόγω του επαγωγικού χαρακτήρα που παρουσιάζουν τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4.

$$i(0) = i_{ac}(0) + i_{dc}(0) = 0. \quad (4.7)$$

Αναλυτικά, το συνολικό ρεύμα $i(t)$ γράφεται στην (4.8), αντικαθιστώντας τις (4.5) και (4.6) στην (4.4). Στην πλειονότητα των περιπτώσεων η κυματομορφή του ρεύματος βραχυκύκλωσης παρουσιάζει ασυμμετρία κατά τη διάρκεια των πρώτων κύκλων μετά την εμφάνιση του σφάλματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5, όπου παρουσιάζει μια τυπική κυματομορφή ρεύματος βραχυκυκλώσεως.

$$i(t) = \underbrace{\frac{E\sqrt{2}}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \varphi)}_{\text{Εναλλασσόμενη συνιστώσα}} - \underbrace{\frac{E\sqrt{2}}{Z} \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t}}_{\text{Συνεχής συνιστώσα}}, \quad (4.8)$$



Σχήμα 4.6: Ασύμμετρο ρεύμα βραχυκυκλώσεως.

Επίσης, αναλύοντας την (4.8) μπορούν να θεωρηθούν οι παρακάτω δύο οριακές περιπτώσεις.

Περίπτωση συμμετρίας

Αν η τάση εφαρμοστεί τη χρονική στιγμή που $\alpha - \varphi = 0$, $\alpha - \varphi = \pi$ ή λαμβάνοντας υπόψη τον επαγωγική χαρακτήρα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας $\alpha - \varphi \approx \pi/2$, η κυματομορφή ρεύματος που προκύπτει φαίνεται στο Σχήμα 4.6. Στην περίπτωση αυτή ($\partial e/\partial t = 0$) η συνεχής συνιστώσα εξαλείφεται και το συνολικό ρεύμα του κυκλώματος παρουσιάζει ημιτονοειδή μορφή εμφανίζοντας συμμετρία (symmetrical ή balanced) ως προς τον άξονα του χρόνου, δηλαδή έχει ίδια μορφή με αυτή στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας πριν το κλείσιμο του διακόπτη. Σημειώνεται ότι ως «συμμετρικό ρεύμα» (symmetrical current) χαρακτηρίζεται η περίπτωση στην οποία η περιβάλλουσα των θετικών και αρνητικών κορυφών της κυματομορφής ρεύματος παρουσιάζουν

συμμετρία ως προς τον άξονα του χρόνου. Σε διαφορετική περίπτωση χαρακτηρίζεται ως «ασύμμετρο ρεύμα» (asymmetrical current).

$$i(t) = \frac{E\sqrt{2}}{Z_{sc}} \sin(\omega t), \quad (4.9)$$

Η rms τιμή του είναι $I = E\sqrt{2}/Z_{sc}$.

Περίπτωση ασυμμετρίας

Αν η τάση εφαρμοστεί τη χρονική στιγμή που $\alpha - \varphi = \pm\pi/2$ ή ειδικά για τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (δηλ. $\varphi = \pi/2$) τότε $\alpha = 0$, η συνιστώσα συνεχούς ρεύματος λαμβάνει τη μέγιστη τιμή (δηλ. ίση με τη μέγιστη τιμή της συνιστώσας εναλλασσόμενου ρεύματος). Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται μέγιστη ασυμμετρία (asymmetrical ή unbalanced) στην κυματομορφή ρεύματος ως προς τον άξονα του χρόνου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Το ρεύμα του κυκλώματος περιγράφεται από την:

$$i(t) = \frac{E\sqrt{2}}{Z_{sc}} \left[\sin(\omega t - \varphi) + \sin(\varphi) e^{-\frac{R}{L}t} \right], \quad (4.10)$$

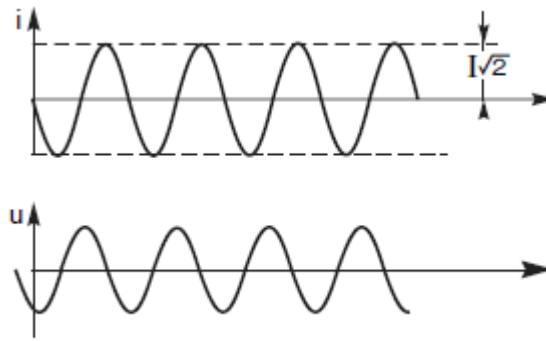
Η μέγιστη τιμή i_p εξαρτάται από τη γωνία φ και τον λόγο $R/X \approx \cos \varphi$. Επομένως, η τιμή του μπορεί να προσδιοριστεί από την (4.11):

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_{\alpha}, \quad (4.11)$$

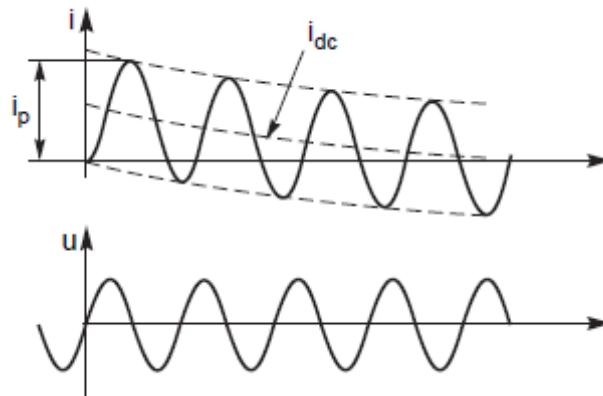
όπου:

$I_{\alpha} = E/Z_{sc}$ η rms συμμετρική τιμή μόνιμης κατάστασης

$\kappa = 1.02 + 0.98e^{-\frac{3R}{X}}$. Για $R=0$ είναι $\kappa = 2$, δηλ. το i_p γίνεται διπλάσιο της μέγιστης τιμής μόνιμης κατάστασης.



Σχήμα 4.7: Ρεύμα βραχυκύκλωσης σε πλήρη συμμετρία για την περίπτωση σφάλματος μακριά από γεννήτρια.



Σχήμα 4.8: Ρεύμα βραχυκύκλωσης σε πλήρη ασυμμετρία για την περίπτωση σφάλματος μακριά από γεννήτρια.

4.2.2 Σφάλματα κοντά σε γεννήτρια

Στην περίπτωση που το σφάλμα εμφανίζεται σε εγγύτητα με τη γεννήτρια που τροφοδοτεί το κύκλωμα, η σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος καθορίζεται κυρίως από τη σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας. Η τελευταία μειώνεται κατά την εμφάνιση του σφάλματος, καθώς η ενέργεια του μαγνητικού πεδίου της γεννήτριας μειώνεται με ταχύτερο ρυθμό από ότι μπορεί να αναπληρωθεί. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η μεταβατική απόκριση του ρεύματος του σφάλματος να φθίνει με τον χρόνο. Στην πραγματικότητα κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος μεταβάλλεται η ηλεκτρεγερτική δύναμη της γεννήτριας. Ωστόσο, προς χάριν απλότητας, θεωρείται ότι η ηλεκτρεγερτική δύναμη είναι σταθερή και μεταβάλλεται, ενώ η σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας λαμβάνεται μεταβαλλόμενη σε τρία στάδια:

- Υπομεταβατική (subtransient): τα πρώτα 10 με 20 ms του σφάλματος (Σχήμα 4.8α)

- Μεταβατική (transient): μέχρι 500 ms (Σχήμα 4.8β)
- Μόνιμη κατάσταση (steady-state): αντιστοιχεί στη σύγχρονη αντίδραση (Σχήμα 4.8γ)

Η τιμή της σύνθετης αντίστασης της γεννήτριας αυξάνεται σε κάθε στάδιο· έτσι, κατά την υπομεταβατική περίοδο παρουσιάζει τη μικρότερη τιμή, ενώ στη μόνιμη κατάσταση τη μεγαλύτερη. Αυτή η διαδοχική μεταβολή της σύνθετης αντίστασης της γεννήτριας αντιστοιχεί και στη σταδιακή μείωση του ρεύματος βραχυκυκλώματος, το οποίο μπορεί να αναλυθεί ως το άθροισμα τεσσάρων όρων:

- Τρεις εναλλασσόμενους όρους (υπομεταβατικός, μεταβατικός, μόνιμη κατάσταση), λόγω της επίδρασης της γεννήτριας
- Έναν απεριοδικό όρο, ο οποίος προκύπτει κατά την εκδήλωση του ρεύματος βραχυκυκλώματος στο κύκλωμα

Το ρεύμα του σφάλματος, αγνοώντας την επίδραση του δικτύου δίνεται από την:

$$i(t) = E\sqrt{2} \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-t/T_d''} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/T_d'} + \frac{1}{X_d} \right] \cos \omega t - \frac{E\sqrt{2}}{X_d''} e^{-t/T_a}, \quad (4.12)$$

όπου:

- E : Φασική rms τάση στους ακροδέκτες της γεννήτριας
- X_d'' : Υπομεταβατική αντίδραση
- X_d' : Μεταβατική αντίδραση
- X_d : Σύγχρονη αντίδραση
- T_d'' : Υπομεταβατική χρονική σταθερά
- T_d' : Μεταβατική χρονική σταθερά
- T_a : απεριοδική χρονική σταθερά

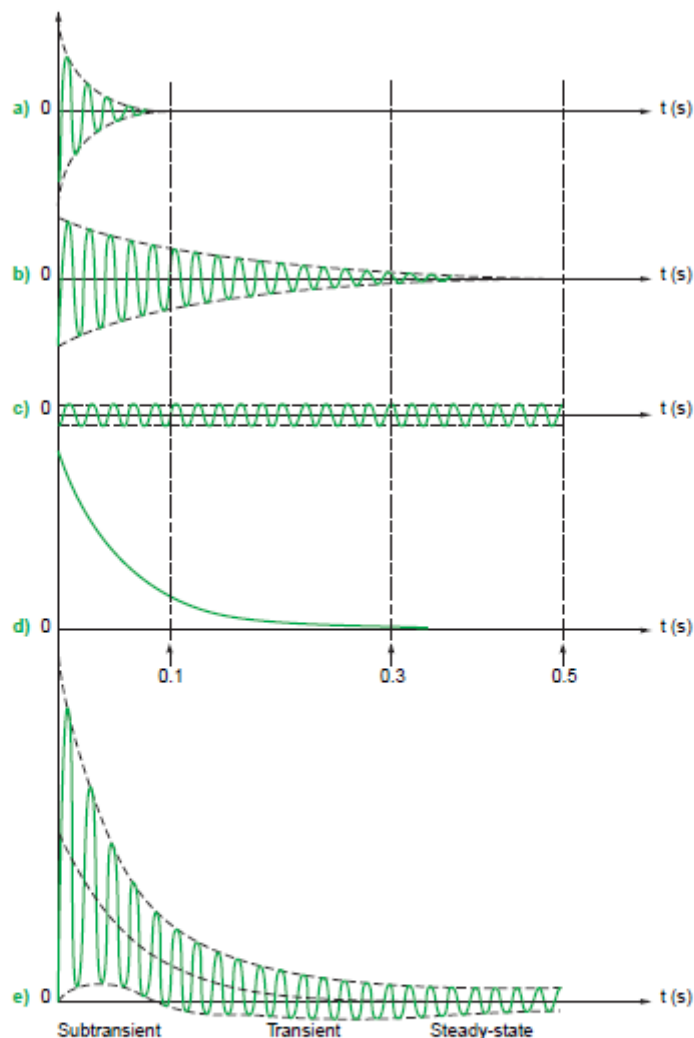


Fig. 10 : Total short-circuit current i_{sc} (e), and contribution of its components:

a) subtransient reactance = X''_d

b) transient reactance = X'_d

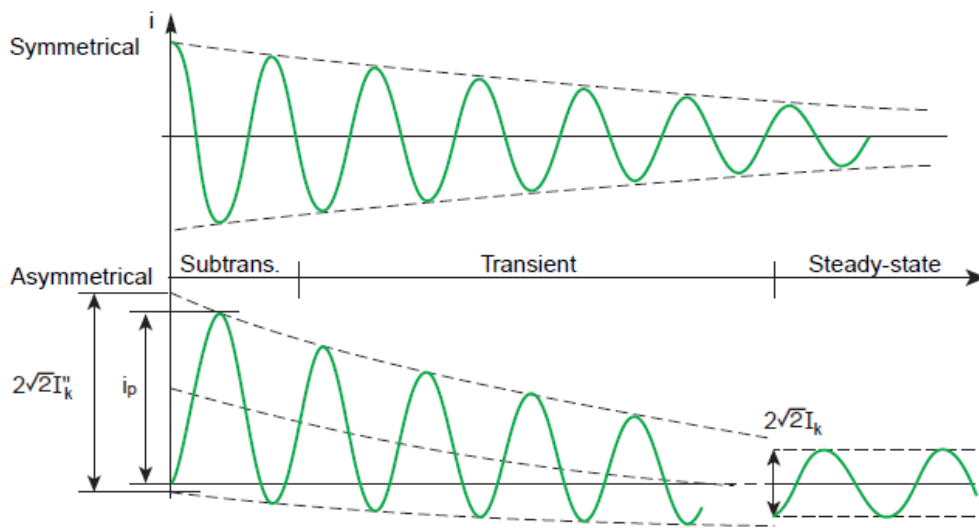
c) synchronous reactance = X_d

d) aperiodic component.

Note that the decrease in the generator reactance is faster than that of the aperiodic component. This is a rare situation that can cause saturation of the magnetic circuits and interruption problems because several periods occur before the current passes through zero.

Σχήμα 4.9: Ανάλυση του ρεύματος βραχυκυκλώματος για την περίπτωση σφάλματος κοντά σε γεννήτρια.

Το ρεύμα λαμβάνει μέγιστη τιμή όταν η χρονική στιγμή που εμφανίζεται το σφάλμα ταυτίζεται με τη χρονική στιγμή που μηδενίζεται η τάση. Η επίδραση της συνεχούς συνιστώσας, ανάλογα με τη χρονική στιγμή εμφάνισης του σφάλματος αναλύεται στο Σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.10: Ανάλυση του ρεύματος βραχυκυκλώματος για την περίπτωση σφάλματος κοντά σε γεννήτρια.

4.3 Πρότυπο IEC 60909

4.3.1 Βασικοί ορισμοί

Το 1988 η διεθνής επιτροπή ηλεκτροτεχνίας (International Electrotechnical Commission) δημοσίευσε το πρότυπο IEC 60909 με τίτλο «Short-Circuit Current Calculation in Three-Phase AC Systems» βασισμένο στο γερμανικό πρότυπο (VDE) 0102. Στη συνέχεια το IEC 60909 αναθεωρήθηκε το 2001 και το 2016 και είναι το μόνο διεθνές πρότυπο το οποίο προτείνει μεθόδους για τον υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκυκλώσεως σε τριφασικά ac συστήματα. Η βασική ιδέα κατά τη δημιουργία του προτύπου ήταν η δημιουργία μιας πρακτικής και συνοπτικής διαδικασίας υπολογισμών, οι οποίοι να είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν με το χέρι και να οδηγούν σε αποτελέσματα τα οποία γενικά να παρουσιάζουν ικανοποιητική ακρίβεια. Το πρότυπο αποτελείται από τα εξής μέρη [4]:

- Part 0: Calculation of currents.
- Part 1: Factors for the calculation of short-circuit currents
- Part 2: Electrical equipment; data for short-circuit current calculations.
- Part 3: Currents during two separate simultaneous line-to-earth short circuits and partial short-circuit currents flowing through earth
- Part 4: Examples for the calculation of short-circuit currents

Η περιοχή εφαρμογής του περιλαμβάνει τριφασικά ac συστήματα, δίκτυα ΧΤ και ΥΤ μέχρι 500 kV, συχνότητες 50 Hz και 60 Hz, συμμετρικά και ασύμμετρα βραχυκυκλώματα, ταυτόχρονα σφάλματα, υπολογισμούς μεγίστου και ελαχίστου ρεύματος σφάλματος.

Σύμφωνα με το πρότυπο, βραχυκύκλωμα είναι η τυχαία ή σκόπιμη αγώγιμη σύνδεση μέσω χαμηλής αντίστασης ανάμεσα σε δύο ή περισσότερα σημεία ενός ηλεκτρικού κυκλώματος, τα οποία έχουν κανονικά διαφορετικό δυναμικό. Για τους υπολογισμούς θεωρούνται οι παρακάτω παραδοχές, οι οποίες γενικά οδηγούν σε ασφαλή αποτελέσματα:

- Οι υπολογισμοί γίνονται για στάσιμη κατάσταση (quasi-static state) και όχι για δυναμική.
- Δεν υπάρχει αλλαγή στον τύπο του σφάλματος κατά τη διάρκεια των υπολογισμών.
- Δεν υπάρχει αλλαγή στην τοπολογία του δικτύου κατά την διάρκεια των υπολογισμών.
- Η αντίσταση του τόξου στους διακόπτες δεν λαμβάνεται υπόψη. Γενικά, η αντίσταση του τόξου είναι σχετικά μικρή και η ανά μονάδα μήκους τιμή της υπολογίζεται από τη σχέση $R' \approx E_t / I_k$, όπου E_t η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του τόξου, η οποία για σφάλματα στον αέρα είναι $E_t \approx 15 \text{ V/cm}$.
- Οι αντιστάσεις των ΜΣ υπολογίζονται στο tap setting πριν το σφάλμα.
- Αγνοούνται όλες οι αγωγιμότητες πλην της C_0

Γενικά, τα μεγέθη ρευμάτων βραχυκύκλωσης στα οποία βασίζονται οι υπολογισμοί είναι:

- **Μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώσεως:** χρησιμοποιείται για τη διαστασιολόγηση των ηλεκτρικών στοιχείων του κυκλώματος.
- **Ελάχιστο ρεύμα βραχυκυκλώσεως:** μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως η βάση για τη ρύθμιση της προστασίας, την επιλογή των ασφαλειών και τον έλεγχο της εκκίνησης των κινητήρων

Τα βασικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς των ρευμάτων βραχυκυκλώσεως κατά το πρότυπο IEC 60909 είναι:

Ρεύμα βραχυκυκλώσεως (short-circuit current) $i(t)$: η μεταβατική απόκριση του ρεύματος βραχυκυκλώσεως στη θέση του σφάλματος.

Εναλλασσόμενη συνιστώσα ρεύματος (symmetrical short-circuit current): η rms τιμή της εναλλασσόμενης συνιστώσας του ρεύματος βραχυκυκλώσεως, αγνοώντας τυχόν ύπαρξη του μη περιοδικού όρου.

Αρχικό συμμετρικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως (initial symmetrical short-circuit current) I_k'' : είναι η rms τιμή του συμμετρικού ρεύματος βραχυκύκλωσης (συμμετρική ή εναλλασσόμενη συνιστώσα) που εμφανίζεται τη στιγμή του σφάλματος όταν η αντίσταση του σφάλματος έχει πάρει την τελική της τιμή. Το μέγεθος I_k'' παρουσιάζεται στα Σχήματα 4.8 και 4.10.

Αρχική ισχύς βραχυκυκλώσεως (initial symmetrical short-circuit power) S_k'' : η είναι μια φανταστική μεταβλητή που υπολογίζεται ως το γινόμενο του αρχικού συμμετρικού ρεύματος βραχυκύκλωσης με την ονομαστική τάση και το συντελεστή $\sqrt{3}$. Δηλ.:

$$S_k'' = \sqrt{3} U_n I_k'' \quad (4.13)$$

Η S_k'' δεν έχει φυσική υπόσταση, καθώς η τάση και η ένταση του ρεύματος δεν επενεργούν ταυτόχρονα· κατά την εμφάνιση του τριπολικού βραχυκυκλώματος η τάση στο σημείο του σφάλματος είναι σχεδόν μηδέν. Το μέγεθος της S_k'' χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό της αντοχής των στοιχείων ενός κυκλώματος στις καταπονήσεις των βραχυκυκλωμάτων. Επειδή, οι μεγαλύτερες τιμές ρευμάτων βραχυκυκλώσεως εμφανίζονται κατά την εμφάνιση τριπολικών βραχυκυκλωμάτων, η S_k'' ορίζεται μόνο γι αυτή την περίπτωση. Επίσης, χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης του δικτύου στο σημείο σύνδεσης. Στην περίπτωση αυτή η σύνθετη αντίσταση σαν συνάρτηση της ισχύος βραχυκύκλωσης θα είναι:

$$Z = \frac{c U_n^2}{S_k''} \quad (4.14)$$

Μέγιστη τιμή ρεύματος βραχυκυκλώσεως ή κρουστικό ρεύμα (peak short-circuit current) i_p : είναι η μέγιστη στιγμιαία τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Να σημειωθεί ότι η τιμή αυτή εξαρτάται από τη στιγμή της έναρξης του σφάλματος και γίνεται μέγιστη

όταν η συνεχής συνιστώσα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της A , όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.8 και 4.10. Αναφέρεται και ως κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως.

Συμμετρικό ρεύμα διακοπής (symmetrical short-circuit breaking current) I_b : είναι η rms τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης τη στιγμή του ανοίγματος των επαφών του πρώτου πόλου που θα ανοίξει στο διακόπτη ισχύος.

Μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως (steady-state short-circuit current) I_k : είναι η rms τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης που παραμένει μετά την πάροδο του μεταβατικού φαινομένου, όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.8 και 4.10.

Υπομεταβατική τάση σύγχρονης μηχανής (subtransient voltage of a synchronous machine) E'' : είναι η rms τιμή της ηλεκτρεγερτητικής δύναμης (φασική) που επενεργεί κατά τη στιγμή εμφάνισης του βραχυκυκλώματος.

Τάση ισοδύναμης πηγής (equivalent voltage source) $cU_n/\sqrt{3}$: η τάση μιας ιδανικής πηγής τάσης που εφαρμόζεται στο σημείο εμφάνισης του βραχυκυκλώματος. Είναι η μόνη πηγή τάσεως του ορθού συστήματος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ρεύματος βραχυκυκλώσεως.

Ονομαστική τάση (nominal system voltage) U_n : η πολιτική τάση του συστήματος.

Συντελεστής c (voltage factor): συντελεστής, του οποίου η τιμή προσδιορίζεται σύμφωνα με τον Πίνακα 4-1.

Υπομεταβατική αντίδραση (subtransient reactance of a synchronous machine) X_d'' : μιας σύγχρονης μηχανής είναι η επαγωγική αντίδραση της μηχανής κατά τη στιγμή εμφάνισης του βραχυκυκλώματος. Για τον υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκύκλωσης λαμβάνεται υπόψη η κορεσμένη τιμή (saturated value) του X_d'' . Η τιμή της X_d'' σε per-unit ορίζεται ως:

$$x_d'' = \frac{X_d''}{Z_n} = \frac{X_d'' S_n}{U_n^2}, \quad (4.15)$$

Πίνακας 4-1: Παράμετροι ιδιοτιμών για διάφορες συνθήκες αρχικοποίησης

Ονομαστική τάση	Συντελεστής c για τον υπολογισμό	
	Μέγιστου ρεύματος σφάλματος	Ελαχίστου ρεύματος σφάλματος
Χαμηλή τάση 100 V – 1000 V		
Συστήματα με ανοχή 6%	1,05	0,95
Συστήματα με ανοχή 10%	1,10	0,95
Μέση τάση >1 kV – 35 kV	1,10	1,00
Υψηλή τάση >35 kV	1,10	1,00

Το μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώσεως χρησιμοποιείται για τη διαστασιολόγηση του εξοπλισμού, καθώς τα στοιχεία του δικτύου κατά τη διάρκεια των βραχυκυκλωμάτων θα πρέπει να αντέχουν τόσο στις μηχανικές (δυναμικές) καταπονήσεις που προκαλούνται, λόγω των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων που αναπτύσσονται όσο και στις θερμικές καταπονήσεις, λόγω της υψηλής έκλυσης θερμότητας. Το ελάχιστο ρεύμα βραχυκυκλώσεως χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς της επιλογικής προστασίας. Η χρήση των διαφόρων μεγεθών ρευμάτων που προτείνονται στο πρότυπο IEC 60909 συνοψίζεται στον Πίνακα 4-2.

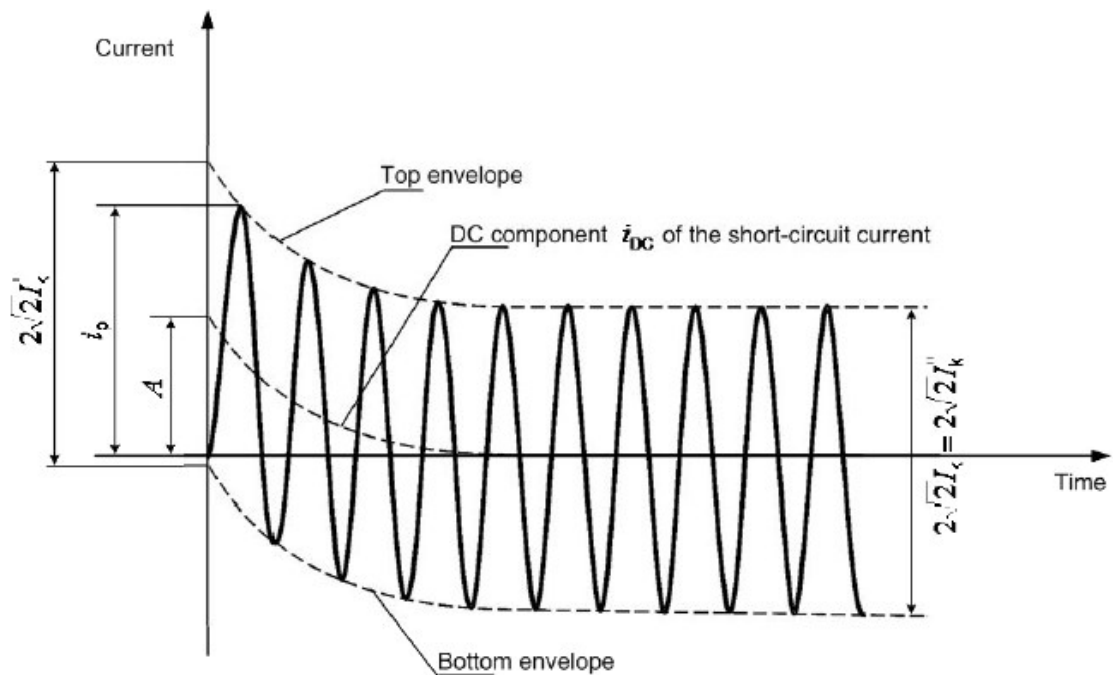
Πίνακας 4-2: Εφαρμογές χρήσης ρευμάτων

Κριτήριο σχεδιασμού	Φυσικό φαινόμενο που αφορά	Ρεύμα
Ικανότητα διακοπής του διακόπτη ισχύος (ΔI)	Θερμική καταπόνηση του θαλάμου σβέσης τόξου	I_b
Μηχανική καταπόνηση συσκευών	ΗΜ δυνάμεις σε συσκευές και διατάξεις	i_p
Θερμική καταπόνηση	Αύξηση θερμοκρασίας πχ καλωδίων	μέγιστο ρεύμα I_k''
Ρυθμίσεις προστασίας	Επιλεκτική απομόνωση σφαλμάτων	ελάχιστο ρεύμα I_k''
Γειώσεις, αλληλεπιδράσεις, κτλ	Ανύψωση τάσης, ΗΜ πεδία	μέγιστο ρεύμα I_k''

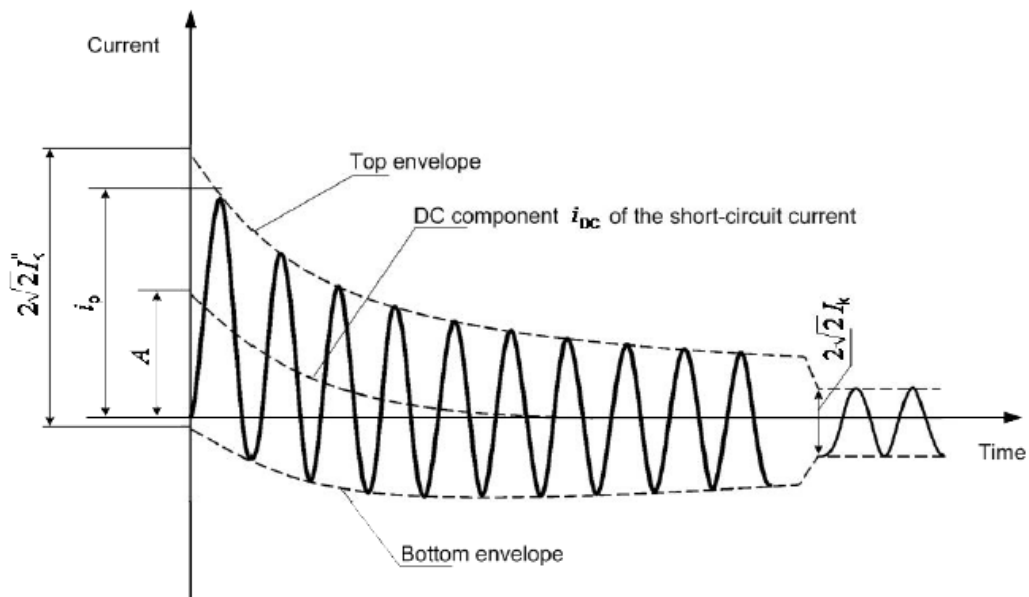
4.3.2 Κατηγορίες σφαλμάτων

Ο υπολογισμός του ρεύματος βραχυκύκλωσης με βάση το πρότυπο IEC 60909 βασίζεται στη θεώρηση των βραχυκυκλωμάτων σε περιπτώσεις μακριά και κοντά στη γεννήτρια. Ειδικότερα ορίζεται κατά IEC 60909:

- **Σφάλμα μακριά από τη γεννήτρια:** όταν κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος οι τάσεις των πηγών θεωρούνται αμετάβλητες και κατά συνέπεια η εναλλασσόμενη συνιστώσα και άρα η περιβάλλουσα της κυματοφορφής ρεύματος βραχυκύκλωσης παραμένει σταθερή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.11. Επομένως, ισχύει δηλαδή $I_k'' = I_k' = I_k$.
- **Σφάλμα κοντά στη γεννήτρια:** όταν κατά το τριπολικό βραχυκύκλωμα τουλάχιστον μια εκ των γεννητριών συμβάλει στο αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως I_k'' με ρεύμα διπλάσιο του ονομαστικού ρεύματος· όσον αφορά σύγχρονους ή ασύγχρονους κινητήρες όταν το ρεύμα I_k'' είναι κατά 5 % μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ρεύμα που προκύπτει αγνοώντας την επίδρασή τους. Στην περίπτωση αυτή όπως έχει ήδη αναλυθεί η εναλλασσόμενη συνιστώσα και επομένως και η rms τιμή του μεταβατικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως φθίνει από την αρχική τιμή I_k'' στην τελική τιμή I_k και επομένως $I_k'' > I_k$. Το μεταβατικό ρεύμα I_k' (μεταξύ I_k'' και I_k όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.12) δεν χρειάζεται απαραίτητα στους υπολογισμούς.



Σχήμα 4.11: Κυματομορφή ρεύματος βραχυκυκλώσεως για την περίπτωση σφάλματος μακριά από γεννήτρια, όταν η τιμή της τάσης έχει μηδενική τιμή.



Σχήμα 4.12: Κυματομορφή ρεύματος βραχυκυκλώσεως για την περίπτωση σφάλματος κοντά σε γεννήτρια, όταν η τιμή της τάσης έχει μηδενική τιμή.

4.4 Σύνθετες αντιστάσεις

Για όλα τα παθητικά στοιχεία, δηλ. μετασχηματιστές, εναέριες γραμμές, συστήματα καλωδίων και πηνία καθώς και για υποσταθμούς τροφοδοσίας (feeders) η σύνθετη αντίσταση του αντίστροφου συστήματος είναι ίση με αυτή του ορθού, δηλ.

$$Z_{(2)} = Z_{(1)}. \quad (4.16)$$

Οι σύνθετες αντιστάσεις των γεννητριών (G), μετασχηματιστών στο δίκτυο (T) και σε σταθμούς παραγωγής (S) πολλαπλασιάζονται με τους αντίστοιχους συντελεστές διόρθωσης K_G , K_T και K_S ή K_{SO} , κατά τον υπολογισμό του μέγιστου ρεύματος βραχυκυκλώσεως.

4.4.1 Υποσταθμοί τροφοδοσίας

Καθώς στους υποσταθμούς τροφοδοσίας (Σχήμα 4.13) είναι συνήθως γνωστά το αρχικό συμμετρικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως I_k'' (πχ. 7,22 kA στα 20 kV) και η ισχύς βραχυκύκλωσης S_k'' , η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του υποσταθμού τροφοδοσίας (σύνθετη αντίσταση στο ορθό σύστημα) προσδιορίζεται από τη σχέση:

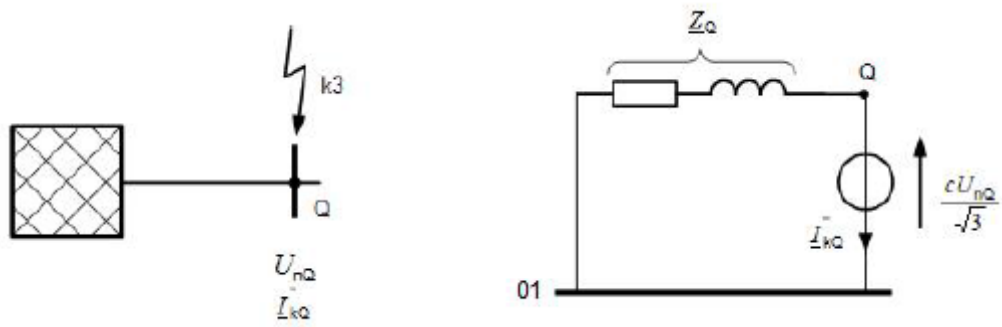
$$Z_Q = \frac{cU_n^2}{I_k''} = \frac{cU_n^2}{S_k''} \quad (4.17)$$

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + (R/X)^2}} \quad (4.18)$$

Εάν ο λόγος R/X δεν είναι γνωστός τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι $R=0$ εάν η τάση είναι μεγαλύτερη από 35 kV, ή μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι εξής τιμές:

$$\frac{R_Q}{X_Q} = 0.1 \quad (4.19)$$

$$X_Q = 0.995 \cdot Z_Q \quad (4.20)$$



Σχήμα 4.13: Στοιχείο και ισοδύναμο κύκλωμα υποσταθμού τροφοδοσίας.

4.4.2 Σύγχρονες γεννήτριες

4.4.2.1 Γεννήτρια με άμεση σύνδεση στο δίκτυο

Κατά τον υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκυκλώσεως σε συστήματα τα οποία τροφοδοτούνται απευθείας από γεννήτριες χωρίς τη μεσολάβηση μετασχηματιστών, για παράδειγμα σε βιομηχανικά δίκτυα ή σε δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλής τάσης, η σύνθετη αντίσταση των σύγχρονων γεννητριών στο ορθό σύστημα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$X_d'' = x_d'' \frac{U_n^2}{S_n} \quad (4.21)$$

$$Z_{GK} = K_G Z_G = K_G (R_d + jX_d'') \quad (4.22)$$

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}} \quad (4.23)$$

όπου:

U_n : ονομαστική τάση του συστήματος (πολική τάση)

U_{rG} : τάση διαστασιολόγησης (rated) της γεννήτριας (πολική τάση)

S_n : ονομαστική φαινόμενη ισχύς

X_d'' : αρχική (υπομεταβατική) επαγωγική αντίδραση

Z_G : αρχική (υπομεταβατική) σύνθετη αντίδραση

x_d'' : ανηγμένη αρχική αντίδραση (p.u.)

c_{\max} : συντελεστής τάσης με βάση τον Πίνακα 4-1

φ_{rG} : φασική γωνία μεταξύ της τάσεως και της εντάσεως κατά την ονομαστική λειτουργία

Το μέγεθος R δεν αντιστοιχεί στην αντίσταση του τυλίγματος του στάτη, αλλά χρησιμοποιείται για να λάβει υπόψη στους υπολογισμούς του κρουστικού ρεύματος την ελάττωση της εναλλασσόμενης συνιστώσας κατά την πρώτη ημιπερίοδο. Η τιμή της R είναι σημαντικά μεγαλύτερη αυτής της αντίστασης του τυλίγματος του στάτη και λαμβάνει τιμές όπως φαίνεται στον Πίνακα 4-3.

Πίνακας 4-3: Αντίσταση R σύγχρονων γεννητριών

Κριτήριο σχεδιασμού	R/X_d''
$S_n \geq 100$ MVA	0.05
$S_n < 100$ MVA	0.07
Για μηχανές χαμηλής τάσης ($U_n \leq 1$ kV)	0.15

Όσον αφορά το κύκλωμα της αντίστροφης συνιστώσας, για τις στροβιλογεννήτριες ισχύει ότι $Z_{(2)} = Z_{(1)}$, ενώ για τις γεννήτριες έκτυπων πόλων $X_{(2)G} = (X_d'' + X_q'')/2$. Επίσης, για τον προσδιορισμό της σύνθετης αντίστασης του ομοπολικού κυκλώματος ισχύουν οι παραπάνω σχέσεις. Για τον υπολογισμό του ελάχιστου ρεύματος βραχυκυκλώσεως ο συντελεστής K_G λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα.

Κατά τον υπολογισμό των ρευμάτων I_k'' , i_p , I_b και I_k οι στρεφόμενοι πυκνωτές και σύγχρονοι κινητήρες (εφόσον διαθέτουν σύστημα ρύθμισης τάσης) αντιμετωπίζονται όπως οι σύγχρονες γεννήτριες.

4.4.2.2 Γεννήτρια σε σταθμό παραγωγής με OLTC

Για τον υπολογισμό του μέγιστου αρχικού ρεύματος σε σταθμό παραγωγής με OLTC, χρησιμοποιείται η (4.24) που εκφράζει τη συνολική σύνθετη αντίσταση του σταθμού παραγωγής.

$$Z_{SK} = K_S (t_r^2 \cdot Z_G + Z_{THV}) \quad (4.24\alpha)$$

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + |x_d'' - x_r| \sin \varphi_{rG}} \quad (4.24\beta)$$

όπου:

Z_{SK} : η διορθωμένη σύνθετη αντίσταση του σταθμού παραγωγής, ανηγμένη στην πλευρά υψηλής τάσης

$Z_G = R_d + jX''$: η υπομεταβατική σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας (χωρίς το συντελεστή διόρθωσης)

Z_{THV} : η σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή, ανηγμένη στην πλευρά υψηλής τάσης (χωρίς το συντελεστή διόρθωσης)

U_{nQ} : ονομαστική τάση του συστήματος (πολική τάση) στο σημείο σύνδεσης με το υπόλοιπο δίκτυο

U_{rG} : τάση διαστασιολόγησης (rated) της γεννήτριας (πολική τάση)

x_d'' : ανηγμένη αρχική αντίδραση (p.u.)

x_T : η επαγωγική αντίδραση του μετασχηματιστή, θεωρώντας τα τυλίγματα στη βασική θέση λήψης του OLTC

t_r : λόγος μετασχηματισμού (ονομαστική λήψη)

c_{max} : συντελεστής τάσης με βάση τον Πίνακα 4-1

φ_{rG} : φασική γωνία μεταξύ της τάσεως και της εντάσεως κατά την ονομαστική λειτουργία

Για τον υπολογισμό του ελάχιστου ρεύματος βραχυκυκλώσεως ο συντελεστής λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα.

Σε περίπτωση σταθμών παραγωγής με μετασχηματιστές χωρίς OLTC οι παραπάνω σχέσεις διαφοροποιούνται λαμβάνοντας υπόψη τη θέση λήψης του μετασχηματιστή (p_T).

4.4.3 Μετασχηματιστές

Η σύνθετη αντίσταση των μετασχηματιστών δύο τυλιγμάτων ($Z_T = R_T + jX_T$) στο ορθό σύστημα, με ή χωρίς ρύθμιση τάσης υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (4.25\alpha)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3 \cdot I_{rT}^2} \quad (4.25\beta)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (4.25\gamma)$$

όπου:

U_{rT} : η τάση διαστασιολόγησης του μετασχηματιστή στην υψηλή ή στην χαμηλή πλευρά

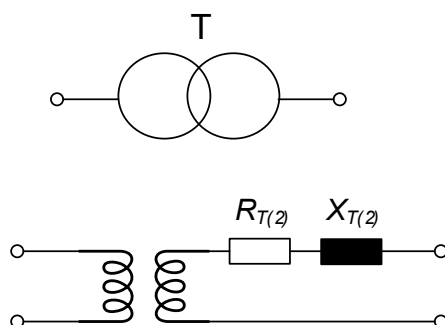
I_{rT} : το ρεύμα διαστασιολόγησης του μετασχηματιστή στην υψηλή ή στην χαμηλή πλευρά

S_{rT} : η φαινόμενη ισχύς διαστασιολόγησης του μετασχηματιστή

P_{krT} : οι συνολικές απώλειες στα τυλίγματα του μετασχηματιστή για το ρεύμα διαστασιολόγησης

u_{kr} : τάση βραχυκύκλωσης (%)

u_{Rr} : ωμική συνιστώσα της τάσης βραχυκύκλωσης



Σχήμα 4.14: Στοιχείο και ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή.

Για τον υπολογισμό του αρχικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως εισάγεται ο παρακάτω όρος διόρθωσης για όλους τους τύπους μετασχηματιστών (δεν αναφέρεται σε μετασχηματιστές ανύψωσης σε σταθμούς παραγωγής, οι οποίοι αντιμετωπίζονται ως ιδιαίτερη περίπτωση). Ο όρος διόρθωσης εφαρμόζεται στο ορθό, το αντίστροφο και το ομοπολικό κύκλωμα.

$$Z_{TK} = Z_T K_T \quad (4.26\alpha)$$

$$K_T = 0.95 \frac{c_{\max}}{1 + 0.6x_T} \quad (4.26\beta)$$

$$x_T = \frac{X_T}{\left(\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \right)} \quad (4.26\gamma)$$

Ο συντελεστής c_{\max} προσδιορίζεται με βάση τον Πίνακα 4-1, θεωρώντας ως επίπεδο τάσης αυτό στη χαμηλή πλευρά του μετασχηματιστή. Εάν οι συνθήκες λειτουργίας του μετασχηματιστή είναι γενικά γνωστές για μεγαλύτερη ακρίβεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$$K_T = \frac{U_n}{U^b} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_T (I_T^b / I_{rT}) \sin \varphi_T^b} \quad (4.27)$$

όπου U^b , I_T^b είναι η μέγιστη τάση και το μέγιστο ρεύμα πριν το βραχυκύκλωμα και $\cos \varphi_T^b$ ο αντίστοιχος συντελεστής ισχύος.

4.4.4 Εναέριες γραμμές ή συστήματα καλωδίων

Η ορθή συνιστώσα για τους υπολογισμούς βραχυκυκλωμάτων

$$Z_{L1} = (R'_{L1} + jX'_{L1}) \cdot \ell \quad (4.28)$$

όπου ℓ είναι το μήκος της γραμμής και R'_1 , X'_1 οι ανά μονάδα μήκους παράμετροι, οι οποίες μπορούν να υπολογιστούν από αναλυτικούς τύπους (διατομή, ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, αποστάσεις), από μετρήσεις ή συνήθως είναι διαθέσιμες στο datasheet του κατασκευαστή. Ο προσδιορισμός της ομοπολικής σύνθετης αντίστασης Z_{L0} γίνεται με παρόμοιο τρόπο όπως η Z_{L1} ή από τον αντίστοιχο λόγο R_{L0}/R_{L1} και X_{L0}/X_{L1} .

Ειδικά για τον όρο της αντιστάσεως αυτή προσδιορίζεται στους 20°C για τον προσδιορισμό του μεγίστου ρεύματος βραχυκυκλώσεως. Για τον υπολογισμό του ελαχίστου ρεύματος, υπολογίζονται για θερμοκρασία ίση με αυτή κατά το τέλος του βραχυκυκλώματος. Για δίκτυα χαμηλής τάσης αυτή λαμβάνεται ίση με 80°C.

4.4.5 Πηνίο περιορισμού ρεύματος βραχυκυκλώσεως

Η ορθή, αντίστροφη και ομοπολική συνιστώσα είναι ίσες (τριφασικό σύστημα ανεξαρτήτων συνθέτων αντιστάσεων). Η επαγωγική τους αντίδραση υπολογίζεται από τη σχέση

$$X_R = u_{kR} \frac{U_n}{\sqrt{3}I_{rR}} \quad (4.29)$$

όπου:

u_{kR} : η πτώση τάσης σε pu

U_n : η ονομαστική τάση του συστήματος (πολική)

I_{rR} : το ονομαστικό ρεύμα

$R_R \ll X_R$ και μπορεί να παραληφθεί, διαφορετικά $R_R/X_R = 1$

4.4.6 Ασύγχρονοι κινητήρες

Γενικά οι κινητήρες συμβάλουν στο ρεύμα σφάλματος και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς, θεωρώντας τη σύνθετη αντίσταση του Z_M στο ορθό και το αντίστροφο σύστημα:

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \quad (4.30)$$

$$X_M = \frac{Z_M}{\sqrt{1 + (R_M + X_M)^2}} \quad (4.31)$$

όπου:

U_{rM} : τάση διαστασιολόγησης του κινητήρα

I_{rM} : ρεύμα διαστασιολόγησης του κινητήρα

I_{LR}/I_{rM} : λόγος του ρεύματος ακινητοποιημένου δρομέα (locked-rotor) προς το ονομαστικό (rated) ρεύμα του κινητήρα

S_{rM} : φαινόμενη ισχύς του κινητήρα, η οποία θεωρώντας βαθμός απόδοσης η_{rM} και συντελεστή ισχύος $\cos\varphi_{rM}$ είναι:

$$S_{rM} = \frac{P_{rM}}{\eta_{rM} \cos\varphi_{rM}} \quad (4.32)$$

ή

$$I_{rM} = \frac{P_{rM}}{\sqrt{3}U_{rM}\eta_{rM}\cos\varphi_{rM}} \quad (4.33)$$

Εάν ο λόγος R_M/X_M δεν είναι γνωστός, μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι τιμές:

$$\begin{array}{lll} R_M / X_M = 0.1 & X_M = 0,995Z_M & \text{Κινητήρες MT Ισχύς/ζεύγος πόλων} > 1 \text{ MW} \\ R_M / X_M = 0.15 & X_M = 0,989Z_M & \text{Κινητήρες MT Ισχύς/ζεύγος πόλων} \leq 1 \text{ MW} \\ R_M / X_M = 0.42 & X_M = 0,922Z_M & \text{Κινητήρες XT μαζί με τα καλώδια σύνδεσης} \end{array} \quad (4.34)$$

4.4.7 Ανεμογεννήτριες

Η σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας των ασύγχρονων γεννητριών ενός αιολικού σταθμού (WF) είναι [4]:

$$Z_G = \frac{1}{I_{LR} / I_{rG}} \cdot \frac{U_{rG}}{\sqrt{3} \cdot I_G} = \frac{1}{I_{LR} / I_{rG}} \cdot \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} \quad (4.35)$$

όπου:

U_{rG} είναι η ονομαστική τάση της γεννήτριας.

I_{rG} είναι το ονομαστικό ρεύμα της γεννήτριας.

S_{rG} είναι η ονομαστική φαινόμενη ισχύς της γεννήτριας.

I_{LR} / I_{rG} είναι ο βαθμός του ρεύματος βραχυκυκλώσεως (εκκινήσεως) προς το ονομαστικό ρεύμα της γεννήτριας.

Η διανυσματική τιμή της σύνθετης αντίστασης υπολογίζεται από:

$$\bar{Z}_G = R_G + jX_G = \left(\frac{R_G}{X_G} + j \right) \cdot \frac{Z_G}{\sqrt{1 + (R_G / X_G)^2}} \quad (4.36)$$

Η συνολική σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας των ασύγχρονων γεννητριών ενός αιολικού σταθμού μαζί με τον μετασχηματιστή που είναι συνδεδεμένες είναι:

$$\bar{Z}_{WA} = t_r^2 \cdot \bar{Z}_G + \bar{Z}_{THV} \quad (4.37)$$

όπου:

\bar{Z}_{THV} είναι η συνθέτη αντίσταση του μετασχηματιστή στην πλευρά υψηλής τάσης.

t_r είναι ο λόγος μετασχηματισμού U_{rTHV} / U_{rTLV} .

Σε περίπτωση ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων δύναται να χρησιμοποιηθεί $\bar{Z}_{(2)WA} = \bar{Z}_{WA}$. Η ομοπολική σύνθετη αντίσταση $\bar{Z}_{(0)WA}$ δίνεται από τον κατασκευαστή και εξαρτάται από τον τύπο του μετασχηματιστή και την γείωση.

4.4.8 Σταθμοί παραγωγής ισχύος με μετατροπείς

Οι σταθμοί παραγωγής ισχύος (PF) με μετατροπείς προσομοιώνονται στο σύστημα θετικής ακολουθίας με μία πηγή ρεύματος. Τα στοιχεία της πηγής εξαρτούνται από τον τύπο του βραχυκυκλώματος και δίνονται από τον κατασκευαστή. Η σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας Z_{PF} θεωρείται ότι είναι άπειρη. Σε περίπτωση ασύμμετρων

βραχυκυκλωμάτων η σύνθετη αντίσταση αρνητικής ακολουθίας $Z_{(2)PF}$ εξαρτάται από την στρατηγική ελέγχου. Η τιμή της, δίνεται από τον κατασκευαστή. Η σύνθετη ομοπολική αντίσταση ακολουθίας $Z_{(0)PF}$ είναι άπειρη. Γενικά, ισχύουν οι ίδιες θεωρήσεις για σταθμούς με μετατροπείς τόσο σε αιολικά (WF) όσο και σε φωτοβολταϊκά (PV) πάρκα. Κατά τον υπολογισμό του αρχικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως, οι σταθμοί με πλήρη μετατροπέα αγνοούνται, εάν η συνεισφορά τους στο αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως δεν είναι μεγαλύτερη από 5% χωρίς να υπολογίζονται οι σταθμοί σε αυτό [4].

4.5 Υπολογισμός ρευμάτων βραχυκυκλώσεως

4.5.1 Γενικά

Τα στοιχεία του δικτύου πρέπει να αντέχουν στις δυναμικές (μηχανικές) καταπονήσεις που προκαλούνται από τις ηλεκτρομηχανικές δυνάμεις οι οποίες αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια ροής ρευμάτων βραχυκυκλώσεως. Πρέπει επίσης να αντέχουν στις θερμικές καταπονήσεις που προκαλούνται από την ανύψωση της θερμοκρασίας και οφείλονται στις μεγάλες ωμικές απώλειες κατά τη διάρκεια των βραχυκυκλωμάτων [6].

Η τιμή του μέγιστου ρεύματος βραχυκυκλώσεως χρειάζεται για τον υπολογισμό της αντοχής των διαφόρων στοιχείων του δικτύου ή για την επιλογή των κατάλληλων στοιχείων, από σειρές τυποποιημένων υλικών. Η τιμή του ελάχιστου ρεύματος βραχυκυκλώσεως χρειάζεται για τη ρύθμιση του συστήματος προστασίας, το οποίο πρέπει να λειτουργεί και όταν οι τιμές των ρευμάτων βραχυκυκλώσεως είναι μικρές [6].

Σε ένα ΣΗΕ χρησιμοποιούνται διάφορα μέσα προστασίας (ασφάλειες, διακόπτες περιορισμού ρεύματος, κ.τ.λ.) ώστε σε περίπτωση σφάλματος να:

- Διασφαλισθεί η ασφάλεια του προσωπικού.
- Ελαχιστοποιηθούν οι τεχνικές και οικονομικές ζημιές.
- Διασφαλισθεί η συνεχής τροφοδότηση των καταναλωτών.

Το αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως I_k'' υπολογίζεται χωρίς να ληφθεί υπόψη η προστασία του συστήματος. Το κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως i_p καθορίζεται από την τιμή του αρχικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως και τις χαρακτηριστικές καμπύλες του συστήματος προστασίας [4].

Για τον υπολογισμό του αρχικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως, του μόνιμου ρεύματος βραχυκυκλώσεως I_k και του ρεύματος διακοπής βραχυκυκλώματος I_b το σύστημα μετασχηματίζεται σε ισοδύναμο σύστημα με σύνθετες αντίστασης βραχυκυκλώματος στο σημείο του σφάλματος. Αυτή η διαδικασία δεν επιτρέπεται για τον υπολογισμό του κρουστικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως i_p .

4.5.2 Υπολογισμός μέγιστου και ελάχιστου αρχικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως

Για τον υπολογισμό του μέγιστου αρχικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως I_{kmax}'' απαιτείται [4]:

- Ο συντελεστής τάσης C_{max} του Πίνακα 4-1, σε περίπτωση που δεν καθορίζεται από κάποιο εθνικό πρότυπο.
- Να επιλεγεί η μέγιστη συμβολή των σταθμών παραγωγής ισχύος και των δικτύων τροφοδότησης.
- Οι συντελεστές διόρθωσης σύνθετων αντιστάσεων στο ευθύ, αντίστροφο και ομοπολικό συμμετρικό σύστημα, εκτός από τη σύνθετη αντίσταση μεταξύ ουδέτερου σημείου και γης.
- Η χρησιμοποίηση της ελάχιστης ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης εξωτερικών δικτύων.
- Η αντίσταση R_L των γραμμών (εναέριων και καλωδίων) να εισάγεται με θερμοκρασία 20 °C.

Για τον υπολογισμό του ελάχιστου αρχικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως I_{kmin}'' απαιτείται:

- Ο συντελεστής τάσης C_{min} του Πίνακα 4-1.
- Να επιλεγεί η μέγιστη συμβολή των σταθμών παραγωγής ισχύος και των δικτύων τροφοδότησης.
- Οι συντελεστές διόρθωσης σύνθετων αντιστάσεων να ισούνται με 1.
- Να αγνοηθούν οι συνεισφορές ανεμογεννητριών, φωτοβολταϊκών και κινητήρων.
- Να εισαχθούν σε υψηλότερη θερμοκρασία οι αντιστάσεις των γραμμών.

$$R_L = [1 + \alpha \cdot (\theta_e - 20^\circ\text{C})] \cdot R_{L20} \quad (4.38)$$

όπου:

- R_{L20} είναι η αντίσταση σε θερμοκρασία 20 °C.
- θ_e είναι η θερμοκρασία του αγωγού στο τέλος της διάρκειας του βραχυκυκλώματος.
- α είναι ένας παράγοντας ίσος με 0,004/K, ο οποίος είναι αρκετά ακριβής για χαλκό, αλουμίνιο και κράματα αλουμινίου.

4.5.3 Συνεισφορά των ασύγχρονων μηχανών στο ρεύμα βραχυκυκλώσεως

Οι ασύγχρονοι κινητήρες λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό του μέγιστου ρεύματος βραχυκυκλώσεως. Οι κινητήρες χαμηλής τάσης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σε βοηθητικές μονάδες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, σε βιομηχανικές και παρόμοιες εγκαταστάσεις. Οι κινητήρες χαμηλής τάσης συνήθως συνδέονται στους ζυγούς μέσω καλωδίων, τα οποία έχουν διαφορετικό μήκος μεταξύ τους. Για διευκόλυνση των υπολογισμών, σε περίπτωση ομάδας κινητήρων, συμπεριλαμβανομένων και των καλωδίων τους, δύναται να αντικατασταθούν με έναν μόνο ισοδύναμο κινητήρα. Για τον ισοδύναμο κινητήρα ισχύουν τα παρακάτω [4]:

- Z_M σύμφωνα με (4.30)
- $I_{LR} / I_{rM} = 5$
- $R_M / X_M = 0,42$ που συνεπάγεται με $K_M = 5$
- $P_{rM} / p = 0,05 \text{ MW}$, εάν δεν είναι γνωστό, όπου p είναι ο αριθμός των ζεύγων πόλων.
- Σε περίπτωση σύνδεσης των κινητήρων μέσω μετασχηματιστή, εάν το σφάλμα είναι στην πλευρά της υψηλής τάσης, τότε αντί να χρησιμοποιηθεί στην (4.30) το άθροισμα των ονομαστικών ρευμάτων των κινητήρων, αντικαθίσταται από το ονομαστικό ρεύμα του μετασχηματιστή.

4.6 Αρχικά ρεύματα βραχυκυκλώσεως

4.6.1 Τριπολικό βραχυκύκλωμα

Το τριπολικό ή τριφασικό αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως I_k'' υπολογίζεται από την (4.39). Ένα τέτοιου είδους βραχυκυκλώματος φαίνεται στο Σχήμα 4.1(α).

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (4.39)$$

Εισάγεται ισοδύναμη πηγή τάσης $c \cdot U_n / \sqrt{3}$ στο σημείο του σφάλματος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.3, και σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώσεως $Z_k = |R_k + jX_k|$.

Εάν το σημείο βραχυκυκλώσεως τροφοδοτείται και από σταθμούς παραγωγής με μετατροπείς, τότε το μέγιστο τριπολικό αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως I_{kmax}'' υπολογίζεται από την (4.40).

$$I_{kmax}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} + \frac{1}{Z_k} \cdot \sum_{j=1}^n Z_{ij} \cdot I_{skPF_j} = I_{kmaxPFO}'' + I_{kPF}'' \quad (4.40)$$

όπου:

- I_{skPF_j} είναι η rms τιμή του ρεύματος της πηγής ρεύματος σε περίπτωση τριπολικού βραχυκυκλώματος στην πλευρά υψηλής τάσης του μετασχηματιστή, όπου δίνεται από τον κατασκευαστή.
- $Z_{ij} = Z_k$, Z_{ij} είναι οι απόλυτες τιμές των σύνθετων αντιστάσεων του πίνακα του συστήματος θετικής ακολουθίας, όπου i εκφράζει τον αριθμό του βραχυκυκλωμένου ζυγού και j τους ζυγούς από όπου προέρχεται η συνεισφορά στο αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως των σταθμών παραγωγής με μετατροπείς.
- $I_{kmaxPFO}''$ είναι το μέγιστο τριπολικό αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως χωρίς να υπολογιστεί η συνεισφορά των σταθμών παραγωγής με μετατροπείς που υπολογίζεται από την (4.38)
- I_{kPF}'' το άθροισμα των συνεισφορών των σταθμών παραγωγής με μετατροπείς στο αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως.

4.6.2 Διπολικό βραχυκύκλωμα

Σε περίπτωση διπολικού ή διφασικού βραχυκυκλώματος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1(β), το αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως υπολογίζεται από [4]:

$$I_{k2}'' = \frac{\sqrt{3}}{|\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)}|} \cdot \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \quad (4.41)$$

Εάν $\bar{Z}_{(1)} = \bar{Z}_{(2)}$, τότε η (4.41) γίνεται:

$$I_{k2}'' = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_k'' \quad (4.42)$$

4.6.3 Διπολικό βραχυκύκλωμα με επαφή γης

Σε ότι αφορά το διφασικό βραχυκύκλωμα με επαφή γης είναι απαραίτητο να γίνει διάκριση μεταξύ των αρχικών διφασικών ρευμάτων βραχυκυκλώσεως I_{k2EL2}'' , I_{k2EL3}'' , I_{kE2E}'' των αγωγών L_2, L_3 και του αγωγού που συνδέεται με την Γη αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1(γ). Εάν η ομοπολική σύνθετη αντίσταση $\bar{Z}_{(0)}$ είναι μικρότερη από $\bar{Z}_{(1)} = \bar{Z}_{(2)}$, τότε το ρεύμα I_{kE2E}'' είναι το μεγαλύτερο των αρχικών ρευμάτων βραχυκυκλώσεως ($I_k'' = I_{k3}'', I_{k2}'', I_{k2E}'', I_{k1}''$). Τα ρεύματα I_{k2EL2}'' , I_{k2EL3}'' υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις [4]:

$$I_{k2EL2}'' = \left| \frac{\sqrt{3}(\bar{Z}_{(0)} - \bar{a}\bar{Z}_{(2)})}{\bar{Z}_{(1)}\bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(1)}\bar{Z}_{(0)} + \bar{Z}_{(2)}\bar{Z}_{(0)}} \right| \cdot \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \quad (4.43)$$

$$I_{k2EL3}'' = \left| \frac{\sqrt{3}(\bar{Z}_{(0)} - \bar{a}^2\bar{Z}_{(2)})}{\bar{Z}_{(1)}\bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(1)}\bar{Z}_{(0)} + \bar{Z}_{(2)}\bar{Z}_{(0)}} \right| \cdot \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \quad (4.44)$$

Το ρεύμα I_{kE2E}'' που ρέει προς τη γη είναι:

$$I_{kE2E}'' = \left| \frac{3\bar{Z}_{(2)}}{\bar{Z}_{(1)}\bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(1)}\bar{Z}_{(0)} + \bar{Z}_{(2)}\bar{Z}_{(0)}} \right| \cdot \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \quad (4.45)$$

4.6.4 Μονοπολικό βραχυκύκλωμα

Το μονοπολικό ή μονοφασικό βραχυκύκλωμα είναι σφάλμα μεταξύ αγωγού και γης. Σε περίπτωση τέτοιου είδους βραχυκυκλώματος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1(δ), το αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως υπολογίζεται από [4]:

$$I_{k1}'' = \left| \frac{3}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}} \right| \cdot \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \quad (4.46)$$

Εάν η ομοπολική σύνθετη αντίσταση $\bar{Z}_{(0)}$ είναι μικρότερη από $\bar{Z}_{(1)} = \bar{Z}_{(2)}$, το μονοπολικό αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως I_{k1}'' είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο τριπολικό I_k'' .

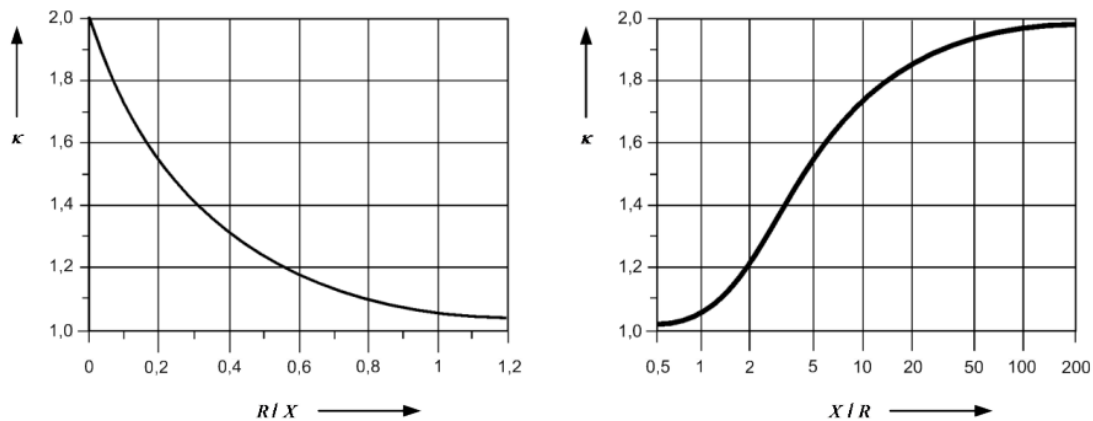
4.7 Κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως

Το κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως i_p είναι η μέγιστη στιγμιαία τιμή του ρεύματος βραχυκυκλώσεως όσον αφορά τόσο συμμετρικά όσο και ασύμμετρα σφάλματα και δίνεται από [4]:

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' \quad (4.47)$$

Ο παράγοντας κ εξαρτάται από τον λόγο R/X και υπολογίζεται από το Σχήμα 4.15 ή από την προσεγγιστική εξίσωση:

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} \quad (4.48)$$



Σχήμα 4.15: Διάγραμμα $R/X-\kappa$ και $X/R-\kappa$ [4]

Για σύγχρονες γεννήτριες και σταθμούς παραγωγής ισχύος δίνονται οι ακόλουθες τιμές ως «εικονικές» αντιστάσεις R_{Gf} , ώστε να χρησιμοποιηθούν στον λόγο R/X ως R με αρκετά καλή ακρίβεια:

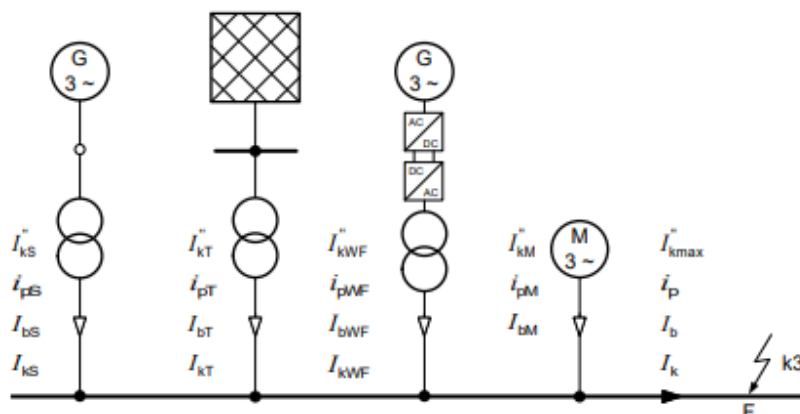
- $R_{Gf} = 0,05 \cdot x_d''$ για γεννήτριες με $U_{rG} > 1\text{kV}$ και $S_{rG} > 100\text{MVA}$.
- $R_{Gf} = 0,07 \cdot x_d''$ για γεννήτριες με $U_{rG} > 1\text{kV}$ και $S_{rG} < 100\text{MVA}$.
- $R_{Gf} = 0,15 \cdot x_d''$ για γεννήτριες με $U_{rG} \leq 1\text{kV}$.

Αυτές οι τιμές χρησιμοποιούνται μόνο για τον υπολογισμό του κρουστικού ρεύματος. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.16, το συνολικό κρουστικό ρεύμα, για ένα βραχυκύκλωμα που τροφοδοτείται από πολλά στοιχεία του συστήματος, είναι το άθροισμα όλων των επιμέρους κρουστικών ρευμάτων.

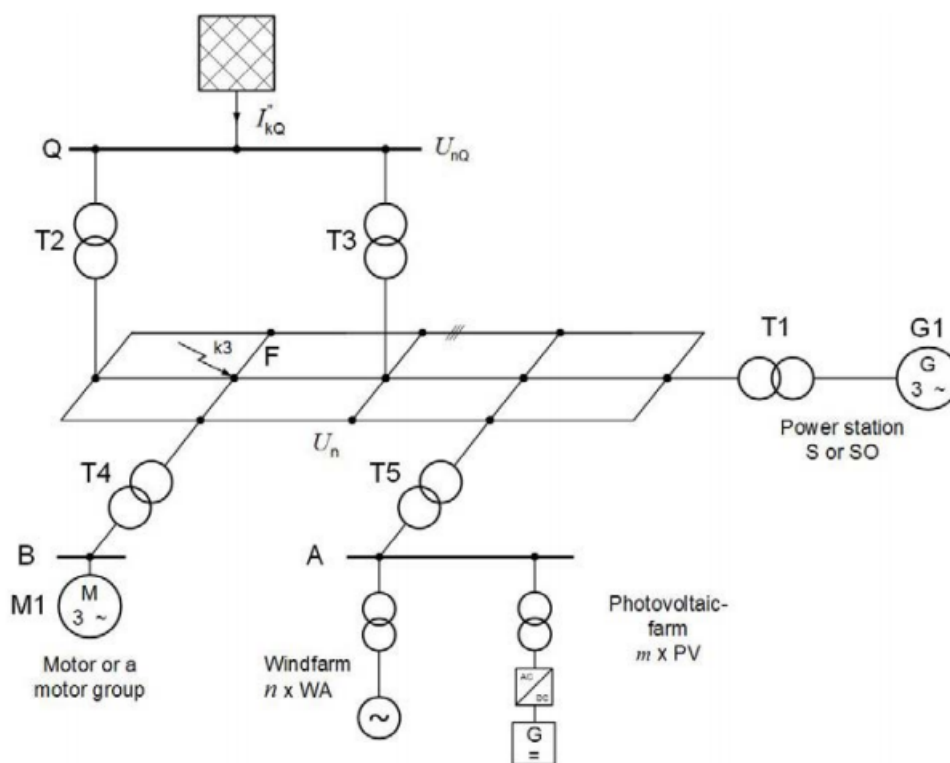
$$i_p = \sum_i i_{p_i} = i_{pS} + i_{pT} + i_{pWF} + i_{pM} \quad (4.49)$$

Για τους μετατροπείς ισχύει:

$$i_{pPF} = \sqrt{2} \cdot i_{kPF}'' = \sqrt{2} \cdot I_{skPF} \quad (4.50)$$



Σχήμα 4.16: πολλαπλό βραχυκύκλωμα μίας τροφοδοσίας στη θέση F [4]



Σχήμα 4.17: βραχυκύκλωμα πολλαπλών τροφοδοσιών στη θέση F [4]

Ο παράγοντας κ είναι δυνατό να υπολογίζεται από την (3.47) ή το Σχήμα 4.15 μόνο όταν όλοι οι παράλληλοι κλάδοι που διαρρέονται από τα επιμέρους ρεύματα βραχυκυκλώσεως έχουν τον ίδιο λόγο R/X . Διαφορετικά, είτε εάν οι παράλληλοι κλάδοι έχουν διαφορετικό λόγο R/X , είτε εάν πρόκειται για βραχυκύκλωμα πολλαπλής τροφοδότησης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.15, το κρουστικό ρεύμα

υπολογίζεται από την (3.47). Για τον υπολογισμό του λόγου R/X πρέπει να επιλεγεί μία από τις παρακάτω μεθόδους [4]:

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k_{\max PFO}}'' + \sqrt{2} \cdot I_{kPF}'' \quad (4.51)$$

- Μικρότερος λόγος R/X : υπολογίζονται όλοι οι λόγοι R/X των επιμέρους κλάδων και επιλέγεται ο μικρότερος. Έτσι προκύπτει ο παράγοντας κ .
- Λόγος R_k/X_k στο σημείο του σφάλματος: υπολογίζεται ο λόγος R_k/X_k που προκύπτει από την ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση $\bar{Z}_k = R_k + jX_k$ που «φαίνεται» από την τοποθεσία του σφάλματος. Έτσι, προκύπτει ο παράγοντας κ , ο οποίος πολλαπλασιάζεται με 1,15. Εάν $R_k/X_k < 0,3$ δεν είναι απαραίτητος ο συντελεστής 1,15. Επίσης, ισχύουν οι περιορισμοί για τον παράγοντα: $1,15 \cdot \kappa \leq 1,8$ σε χαμηλή τάση και $1,15 \cdot \kappa \leq 2$ υψηλή τάση.
- Ισοδύναμη συχνότητα f_c : ο λόγος R/X προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \cdot \frac{f_c}{f_c} \quad (4.52)$$

όπου:

$Z_c = R_c + jX_c$ είναι μία ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας όπως «φαίνεται» στο σημείο του σφάλματος και υπολογίζεται στη συχνότητα $f_c = 20\text{Hz}$ για ονομαστική συχνότητα $f = 50\text{Hz}$ ή $f_c = 24\text{Hz}$ για ονομαστική συχνότητα $f = 60\text{Hz}$.

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για τον υπολογισμό του κρουστικού ρεύματος διπολικού βραχυκυκλώματος με i_{p2EL2} (π.χ. για την φάση L2) ή χωρίς επαφή γης i_{p2} και μονοπολικού i_{p1} ρεύματος βραχυκυκλώσεως. Όπου:

$$i_{p2EL2} = \kappa \sqrt{2} I_{k2EL2}'' \quad (4.53)$$

$$i_{p2} = \kappa \sqrt{2} I_{k2}'' \quad (4.54)$$

$$i_{p1} = \kappa \sqrt{2} I_{k1}'' \quad (4.55)$$

Ο παράγοντας κ υπολογίζεται ανάλογα με τη διαμόρφωση του συστήματος.

4.8 Ρεύμα διακοπής

4.8.1 Ρεύμα διακοπής σύγχρονων μηχανών

Το μέγεθος της εναλλασσόμενης συνιστώσας του ρεύματος βραχυκυκλώσεως ελαττώνεται βάσει της υπομεταβατικής και μεταβατικής σταθεράς χρόνου. Συνεπώς, κατά τη στιγμή της διακοπής οι διακόπτες καταπονούνται με το ρεύμα διακοπής I_b , το οποίο σε ορισμένες περιπτώσεις (σφάλματα «κοντά» σε σύγχρονες μηχανές ή κοντά σε μεγάλους ασύγχρονους κινητήρες), είναι μικρότερο από το αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως I_k'' [6].

Από την εξέταση των χρονικών συναρτήσεων του ρεύματος βραχυκυκλώσεως διάφορων γεννητριών προκύπτει ο συντελεστής μ , που επιτρέπει με επαρκή ακρίβεια τον υπολογισμό του ρεύματος διακοπής από το αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως [6]:

$$I_b = \mu I_{k\max}'' \quad (4.56)$$

Το Σχήμα 4.16 δείχνει το συντελεστή μ ως συνάρτηση του αρχικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως I_{rG}'' της γεννήτριας ανηγμένου στο ονομαστικό της ρεύμα I_{rG} . Η ελάχιστη διάρκεια βραχυκυκλώσεως t_{\min} είναι ο ελάχιστος χρόνος από την στιγμή εμφάνισης του σφάλματος μέχρι το άνοιγμα του πρώτου πόλου του διακόπτη. Ο χρόνος t_{\min} είναι το άθροισμα του χρόνου λειτουργίας των ηλεκτρονόμων και του χρόνου λειτουργίας του διακόπτη (ελάχιστος χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος). Οι τυχόν ρυθμιζόμενες χρονικές καθυστερήσεις δεν λαμβάνονται υπόψη [6].

Οι τιμές του μ σύμφωνα με το Σχήμα 4.16 ισχύουν για σύγχρονες μηχανές (γεννήτριες, κινητήρες, στρεφόμενοι πυκνωτές) με κυλινδρικό δρομέα και με έκτυπους πόλους, εάν το ρεύμα διέγερσης παρέχεται από γεννήτρια συνεχούς ρεύματος. Το Σχήμα 4.16 δύναται να χρησιμοποιηθεί, εάν η μέγιστη τάση διέγερσης δεν είναι μεγαλύτερη από τη διέγερση υπό ονομαστικό ρεύμα επί 1,6 και ισχύει $t_{\min} < 0.25s$. Στις άλλες περιπτώσεις, λαμβάνεται $\mu = 1$ [6]. Επίσης, ο παράγοντας μ σύγχρονων μηχανών μπορεί να υπολογιστεί και από τον Πίνακα 4-4.

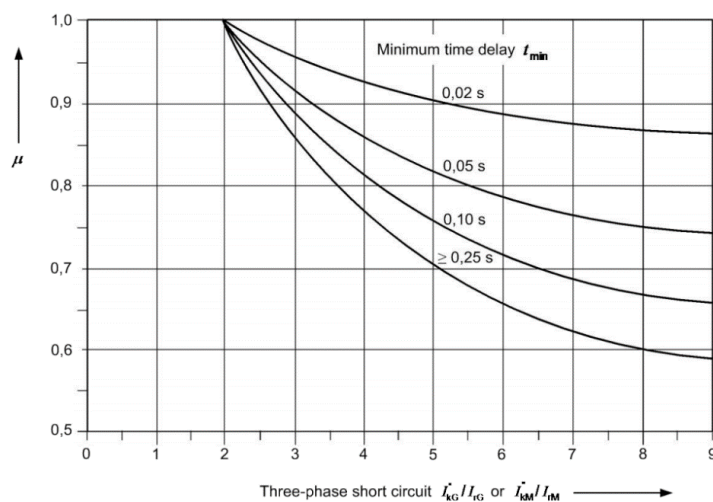
Πίνακας 4-4: Παράγοντας μ για διάφορες τιμές του t_{\min} .

μ	t_{\min}
$0,84 + 0,26 \cdot e^{-0,26 \cdot I_{kG}'' / I_{rG}}$	0,02s
$0,71 + 0,51 \cdot e^{-0,30 \cdot I_{kG}'' / I_{rG}}$	0,05s
$0,62 + 0,72 \cdot e^{-0,32 \cdot I_{kG}'' / I_{rG}}$	0,1s
$0,56 + 0,94 \cdot e^{-0,38 \cdot I_{kG}'' / I_{rG}}$	$\geq 0,25s$

Εάν $I_{kG}'' / I_{rG} \leq 2$, τότε εφαρμόζεται για όλες τις τιμές του t_{\min} , $\mu = 1$. Όταν υπάρχει ένας μετασχηματιστής μεταξύ της γεννήτριας και του σημείου του σφάλματος, τότε ισχύει:

$$I_{kG}'' = t_r \cdot I_{kS}'' \quad (4.57)$$

Όπου I_{kS}'' είναι το επιμέρους αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως στην πλευρά υψηλής τάσης του μετασχηματιστή. Επιτρέπεται γραμμική παρεμβολή στο Σχήμα 4.18 για τις άλλες τιμές του t_{\min} .



Σχήμα 4.18: Συντελεστής μ για τον υπολογισμό του ρεύματος διακοπής σύγχρονων μηχανών [4]

4.8.2 Ρεύμα διακοπής ασύγχρονων μηχανών

Το ρεύμα διακοπής ασύγχρονων κινητήρων υπολογίζεται σύμφωνα με την (4.58), ο παράγοντας μ σύμφωνα με τον Πίνακα 4-4 ή το Σχήμα 4.18 και ο όρος g από τον Πίνακα 4-5 [4].

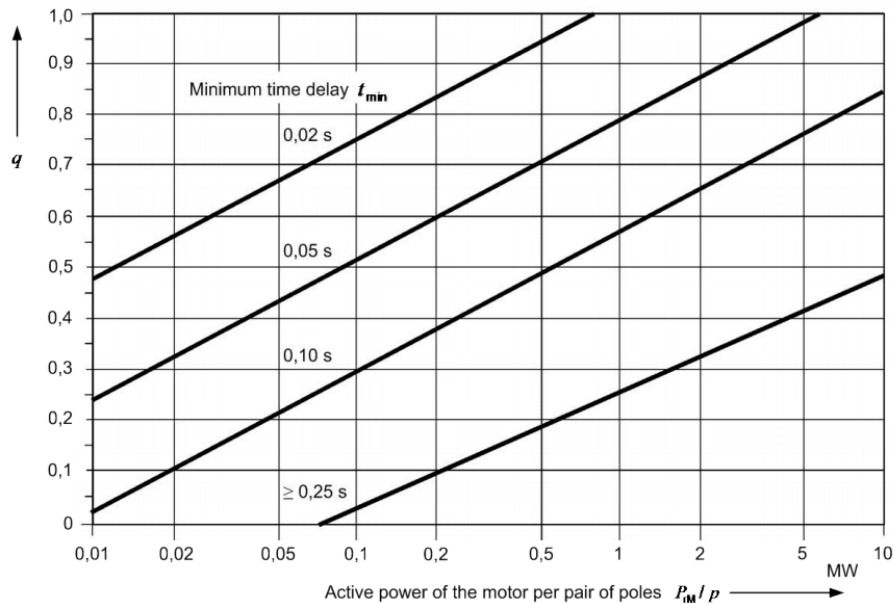
$$I_b = \mu \cdot q \cdot I''_{k\max} \quad (4.58)$$

Η (4.58) χρησιμοποιείται και για αιολικούς σταθμούς με αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως I''_{kWA} .

Πίνακας 4-5: Παράγοντας για διάφορες τιμές του q .

q	t_{\min}
$1,03 + 0,12 \ln(P_{rM} / p)$	0,02s
$0,79 + 0,12 \ln(P_{rM} / p)$	0,05s
$0,57 + 0,12 \ln(P_{rM} / p)$	0,1s
$0,26 + 0,10 \ln(P_{rM} / p)$	$\geq 0,25s$

P_{rM} είναι η ονομαστική ενεργός ισχύς σε MW και p ο αριθμός ζευγών πόλων. Επίσης, ισχύει ο περιορισμός $q \leq 1$.



Σχήμα 4.19: Συντελεστής q για τον υπολογισμό του ρεύματος διακοπής σύγχρονων μηχανών [4]

4.8.3 Ρεύμα διακοπής δικτύων

Το ρεύμα διακοπής ενός δικτύου τροφοδότησης υπολογίζεται από [4]:

$$I_b = I''_{k\max} \quad (4.59)$$

4.8.4 Συνολικό ρεύμα διακοπής

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.16 το συνολικό ρεύμα διακοπής, για ένα βραχυκύκλωμα που τροφοδοτείται από πολλά στοιχεία του συστήματος, είναι το άθροισμα όλων των επιμέρους ρευμάτων διακοπής [4].

$$I_b = \sum_i I_{b_i} = I_{bS} + I_{bT} + I_{bM} + I_{bWF} = \mu \cdot I''_{kS} + I''_{kT} + \mu \cdot q \cdot I''_{kM} + I''_{kWfmax} \quad (4.60)$$

Ενώ για ένα βραχυκύκλωμα πολλαπλών τροφοδοσιών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.17, το συνολικό ρεύμα διακοπής είναι:

$$I_b = I''_{kmax} \quad (4.61)$$

Για μεγαλύτερη ακρίβεια, το συνολικό ρεύμα διακοπής υπολογίζεται από:

$$\begin{aligned} I_b = I''_{kmax} - \sum_i \frac{\bar{Z}_{GKi} \cdot I''_{kGi}}{c \cdot U_n / \sqrt{3}} \cdot (1 - \mu_i) \cdot I''_{kGi} - \sum_j \frac{\bar{Z}_{Mj} \cdot I''_{kMi}}{c \cdot U_n / \sqrt{3}} \cdot (1 - \mu_j \cdot q_j) \cdot I''_{kMj} - \\ \sum_k \frac{\bar{Z}_{SKk} \cdot I''_{kSk}}{c \cdot U_n / \sqrt{3}} \cdot (1 - \mu_k) \cdot I''_{kSk} - \sum_l \frac{\bar{Z}_{SOl} \cdot I''_{kSOl}}{c \cdot U_n / \sqrt{3}} \cdot (1 - \mu_l) \cdot I''_{kSOl} - \\ \sum_m \frac{\bar{Z}_{WAm} \cdot I''_{kWAm}}{c \cdot U_n / \sqrt{3}} \cdot (1 - \mu_m) \cdot I''_{kWAm} - \sum_n \frac{\bar{Z}_{WDn} \cdot I''_{kWDn}}{c \cdot U_n / \sqrt{3}} \cdot (1 - \mu_n) \cdot I''_{kWDn} \end{aligned} \quad (4.62)$$

Τα επιμέρους αρχικά ρεύματα βραχυκυκλώσεως και οι σύνθετες αντιστάσεις πρέπει να είναι ανηγμένα στην τάση βραχυκυκλώσεως U_n .

4.8.5 Ρεύμα διακοπής ασύμμετρου βραχυκυκλώματος

Το ρεύμα διακοπής ασύμμετρου βραχυκυκλώματος ισούται με το μέγιστο αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως [4]:

$$I_{b2} = I''_{k2max} \quad (4.63)$$

$$I_{b2E} = I''_{kE2max} \quad (4.64)$$

$$I_{b1} = I''_{k1max} \quad (4.65)$$

4.9 Συνιστώσα συνεχούς ρεύματος του ρεύματος βραχυκυκλώσεως

Η μέγιστη συνιστώσα συνεχούς ρεύματος ή DC συνιστώσα του ρεύματος βραχυκυκλώσεως υπολογίζεται με ακρίβεια από [4]:

$$i_{DC} = \sqrt{2} \cdot I_k'' \cdot e^{-2\pi \cdot f \cdot t \cdot R/X} \quad (4.66)$$

Όπου, f είναι η ονομαστική συχνότητα και t ο χρόνος. Πρέπει να χρησιμοποιείται η πραγματική αντίσταση R_G των γεννητριών και όχι η «πλασματική», R_{Gf} . Για συστήματα με παράλληλες διακλαδώσεις όπως στο Σχήμα 4.15, χρησιμοποιείται η μέθοδος της ισοδύναμης συχνότητας για την εύρεση του λόγου R/X . Επίσης, ισχύει ο Πίνακας 4-6, για την εύρεση του λόγου f_c/f .

Πίνακας 4-6: λόγος f_c/f

f_c/f	$f \cdot t$
0,27	<1
0,15	<2,5
0,092	<5
0,055	<12,5

Για παράδειγμα, η DC συνιστώσα του ρεύματος βραχυκυκλώσεως χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ασύμμετρου ρεύματος διακοπής I_{basyn} σύμφωνα με:

$$I_{basyn} = \sqrt{I_b^2 + i_{DC}^2} = I_b \sqrt{1 + \left(\frac{i_{DC}}{I_b}\right)^2} \quad (4.67)$$

4.10 Μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως

Ο υπολογισμός του μόνιμου ρεύματος βραχυκυκλώσεως I_k είναι λιγότερο ακριβής από τον υπολογισμό του αρχικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως, επειδή εξαρτάται από τη διέγερση των γεννητριών, τον μαγνητικό κορεσμό και την αλλαγή της δομής του ΣΗΕ με το άνοιγμα αυτόματων διακοπών κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος [6].

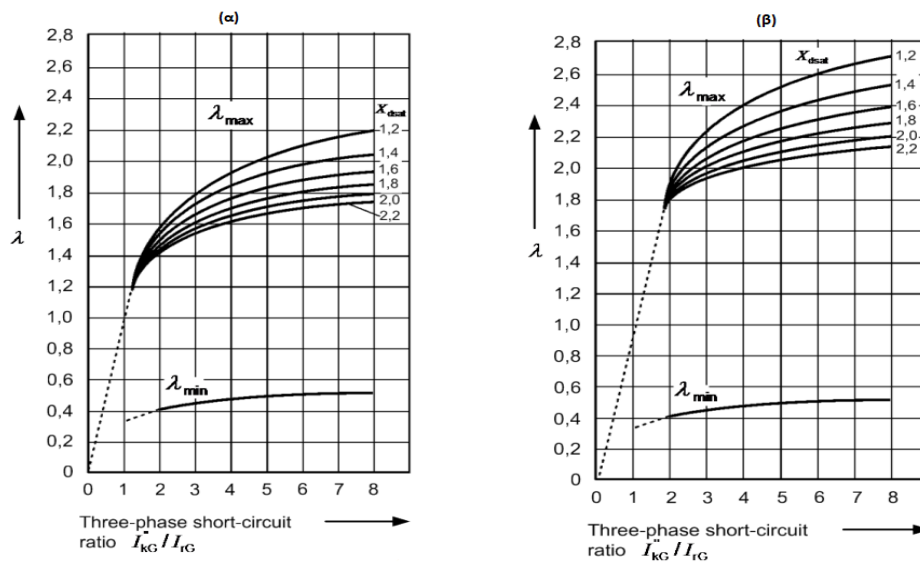
4.10.1 Τριφασικό βραχυκύκλωμα

4.10.1.1 Μέγιστο μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως σύγχρονων γεννητριών

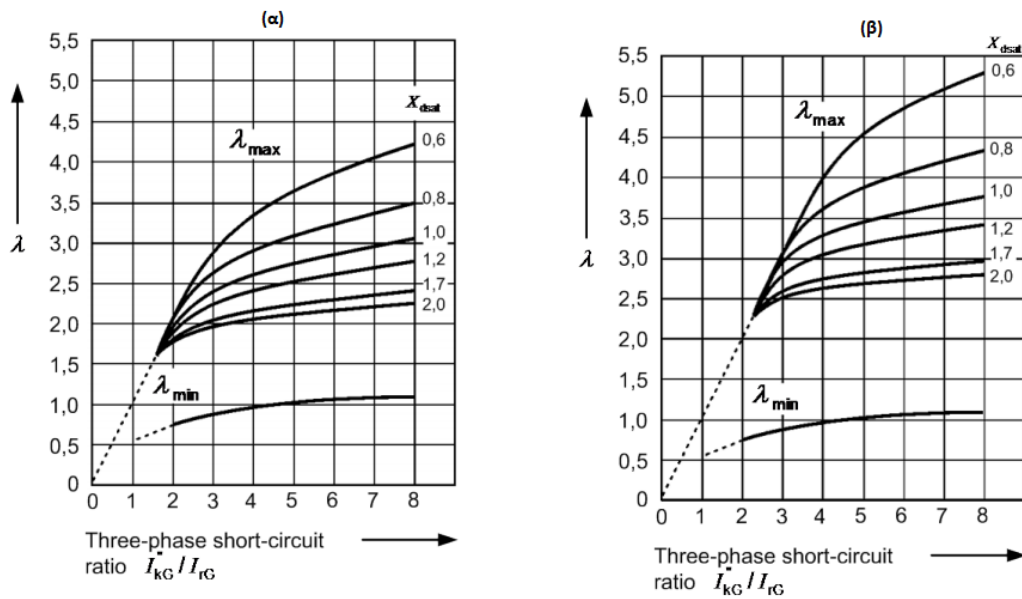
Για τον υπολογισμό του μέγιστου μόνιμου ρεύματος βραχυκυκλώσεως I_{kmax} , οι σύγχρονες γεννήτριες πρέπει να είναι υπό μέγιστη διέγερση. Υπολογίζεται από [4]:

$$I_{kmax} = \lambda_{max} \cdot I_{rG} \quad (4.68)$$

Ο συντελεστής λ_{\max} λαμβάνεται από τα Σχήματα 4.20(α) και 4.20(β) για γεννήτριες με κυλινδρικό δρομέα και 4.20(γ) και 4.20(δ) για γεννήτριες με έκτυπους πόλους. Παράμετρος είναι η ανηγμένη τιμή της κορεσμένης σύγχρονης αντίστασης x_d . Η τιμή αυτή είναι ο αντίστροφος λόγος βραχυκυκλώσεως, ο οποίος είναι ο λόγος του ρεύματος διεγέρσεως κενής λειτουργίας για ονομαστική τάση, προς το απαιτούμενο ρεύμα διεγέρσεως ώστε το μόνιμο ρεύμα τριπολικού βραχυκυκλώματος των ακροδεκτών της γεννήτριας να είναι ίσο με το ονομαστικό του ρεύμα [6]. Οι τιμές λ_{\max} ισχύουν για βραχυκύκλωμα μετά από προγενέστερη φόρτιση με ονομαστική ισχύ και ονομαστικό συντελεστή ισχύος. Οι καμπύλες λ_{\max} εξαρτώνται από τη μέγιστη τάση διεγέρσεως $E_{\delta\max}$ [6].



Σχήμα 4.20: Συντελεστές $\lambda_{\min}, \lambda_{\max}$ για γεννήτρια με κυλινδρικό δρομέα: α) Για $E_{\delta\max} = 1,3 \cdot E_{\delta n}$ και β) Για $E_{\delta\max} = 1,6 \cdot E_{\delta n}$ [4]



Σχήμα 4.21: Συντελεστές $\lambda_{min}, \lambda_{max}$ για γεννήτρια με έκτυπους πόλους: α) Για $E_{\delta_{max}} = 1,6 \cdot E_{\delta_n}$ και β) για $E_{\delta_{max}} = 2,0 \cdot E_{\delta_n}$ [4]

4.10.1.2 Ελάχιστο μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως σύγχρονων γεννητριών

Το ελάχιστο μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως, για την περίπτωση βραχυκυκλώματος που τροφοδοτείται από μία γεννήτρια ή έναν σταθμό παραγωγής ισχύος, υπό διέγερση κενής λειτουργίας είναι:

$$I_{kmin} = \lambda_{min} \cdot I_{rG} \quad (4.69)$$

Για τον υπολογισμό του ελάχιστου μόνιμου ρεύματος βραχυκυκλώσεως, για σφάλμα «κοντά» σε γεννήτριες, που τροφοδοτείται από παρόμοιες παράλληλες γεννήτριες με σύγχρονη διέγερση, χρησιμοποιείται η παρακάτω εξίσωση:

$$I_{kmin} = \frac{c_{min} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} \quad (4.70)$$

Η αντίδραση των γεννητριών είναι:

$$X_{dP} = \frac{U_{rG}}{\sqrt{3} \cdot I_{kP}} \quad (4.71)$$

Όπου, I_{kP} είναι το μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως των γεννητριών για τριπολικό βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες τους και η τιμή του πρέπει να δίνεται από τον κατασκευαστή.

4.10.1.3 Μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως ασύγχρονων μηχανών

Το μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως ασύγχρονων μηχανών για βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες τους είναι μηδέν [4].

$$I_k = 0 \quad (4.72)$$

4.10.1.4 Μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως δικτύων

Το μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως, των δικτύων ισούται με το αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως [4].

$$I_k = I_k'' \quad (4.73)$$

4.10.1.5 Συνολικό μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως

Το συνολικό μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως υπολογίζεται από το άθροισμα των επιμέρους μόνιμων ρευμάτων βραχυκυκλώσεως όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.16 [4].

$$I_k = \sum_i I_{k_i} = I_{kS} + I_{kT} + I_{kWF} \quad (4.74)$$

όπου,

$I_{kS} = \lambda \cdot I_{rGt}$, I_{rGt} είναι το ονομαστικό ρεύμα σύγχρονης γεννήτριας στην πλευρά υψηλής τάσης.

$I_{kT} = I_{kT}''$ για σφάλμα «μακριά» από τις γεννήτριες.

Όσο αφορά το βραχυκύκλωμα πολλαπλών τροφοδοσιών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.17, το συνολικό μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως υπολογίζεται από:

$$I_{kmax} = I_{bMO} \quad (4.75)$$

$$I_{kmin} = I_{kmin}'' \quad (4.76)$$

όπου, I_{bMO} υπολογίζεται σύμφωνα με την (4.62) χωρίς να ληφθεί υπόψη η επίδραση των ασύγχρονων μηχανών.

4.10.2 Ασύμμετρο βραχυκύκλωμα

Για κάθε περίπτωση ασύμμετρου βραχυκυκλώματος το μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως υπολογίζεται από [4]:

$$I_{k2} = I_{k2}'' \quad (4.77)$$

$$I_{k2E} = I_{k2E}'' \quad (4.78)$$

$$I_{kE2E} = I''_{kE2E} \quad (4.79)$$

$$I_{k1} = I''_{k1} \quad (4.80)$$

5 Παραδείγματα Υπολογισμών Ρευμάτων

Βραχυκυκλώσεως

5.1 Γενικά

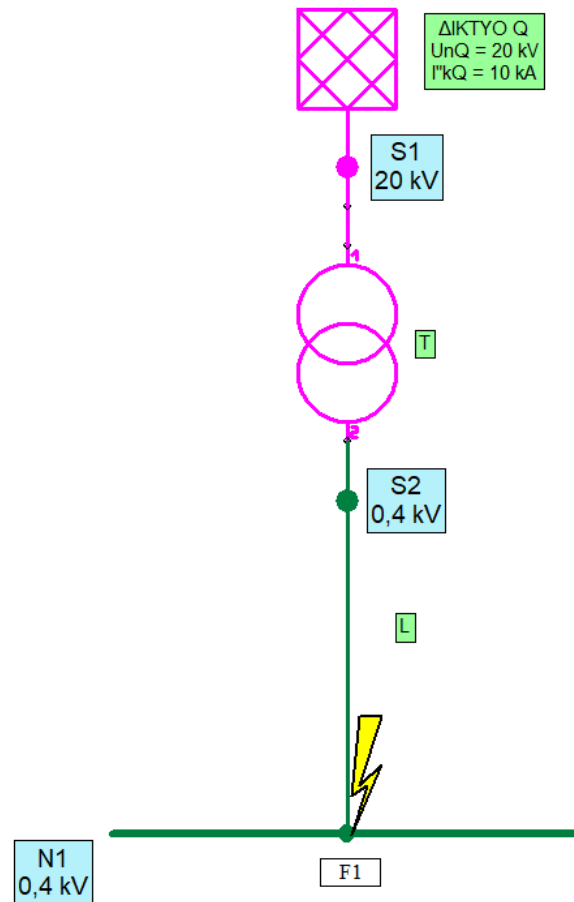
Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται παραδείγματα βραχυκυκλωμάτων σε δίκτυα χαμηλής μέσης και υψηλής τάσεως. Η ανάλυση των μεγεθών βραχυκυκλώσεως γίνεται μέσω υπολογισμών σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60909-0:2016, μέσω του συστήματος ανά μονάδα (per-unit) και μέσω του λογισμικού Neplan.

5.2 Απλό δίκτυο διανομής μέσης και χαμηλής τάσης

Ένα δίκτυο Q 20 kV, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1, τροφοδοτεί έναν μετασχηματιστή T, που συνδέεται σε έναν ζυγό μέσω ενός καλωδίου L το οποίο αποτελείται από δύο παράλληλα καλώδια [7].

Πίνακας 5-1: Δεδομένα δικτύου

Στοιχείο	Δεδομένα
Δίκτυο Q	$U_{nQ} = 20\text{kV}$, $I''_{kQ} = 10\text{kA}$,
Καλώδιο L	$\ell = 4\text{m}$, $3 \times 185\text{mm}^2\text{Al}$, $Z'_L = (0,208 + j \cdot 0,068)\Omega/\text{km}$, $R_{(0)L} = 4,23 \cdot R_L$, $X_{(0)L} = 1,21 \cdot X_L$
Μετασχηματιστής T	$t_r = 20\text{kV} / 410\text{V}$, $S_{rT} = 400\text{kVA}$, $u_{kr} = 4\%$, $P_{krT} = 4,6\text{kW}$, $R_{(0)T} / R_T = 1$, $X_{(0)T} / X_T = 0,95$



Σχήμα 5.1: δίκτυο διανομής με βραχυκύκλωμα στον ζυγό N1

5.2.1 Υπολογισμοί σφάλματος F1

Για τον υπολογισμό του τριπολικού και μονοπολικού βραχυκυκλώματος στη θέση F1 να υπολογιστούν τα παρακάτω:

Οι σύνθετες αντιστάσεις κάθε στοιχείου του δικτύου.

Το αρχικό μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώσεως στο σημείο F1.

Το κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως στο σημείο F1.

Το βραχυκύκλωμα είναι στο σημείο F1 και θεωρείται ότι είναι “μακριά” από τις γεννήτριες.

5.2.1.1 Επίλυση με υπολογισμούς

Τριπολικό βραχυκύκλωμα στη θέση F1:

Αρχικά, γίνεται υπολογισμός των σύνθετων αντιστάσεων όλων των στοιχείων του συστήματος σύμφωνα με το Κεφάλαιο 3.

Σύνθετη αντίσταση δικτύου (στην πλευρά LV):

Το βραχυκύκλωμα τροφοδοτείται από το δίκτυο Q, το οποίο είναι σε σύνδεση μέσω του μετασχηματιστή T. Άρα στη σύνθετη αντίσταση του δικτύου πρέπει να συνυπολογιστεί και ο λόγος μετασχηματισμού t_r . Επιλέγεται $c_{Qmax} = 1,1$ από τον Πίνακα 4-1, αφού $U_{nQ} = 20kV$. Έτσι, σύμφωνα με την (4.25α):

$$Z_{Qt} = \frac{c_{Qmax} U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2} = \frac{1,1 \cdot 20 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{410}{20 \cdot 10^3} \right)^2 = 0,5337m\Omega \quad (5.1)$$

Το δίκτυο έχει ονομαστική τάση $\leq 35kV$ και δεν δίνεται η σύνθετη αντίστασή του από τον κατασκευαστή, άρα από (4.25β), (4.25γ) ισχύει:

$$X_{Qt} = 0,995 \cdot Z_{Qt} = 0,5311m\Omega \quad (5.2)$$

$$R_{Qt} = 0,1 \cdot X_{Qt} = 0,0531m\Omega \quad (5.3)$$

Άρα,

$$\bar{Z}_{Qt} = (0,0531 + j0,5311)m\Omega \quad (5.4)$$

Σύνθετη αντίσταση μετασχηματιστή T:

Σύμφωνα με (4.25α) – (4.25γ) ισχύει:

$$Z_{TLV} = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{S_{rT}} = \frac{4}{100} \cdot \frac{(410)^2}{400 \cdot 10^3} = 16,81m\Omega \quad (5.5)$$

$$R_{TLV} = P_{krT} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{S_{rT}^2} = 4,6 \cdot 10^3 \cdot \frac{(410)^2}{(400 \cdot 10^3)^2} = 4,8329m\Omega \quad (5.6)$$

$$X_{TLV} = \sqrt{Z_{TLV}^2 - R_{TLV}^2} = 16,1003m\Omega \quad (5.7)$$

Άρα,

$$\bar{Z}_{TLV} = (4,8329 + j \cdot 16,1003)m\Omega \quad (5.8)$$

Πρέπει να εισαχθεί ο συντελεστής διόρθωσης του μετασχηματιστή. Οπότε, από (4.26) ισχύει:

$$x_T = X_T \cdot \frac{S_{rT}}{U_{rTLV}^2} = 16,1003 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{400 \cdot 10^3}{410^2} = 0,0383 pu \quad (5.9)$$

Επιλέγεται $c_{\max} = 1,05$ από τον Πίνακα 4-1, αφού $U_{rTLV} \leq 1\text{kV}$. Ο συντελεστής διόρθωσης του μετασχηματιστή Τ από (4.26) είναι:

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_T} = 0,95 \cdot \frac{1,05}{1 + 0,6 \cdot 0,0383} = 0,9751 \quad (5.10)$$

Έτσι η διορθωμένη σύνθετη αντίσταση από την (4.26) είναι:

$$\bar{Z}_{TK} = K_T \cdot \bar{Z}_{TLV} = (4,7125 + j15,6992)\text{m}\Omega \quad (5.11)$$

Σύνθετη αντίσταση καλωδίου L:

Το καλώδιο L αποτελείται από δύο όμοια παράλληλα καλώδια (L1, L2). Οπότε η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του καλωδίου L είναι:

$$\bar{Z}_L = \frac{\bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_{L2}}{\bar{Z}_{L1} \cdot \bar{Z}_{L2}} = 0,5 \cdot \bar{Z}_L = 0,5 \cdot (0,208 + j0,068) \cdot 4 \cdot 10^{-3} = (0,416 + j0,136)\text{m}\Omega \quad (5.12)$$

Η συνολική σύνθετη αντίσταση που «φαίνεται» από το σημείο F1 είναι το άθροισμα όλων των σύνθετων αντιστάσεων του μοναδικού κλάδου του συστήματος:

$$\bar{Z}_K = \bar{Z}_{QT} + \bar{Z}_{TK} + \bar{Z}_L = (5,1816 + j16,3663)\text{m}\Omega \quad (5.13)$$

Υπολογισμός αρχικού μέγιστου και κρουστικού τριπολικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως:

Επιλέγεται $c_{\max} = 1,05$ από τον Πίνακα 3-1, αφού $U_n \leq 1\text{kV}$. Σύμφωνα με την (4.36) το μέγιστο αρχικό μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι:

$$I_k'' = \frac{c_{\max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{1,05 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 17,167 \cdot 10^{-3}} = 14,1252\text{kA} \quad (5.14)$$

Ο όρος K υπολογίζεται μέσω του λόγου R/X από (4.52).

$$\frac{R}{X} = \frac{R_k}{X_k} = \frac{5,1816 \cdot 10^{-3}}{16,3663 \cdot 10^{-3}} = 0,3166 \quad (5.15)$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R}{X}} = 1,3991 \quad (5.16)$$

Έτσι, από την (4.47) το κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι:

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' = 27,9481\text{kA} \quad (5.17)$$

Μονοπολικό βραχυκύκλωμα στη θέση F1:

Αρχικά, γίνεται υπολογισμός των σύνθετων ομοπολικών αντιστάσεων όλων των στοιχείων του δικτύου σύμφωνα με το Κεφάλαιο 4.

Υπολογισμός ομοπολικής σύνθετης αντίστασης του μετασχηματιστή T:

$$R_{(0)T} = R_T = 4,7125\text{m}\Omega \quad (5.18)$$

$$X_{(0)T} = 0,95 \cdot X_T = 15,2953\text{m}\Omega \quad (5.19)$$

Έτσι η διορθωμένη ομοπολική σύνθετη αντίσταση από (4.26) είναι:

$$\bar{Z}_{(0)TK} = K_T \cdot (R_{(0)T} + jX_{(0)T}) = (4,7125 + j14,9142)\text{m}\Omega \quad (5.20)$$

Υπολογισμός ομοπολικής σύνθετης αντίστασης του καλωδίου L:

$$\bar{Z}_{(0)L} = (4,23 \cdot R_L + j \cdot 1,21 \cdot X_L) = (1,7597 + j0,1646)\text{m}\Omega \quad (5.21)$$

Συνολική σύνθετη αντίσταση, για μονοπολικό βραχυκύκλωμα, που «φαίνεται» από το σημείο F1 είναι το άθροισμα όλων των σύνθετων αντιστάσεων του μοναδικού κλάδου του συστήματος:

$$\bar{Z}_{(1)} = \bar{Z}_{(2)} = \bar{Z}_K = (5,1816 + j16,3663)\text{m}\Omega \quad (5.22)$$

$$\bar{Z}_{(0)} = \bar{Z}_{(0)TK} + \bar{Z}_{(0)L} = (6,4721 + j15,0788)\text{m}\Omega \quad (5.23)$$

$$\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)} = (16,8353 + j47,8114)\text{m}\Omega \quad (5.24)$$

Υπολογισμός αρχικού μέγιστου και κρουστικού μονοπολικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως:

Επιλέγεται $c_{\max} = 1,05$ από τον Πίνακα 4-1, αφού $U_n \leq 1\text{kV}$. Σύμφωνα με την (4.46) το αρχικό μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι:

$$I''_{k1} = \left| \frac{3}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}} \right| \cdot \frac{c_{\max} \cdot U_n}{\sqrt{3}} = \frac{1,05 \cdot 400 \cdot \sqrt{3}}{50,6888 \cdot 10^{-3}} = 14,3515\text{kA} \quad (5.25)$$

Ο όρος K υπολογίζεται μέσω του λόγου R/X από την (4.52).

$$\frac{R}{X} = \frac{16,8353}{47,8114} = 0,3521 \quad (5.26)$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R}{X}} = 1,3608 \quad (5.27)$$

Έτσι, από την (4.47) το κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι:

$$i_{p1} = \kappa \sqrt{2} I_{k1}'' = 27,6182 \text{ kA} \quad (5.28)$$

5.2.1.2 Επίλυση στο σύστημα per-unit

Στο σύστημα per-unit επιλέγεται:

- Βάση ισχύος $S_b = 400 / 3 \text{ kVA}$.
- Βάση τάσης στο σημείο βραχυκυκλώσεως F1: $U_b = 410 / \sqrt{3} \text{ V}$.

$$Z_b = \frac{U_b^2}{S_b} = \frac{(410 / \sqrt{3})^2}{400 \cdot 10^3 / 3} = 0,4203 \Omega \quad (5.29)$$

Τριπολικό βραχυκύκλωμα στη θέση F1:

Αρχικά, γίνεται υπολογισμός των σύνθετων αντιστάσεων (pu) όλων των στοιχείων του συστήματος.

Σύνθετη αντίσταση (pu) δικτύου:

Από την επίλυση με υπολογισμούς ισχύει: $\bar{Z}_{Qt} = (0,0531 + j0,5311) \text{ m}\Omega$. Συνεπώς, η σύνθετη αντίσταση (pu) του μετασχηματιστή T είναι:

$$\bar{Z}_{Qt}(\text{pu}) = \frac{\bar{Z}_{Qt}}{Z_b} = \frac{(0,0531 + j0,5311) \cdot 10^{-3}}{0,4203} = (0,0001 + j0,0013) \cdot 10^{-3} \text{ pu} \quad (5.30)$$

Σύνθετη αντίσταση μετασχηματιστή T (pu):

Από την επίλυση με υπολογισμούς ισχύει: $\bar{Z}_{TK} = K_T \cdot \bar{Z}_{TLV} = (4,7125 + j15,6992) \text{ m}\Omega$. Συνεπώς, η σύνθετη αντίσταση (pu) του μετασχηματιστή T είναι:

$$\bar{Z}_{TK}(\text{pu}) = \frac{\bar{Z}_{TK}}{Z_b} = \frac{(4,7125 + j15,6992) \cdot 10^{-3}}{0,4203} = (0,0112 + j0,0374) \text{ pu} \quad (5.31)$$

Σύνθετη αντίσταση (pu) καλωδίου L:

Από την επίλυση με υπολογισμούς ισχύει: $\bar{Z}_L = (0,416 + j0,136)m\Omega$. Συνεπώς, η σύνθετη αντίσταση (ρu) του καλωδίου L είναι:

$$\bar{z}_L(\rho u) = \frac{\bar{Z}_L}{Z_b} = \frac{(0,416 + j0,136) \cdot 10^{-3}}{0,42025} = (0,0009 + j0,0003)\rho u \quad (5.32)$$

Η συνολική σύνθετη αντίσταση (ρu) που «φαίνεται» από το σημείο F1 είναι το άθροισμα όλων των σύνθετων αντιστάσεων του μοναδικού κλάδου του συστήματος:

$$\bar{z}_k(\rho u) = \bar{z}_{\alpha t}(\rho u) + \bar{z}_{\kappa T}(\rho u) + \bar{z}_L(\rho u) = (0,0123 + j0,0389)\rho u \quad (5.33)$$

Υπολογισμός αρχικού και κρουστικού τριπολικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως:

Η τιμή της τάσεως (ρu) στο σημείο F1 είναι:

$$u_{F1}(\rho u) = \frac{U_{N1}}{U_b} = \frac{400/\sqrt{3}}{410/\sqrt{3}} = 0,9756\rho u \quad (5.34)$$

Η τιμή του μέγιστου τριπολικού αρχικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως (ρu) στο σημείο F1 είναι:

$$i_k''(\rho u) = \frac{c_{\max} \cdot u_{F1}(\rho u)}{z_k(\rho u)} = \frac{1,05 \cdot 0,9756}{0,0408} = 25,0772\rho u \quad (5.35)$$

Η βάση ρεύματος είναι:

$$I_b = \frac{S_b}{U_b} = \frac{400/3 \cdot 10^3}{410/\sqrt{3}} = 563,2686A \quad (5.36)$$

Άρα, η πραγματική τιμή του μέγιστου ρεύματος βραχυκυκλώσεως είναι:

$$I_k'' = I_b \cdot i_k''(\rho u) = 563,2686 \cdot 25,0772 = 14,1252kA \quad (5.37)$$

Ο παράγοντας κ υπολογίζεται μέσω του λόγου R/X από την (4.48):

$$\frac{R}{X} = \frac{r_k(\rho u)}{x_k(\rho u)} = \frac{0,0123}{0,0389} = 0,3166 \quad (5.38)$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R}{X}} = 1,3991 \quad (5.39)$$

Έτσι, από την (4.47) το κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι:

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' = 27,9481kA \quad (5.40)$$

Μονοπολικό βραχυκύκλωμα στη θέση F1:

Αρχικά, γίνεται υπολογισμός των σύνθετων ομοπολικών αντιστάσεων (ρu) όλων των στοιχείων του συστήματος.

Ομοπολική σύνθετη αντίσταση (ρu) του μετασχηματιστή T:

$$r_{(0)TK}(\rho u) = r_{TK}(\rho u) = 0,0112\rho u \quad (5.41)$$

$$x_{(0)TK}(\rho u) = 0,95 \cdot x_{TK}(\rho u) = 0,0355\rho u \quad (5.42)$$

Άρα,

$$\bar{z}_{(0)TK}(\rho u) = (0,0112 + j0,0355)\rho u \quad (5.43)$$

Ομοπολική σύνθετη αντίσταση (ρu) του καλωδίου L:

$$r_{(0)L}(\rho u) = 4,23 \cdot r_L(\rho u) = 0,0042\rho u \quad (5.44)$$

$$x_{(0)L}(\rho u) = 1,21 \cdot x_L(\rho u) = 0,0004\rho u \quad (5.45)$$

Άρα,

$$\bar{z}_{(0)L}(\rho u) = (0,0042 + j0,0004)\rho u \quad (5.46)$$

Η συνολική σύνθετη αντίσταση (ρu), για μονοπολικό βραχυκύκλωμα, που «φαίνεται» από το σημείο F1 είναι το άθροισμα όλων των σύνθετων αντιστάσεων (ρu) του μοναδικού κλάδου του συστήματος:

$$\bar{z}_{(0)}(\rho u) = \bar{z}_{(0)TK}(\rho u) + \bar{z}_{(0)L}(\rho u) = (0,0154 + j0,0359)\rho u \quad (5.47)$$

Άρα,

$$\bar{z}_{(1)}(\rho u) + \bar{z}_{(2)}(\rho u) + \bar{z}_{(0)}(\rho u) = (0,0401 + j0,1138)\rho u \quad (5.48)$$

Υπολογισμός αρχικού και κρουστικού μονοπολικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως:

Η τιμή του μέγιστου μονοπολικού αρχικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως (ρu) στο σημείο F1 είναι:

$$i_{k1}'' = \left| \frac{3}{\bar{z}_{(1)} + \bar{z}_{(2)} + \bar{z}_{(0)}} \right| \cdot c_{\max} \cdot u_{F1} = \frac{3 \cdot 1,05 \cdot 0,9756}{0,1206} = 25,479\rho u \quad (5.49)$$

Η βάση ρεύματος, τάσεως και η τάση (ρu) στο σημείο F1 παραμένουν ίδια όπως στο τριπολικό βραχυκύκλωμα. Άρα, η πραγματική τιμή του μέγιστου ρεύματος βραχυκυκλώσεως είναι

$$I''_{k1} = I_{b2} \cdot i''_k(\rho u) = 563,27 \cdot 25,48 = 14,3515 \text{ kA} \quad (5.50)$$

Ο παράγοντας K υπολογίζεται μέσω του λόγου R/X από την (4.52):

$$\frac{R}{X} = \frac{r(\rho u)}{x(\rho u)} = \frac{0,0401}{0,1138} = 0,3521 \quad (5.51)$$

$$K = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R}{X}} = 1,3608 \quad (5.52)$$

Έτσι, από την (3.47) το κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι:

$$i_{p1} = K \sqrt{2} I''_{k1} = 27,6182 \text{ kA} \quad (5.53)$$

5.2.1.3 Προσομοιώσεις με το λογισμικό NEPLAN

Με την βοήθεια του λογισμικού NEPLAN, υλοποιήθηκε το κύκλωμα του Σχήματος 5.1 όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2. Τα δεδομένα που εισήχθησαν στο NEPLAN, εκτός από όσα δίνονται στην εκφώνηση, είναι:

Η ανηγμένη ωμική πτώση τάσεως του μετασχηματιστή:

Υπολογίζεται σύμφωνα με την (4.25β):

$$\frac{u_{Rr}}{100} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3 \cdot I_{rT}^2} \Leftrightarrow u_{Rr} = \frac{P_{krT} \cdot 100}{S_{rT}} = 1,15 \quad (5.54)$$

Η ανηγμένη τάση βραχυκυκλώσεως του μετασχηματιστή:

Αφού $R_{(0)} = R_T$, τότε ισχύει και $u_{Rr} = u_{Rr(0)}$. Όμως, $X_{(0)} = 0,95 \cdot X_T$, άρα ισχύει:

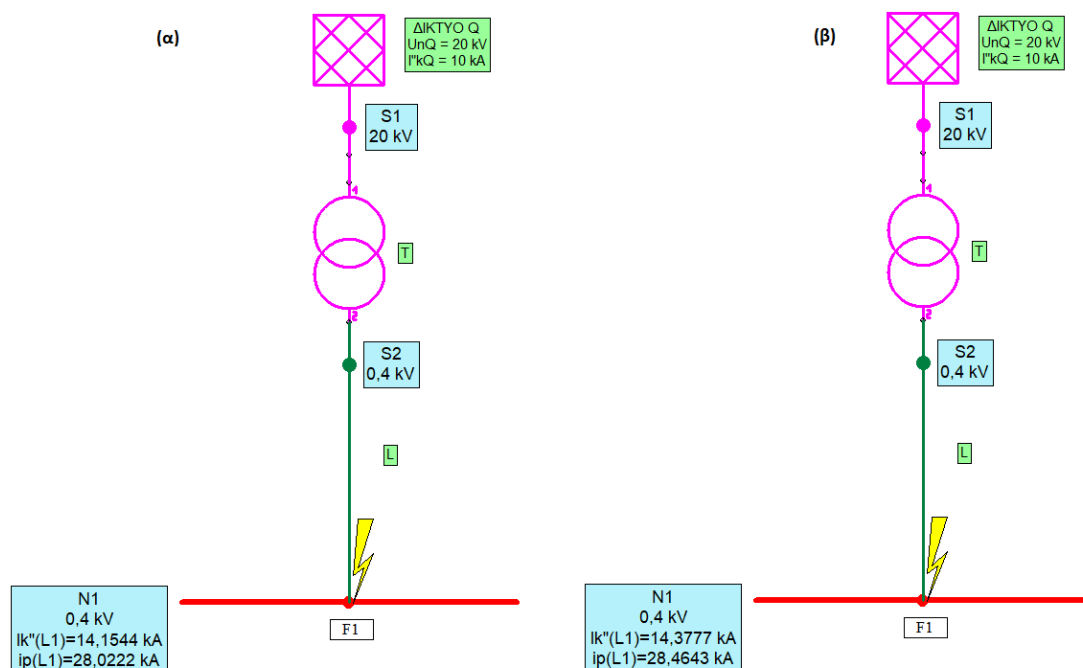
$$u_{xr(0)} = 0,95 \cdot u_{xr} \text{ Έτσι:}$$

$$u_{xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} = 3,83 \quad (5.55)$$

$$u_{xr(0)} = 0,95 \cdot u_{xr} = 3,64 \quad (5.56)$$

$$u_{kr(0)} = \sqrt{u_{xr(0)}^2 + u_{Rr(0)}^2} = 3,82 \quad (5.57)$$

Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τις προσομοιώσεις για το τριπολικό βραχυκύκλωμα στο σημείο F1, σύμφωνα με το Σχήμα 5.2, καταγράφονται στον Πίνακα 5-1.



Σχήμα 5.2: (α) φαίνεται το τριφασικό βραχυκύκλωμα στο σημείο F1, (β) το μονοφασικό στο σημείο F1.

5.2.1.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Στον Πίνακα 5-2 συνοψίζονται τα αποτελέσματα του αρχικού μέγιστου και του κρουστικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως, όπως υπολογίστηκαν με κάθε μέθοδο.

Πίνακας 5-2: Σύγκριση αποτελεσμάτων των τριών μεθόδων επίλυσης

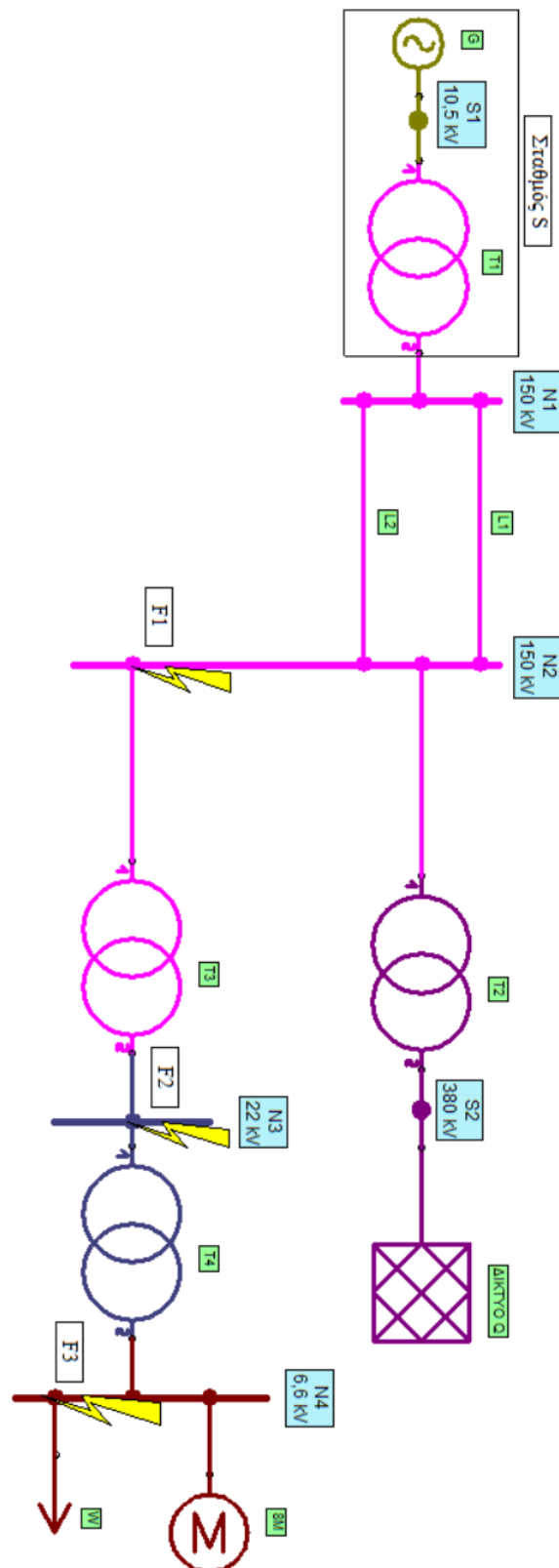
Μεγέθη	Επίλυση με υπολογισμούς	Επίλυση στο σύστημα per-unit	Επίλυση στο λογισμικό Neplan
I_k'' (kA)	14,1252	14,1252	14,1544
i_p (kA)	27,9481	27,9481	28,0222
I_{k1}'' (kA)	14,3515	14,3515	14,3777
i_{p1} (kA)	27,6182	27,6182	28,4643

5.3 Σύνθετο δίκτυο ΣΗΕ

Το Σχήμα 5.3 δείχνει ένα δίκτυο υψηλής τάσης. Τα σημεία F1, F2 και F3 είναι τα σημεία σφάλματος, για τα οποία υπολογίζεται το τριπολικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως. Οι ζυγοί 150kV τροφοδοτούνται από σταθμό παραγωγής, που αποτελείται από μια σύγχρονη γεννήτρια G και έναν μετασχηματιστή, μέσω μίας διπλής γραμμής μεταφοράς L1, L2. Οι ζυγοί 150kV συνδέονται επίσης με το δίκτυο Q μέσω του μετασχηματιστή T2. Οι καταναλωτές W και οι ασύγχρονοι κινητήρες 8M τροφοδοτούνται από τους ζυγούς 150kV, μέσω των μετασχηματιστών T3, T4 με τάση 6,6kV. Οι καταναλωτές W δεν χρειάζεται να ληφθούν υπόψη για τον υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκυκλώσεως. Τα δεδομένα των διαφόρων στοιχείων του δικτύου συνοψίζονται στον Πίνακα 5-3 [6].

Πίνακας 5-3: Δεδομένα δικτύου

Στοιχείο	Δεδομένα
Σταθμός παραγωγής S με ΣΑΤΥΦ	$U_{rG} = 10,5\text{kV}$, $S_{rG} = 150\text{MVA}$, $x_d'' = 20,4\%$, $x_d = 160\%$, $R_G / X_d'' = 0,05$ για $S_r \geq 100\text{MVA}$, $\cos\varphi_{rG} = 0,8$, $E_{\delta\max} = 1,3 \cdot E_{\delta n}$, $t_r = 10,5\text{kV} / 150\text{kV}$, $S_{rT1} = 150\text{MVA}$, $u_{kr} = 10,9\%$, $P_{krT} = 555\text{kW}$
Εναέρια γραμμή L1, L2	$\ell = 50\text{km}$, $R_L' = 0,18\Omega/\text{km}$, $X_L' = 0,45\Omega/\text{km}$
Δίκτυο Q	$U_{nQ} = 380\text{kV}$, $S_{kQ}'' = 20\text{GVA}$, $R_Q / X_Q = 0,1$
Μετασχηματιστής T2	$t_r = 150\text{kV} / 380\text{kV}$, $S_{rT} = 100\text{MVA}$, $u_{kr} = 14\%$, $P_{krT} = 320\text{kW}$
Μετασχηματιστής T3	$t_r = 150\text{kV} / 22\text{kV}$, $S_{rT} = 66\text{MVA}$, $u_{kr} = 15\%$, $P_{krT} = 396\text{kW}$
Μετασχηματιστής T4	$t_r = 22\text{kV} / 6,6\text{kV}$, $S_{rT} = 9\text{MVA}$, $u_{kr} = 8\%$, $P_{krT} = 54\text{kW}$
8 όμοιοι ασύγχρονοι κινητήρες	$U_{rM} = 6,6\text{kV}$, $P_M = 625\text{kW}$, $\cos\varphi = 0,8$, $n = 0,9$, $\nu = 1485\text{min}^{-1}$, $I_{LR} / I_{rM} = 5$, $R_M / X_M = 0,15$



Σχήμα 5.3: Σύνθετο δίκτυο ΣΗΕ.

5.3.1 Υπολογισμοί σφάλματος F1

Για τον υπολογισμό του τριπολικού βραχυκυκλώματος στη θέση F1 να υπολογιστούν τα παρακάτω:

- Οι σύνθετες αντιστάσεις κάθε στοιχείου του δικτύου ανηγμένες στην πολική τάση 150kV.
- Το ισοδύναμο κύκλωμα για τριπολικό βραχυκύκλωμα στο σημείο F1.
- Το αρχικό μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώσεως και τα επί μέρους ρεύματα του σταθμού παραγωγής S, του δικτύου Q και της ομάδας κινητήρων 8M.
- Η ισχύς βραχυκυκλώσεως και η συμβολή του σταθμού παραγωγής S και του δικτύου Q στην ισχύ αυτή.
- Τα επί μέρους κρουστικά ρεύματα του σταθμού παραγωγής S, του δικτύου Q και το συνολικό κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως.
- Τα επί μέρους ρεύματα διακοπής του σταθμού παραγωγής S και του δικτύου Q, για ελάχιστη διάρκεια βραχυκυκλώσεως 0,1s.
- Το μέγιστο και το ελάχιστο μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεων που παρέχεται από τον σταθμό παραγωγής S.

5.3.1.1 Επίλυση με υπολογισμούς

Αρχικά, γίνεται υπολογισμός των σύνθετων αντιστάσεων, ανηγμένες στην πολική τάση 150kV, όλων των στοιχείων του συστήματος σύμφωνα με το Κεφάλαιο 4.

Σύνθετη αντίσταση σταθμού παραγωγής S:

Ο σταθμός παραγωγής S αποτελείται από την γεννήτρια G και τον μετασχηματιστή T1. Η αρχική υπομεταβατική αντίδραση της γεννήτριας είναι:

$$X_d'' = x_d'' \cdot \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = 0,204 \cdot \frac{(10,5 \cdot 10^3)^2}{150 \cdot 10^6} = 0,1499\Omega \quad (5.58)$$

Επίσης, ισχύει ότι:

$$R_G / X_d'' = 0,05 \Rightarrow R_G = 0,0075\Omega \quad (5.59)$$

Άρα,

$$\bar{Z}_G = (0,0075 + j0,14994)\Omega \quad (5.60)$$

Ο υπολογισμός της σύνθετης αντίστασης του μετασχηματιστή T1 πραγματοποιείται σύμφωνα με τις (4.25α) - (4.25γ) άρα ισχύει:

$$Z_{T1} = \frac{u_{kr1}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT1HV}^2}{S_{rT1}} = \frac{10,9}{100} \cdot \frac{(150 \cdot 10^3)^2}{150 \cdot 10^6} = 16,35\Omega \quad (5.61)$$

$$R_{T1} = P_{krT1} \cdot \frac{U_{rT1HV}^2}{S_{rT1}^2} = 555 \cdot 10^3 \cdot \frac{(150 \cdot 10^3)^2}{(150 \cdot 10^6)^2} = 0,555\Omega \quad (5.62)$$

$$X_{T1} = \sqrt{Z_{T1}^2 - R_{T1}^2} = 16,3406\Omega \quad (5.63)$$

Άρα,

$$\bar{Z}_{T1} = (0,555 + j \cdot 16,3406)\Omega \quad (5.64)$$

Πρέπει να εισαχθεί ο συντελεστής διόρθωσης του σταθμού παραγωγής S. Οπότε, από την (4.24) ισχύει:

$$x_{T1} = X_{T1} \cdot \frac{S_{rT1}}{U_{rT1HV}^2} = 16,3406 \cdot \frac{150 \cdot 10^6}{(150 \cdot 10^3)^2} = 0,1089 \mu\Omega \quad (5.65)$$

Επιλέγεται $c_{\max} = 1,1$ από τον Πίνακα 4-1. Έτσι, σύμφωνα με την (4.24):

$$\begin{aligned} K_S &= \frac{U_{N1}^2}{U_{rG}^2} \cdot \frac{U_{rT1LV}^2}{U_{rT1HV}^2} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + |x_{d1}'' - x_{T1}| \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{rG}}} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow K_S &= \frac{(150 \cdot 10^3)^2}{(10,5 \cdot 10^3)^2} \cdot \frac{(10,5 \cdot 10^3)^2}{(150 \cdot 10^3)^2} \cdot \frac{1,1}{1 + |0,204 - 0,1089| \cdot \sqrt{1 - 0,8^2}} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow K_S &= 1,0406 \end{aligned} \quad (5.66)$$

Άρα, η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση στο σταθμό παραγωγής S σύμφωνα με την (4.24) είναι:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{SK} &= K_S \cdot (t_r^2 \cdot \bar{Z}_G + \bar{Z}_{T1}) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \bar{Z}_{SK} &= 1,0406 \cdot \left(\left(\frac{150 \cdot 10^3}{10,5 \cdot 10^3} \right)^2 \cdot (0,0075 + j0,1499) \right) \\ &\quad \left(+ (0,555 + j \cdot 16,3406) \right) \quad (5.67) \\ \Leftrightarrow \bar{Z}_{SK} &= (2,1697 + j \cdot 48,8484)\Omega \end{aligned}$$

Εναέρια γραμμή L1, L2:

Η σύνθετη αντίσταση των όμοιων εναέριων όμοιων γραμμών L1, L2 είναι:

$$\bar{Z}_{L1} = \ell \cdot (R_L' + jX_L') = 50 \cdot (0,18 + j0,45) = (9 + j22,5)\Omega \quad (5.68)$$

$$\bar{Z}_{L2} = \ell \cdot (R_L' + jX_L') = 50 \cdot (0,18 + j0,45) = (9 + j22,5)\Omega \quad (5.69)$$

$$\bar{Z}_L = \bar{Z}_{L1} // \bar{Z}_{L2} = (4,5 + j11,25)\Omega \quad (5.70)$$

Σύνθετη αντίσταση δικτύου Q:

Το βραχυκύκλωμα τροφοδοτείται από το δίκτυο Q, το οποίο είναι σε σύνδεση μέσω του μετασχηματιστή T2. Άρα στη σύνθετη αντίσταση του δικτύου πρέπει να συνυπολογιστεί και ο λόγος μετασχηματισμού t_{r2} . Επιλέγεται $c_{Qmax} = 1,1$ από τον Πίνακα 4-1, αφού $U_{nQ} = 380kV$. Το ονομαστικό αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως του δικτύου Q είναι:

$$I_{kQ}'' = \frac{S_{kQ}''}{\sqrt{3} \cdot U_{nQ}} = \frac{20 \cdot 10^9}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 10^3} = 30,387kA \quad (5.71)$$

Έτσι, σύμφωνα με την (4.17):

$$Z_{Qt} = \frac{c_{Qmax} U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}''} \cdot \frac{1}{t_{r2}^2} = \frac{1,1 \cdot 380 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 30,387 \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{150 \cdot 10^3}{380 \cdot 10^3} \right)^2 = 1,2375\Omega \quad (5.72)$$

Για το δίκτυο Q ισχύει:

$$R_{Qt} = 0,1 \cdot X_{Qt} \Leftrightarrow X_{Qt} = 0,995 \cdot Z_{Qt} = 1,2314\Omega \quad (5.73)$$

$$R_{Qt} = 0,1 \cdot X_{Qt} = 0,1 \cdot 1,2317 = 0,1231 \quad (5.74)$$

Άρα,

$$\bar{Z}_{Qt} = (0,1231 + j \cdot 1,2314)\Omega \quad (5.75)$$

Σύνθετη αντίσταση μετασχηματιστή T2:

Σύμφωνα με τις (4.25α) - (4.25γ) ισχύει:

$$Z_{T2} = \frac{u_{kr2}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT2LV}^2}{S_{rT2}} = \frac{14}{100} \cdot \frac{(150 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 10^6} = 31,5\Omega \quad (5.76)$$

$$R_{T2} = P_{krT2} \cdot \frac{U_{rT2LV}^2}{S_{rT2}^2} = 320 \cdot 10^3 \cdot \frac{(150 \cdot 10^3)^2}{(100 \cdot 10^6)^2} = 0,72\Omega \quad (5.77)$$

$$X_{T2} = \sqrt{Z_{T2}^2 - R_{T2}^2} = 31,4918\Omega \quad (5.78)$$

Άρα,

$$\bar{Z}_{T2} = (0,72 + j \cdot 31,4918)\Omega \quad (5.79)$$

Πρέπει να εισαχθεί ο συντελεστής διόρθωσης του μετασχηματιστή T2. Οπότε, από την (4.26γ) ισχύει:

$$x_{T2} = X_{T2} \cdot \frac{S_{rT2}}{U_{rT2LV}^2} = 31,4918 \cdot \frac{100 \cdot 10^6}{(150 \cdot 10^3)^2} = 0,14 \text{ pu} \quad (5.80)$$

Επιλέγεται $c_{\max} = 1,1$ από τον Πίνακα 4-1, αφού $U_{rT2} = 150\text{kV}$. Ο συντελεστής διόρθωσης του μετασχηματιστή T2 από την (4.26β) είναι:

$$K_{T2} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_{T2}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,14} = 0,9640 \quad (5.81)$$

Έτσι, η διορθωμένη σύνθετη αντίσταση από την (4.26α) είναι:

$$\bar{Z}_{T2K} = K_{T2} \cdot \bar{Z}_{T2} = (0,6941 + j30,3594)\Omega \quad (5.82)$$

Σύνθετη αντίσταση μετασχηματιστή T3:

Σύμφωνα με τις (4.25α) - (4.25γ) ισχύει:

$$Z_{T3} = \frac{u_{kr3}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT3HV}^2}{S_{rT3}^2} = \frac{15}{100} \cdot \frac{(150 \cdot 10^3)^2}{66 \cdot 10^6} = 51,1364\Omega \quad (5.83)$$

$$R_{T3} = P_{krT3} \cdot \frac{U_{rT3}^2}{S_{rT3HV}^2} = 396 \cdot 10^3 \cdot \frac{(150 \cdot 10^3)^2}{(66 \cdot 10^6)^2} = 2,0455\Omega \quad (5.84)$$

$$X_{T3} = \sqrt{Z_{T3}^2 - R_{T3}^2} = 51,0954\Omega \quad (5.85)$$

Άρα,

$$\bar{Z}_{T3} = (2,0455 + j \cdot 51,0954)\Omega \quad (5.86)$$

Πρέπει να εισαχθεί ο συντελεστής διόρθωσης του μετασχηματιστή T3. Οπότε, από την (4.26γ), ισχύει:

$$X_{T3} = X_{T3} \cdot \frac{S_{rT3}}{U_{rT3HV}^2} = 51,0954 \cdot \frac{66 \cdot 10^6}{(150 \cdot 10^3)^2} = 0,1499 \text{ pu} \quad (5.87)$$

Επιλέγεται $c_{\max} = 1,1$ από τον Πίνακα 4-1, αφού $U_{rT3} = 150\text{kV}$. Ο συντελεστής διόρθωσης του μετασχηματιστή T3 από την (4.26β) είναι:

$$K_{T3} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6X_{T3}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,14988} = 0,9588 \quad (5.88)$$

Έτσι, η διορθωμένη σύνθετη αντίσταση από την (4.26α) είναι:

$$\bar{Z}_{T3K} = K_{T3} \cdot \bar{Z}_{T3} = (1,9611 + j48,9892)\Omega \quad (5.89)$$

Σύνθετη αντίσταση μετασχηματιστή T4:

Η σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή T4 πρέπει να ανοιχθεί στην πολική τάση 150kV. Σύμφωνα από τις (4.25α) - (4.25γ) ισχύει:

$$Z_{T4} = \frac{u_{kr4}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT4LV}^2}{S_{rT4}} \cdot \left(\frac{U_a}{U_{rT4LV}} \right)^2 = \frac{8}{100} \cdot \frac{(150 \cdot 10^3)^2}{9 \cdot 10^6} = 200\Omega \quad (5.90)$$

$$R_{T4} = P_{krT4} \cdot \frac{U_{rT4LV}^2}{S_{rT4}^2} \cdot \left(\frac{U_a}{U_{rT4LV}} \right)^2 = 54 \cdot 10^3 \cdot \frac{(150 \cdot 10^3)^2}{(9 \cdot 10^6)^2} = 15\Omega \quad (5.91)$$

$$X_{T4} = \sqrt{Z_{T4}^2 - R_{T4}^2} = 199,4367\Omega \quad (5.92)$$

Άρα,

$$\bar{Z}_{T4} = (15 + j \cdot 199,4367)\Omega \quad (5.93)$$

Πρέπει να εισαχθεί ο συντελεστής διόρθωσης του μετασχηματιστή T4. Οπότε, από τις (4.25α) - (4.25γ) ισχύει:

$$X_{T4} = X_{T4} \cdot \frac{S_{rT4}}{U_{rT4LV}^2} \cdot \left(\frac{U_{rT4LV}}{U_a} \right)^2 = 199,4367 \cdot \frac{9 \cdot 10^6}{(150 \cdot 10^3)^2} = 0,0798 \text{ pu} \quad (5.94)$$

Επιλέγεται $c_{\max} = 1,1$ από τον Πίνακα 4-1, αφού $U_{rT3} = 150\text{kV}$. Ο συντελεστής διόρθωσης του μετασχηματιστή T3 από (4.16β) είναι:

$$K_{T4} = 0,95 \cdot \frac{C_{\max}}{1 + 0,6x_{T4}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0798} = 0,9973 \quad (5.95)$$

Έτσι, η διορθωμένη σύνθετη αντίσταση από την (4.26a) είναι:

$$\bar{Z}_{T4K} = K_{T4} \cdot \bar{Z}_{T4} = (14,959 + j198,8915)\Omega \quad (5.96)$$

Σύνθετη αντίσταση ομάδας κινητήρων 8M:

Η σύνθετη αντίσταση της ομάδας ασύγχρονων κινητήρων 8M πρέπει να ανοιχθεί στην πολική τάση 150kV. Το ονομαστικό ρεύμα της ομάδας 8M είναι:

$$I_{r8M} = 8 \cdot \frac{P_M}{\sqrt{3} \cdot U_{rM} \cdot n \cdot \cos \varphi} = 8 \cdot \frac{625 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6,6 \cdot 10^3 \cdot 0,9 \cdot 0,8} = 607,4813 \text{ A} \quad (5.97)$$

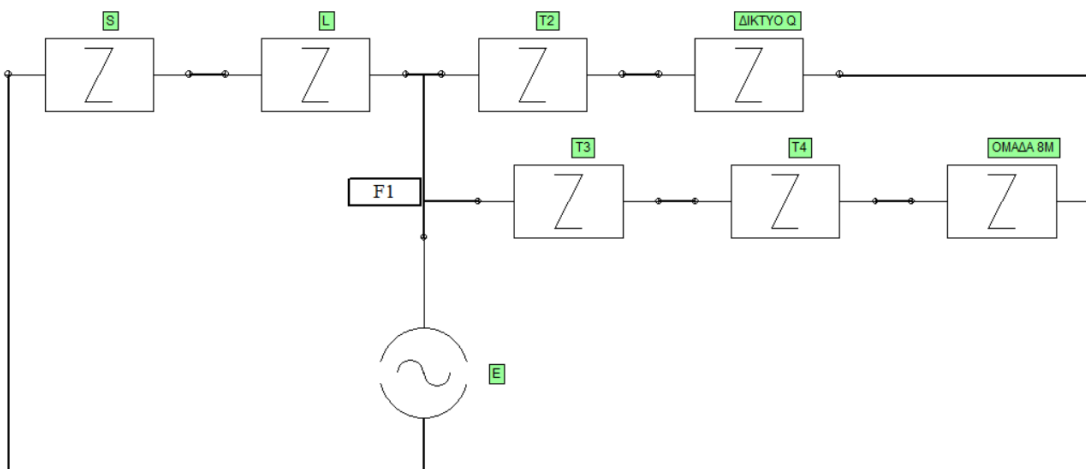
Η σύνθετη αντίσταση της ομάδας ασύγχρονων κινητήρων 8M υπολογίζεται από την (4.30):

$$Z_{8M} = \frac{1}{I_{LR} / I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3} \cdot I_{r8M}} \cdot \left(\frac{U_a}{U_{rM}} \right)^2 = \frac{1}{5} \cdot \frac{(150 \cdot 10^3)^2}{\sqrt{3} \cdot 607,4813 \cdot 6,6 \cdot 10^3} = 648\Omega \quad (5.98)$$

Η σύνθετη αντίσταση υπολογίζεται ως:

$$\bar{Z}_{8M} = \left(\frac{R_M}{X_M} + j \right) \cdot \frac{Z_{8M}}{\sqrt{1 + (R_M / X_M)^2}} = (0,15 + j) \cdot \frac{Z_{8M}}{\sqrt{1 + 0,15^2}} \Leftrightarrow \Leftrightarrow \bar{Z}_{8M} = (96,1246 + j640,8308)\Omega \quad (5.99)$$

Στο Σχήμα 5.4 φαίνεται το ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα για βραχυκύκλωμα στο σημείο F1. Η πηγή τάσης έχει τιμή ίση με $E = 1,1 \cdot 150 / \sqrt{3} \text{ kV}$.



Σχήμα 5.4: Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα για βραχυκύκλωμα στο σημείο F1.

Οι επιμέρους σύνθετες αντιστάσεις και η συνολική σύνθετη αντίσταση που «φαίνεται» από το σημείο F1 είναι:

$$\bar{Z}_{S-F1} = \bar{Z}_{SK} + \bar{Z}_L = (6,6697 + j60,0984)\Omega \quad (5.100)$$

$$\bar{Z}_{Q-F1} = \bar{Z}_{Qt} + \bar{Z}_{KT2} = (0,8172 + j31,5907)\Omega \quad (5.101)$$

$$\bar{Z}_{8M-F1} = \bar{Z}_{8M} + \bar{Z}_{KT3} + \bar{Z}_{KT4} = (113,0447 + j888,7114)\Omega \quad (5.102)$$

$$\bar{Z}_{eq} = \bar{Z}_{S-F1} // \bar{Z}_{Q-F1} // \bar{Z}_{8M-F1} = (1,1472 + j20,2694)\Omega \quad (5.103)$$

Υπολογισμός του αρχικού μέγιστου τριπολικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως στο σημείο F1 και τα αντίστοιχα επί μέρους ρεύματα των κλάδων:

Επιλέγεται $c_{\max} = 1,1$ από τον Πίνακα 4-1, αφού $U_{N2} = 150\text{kV}$. Σύμφωνα με την (4.39) το αρχικό μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώσεως και τα αντίστοιχα επί μέρους είναι:

$$I_k'' = \frac{c_{\max} \cdot U_{N2}}{\sqrt{3} \cdot Z_{eq}} = \frac{1,1 \cdot 150 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 20,3018} = 4,6923\text{kA} \quad (5.104)$$

$$I_{kS}'' = \frac{c_{\max} \cdot U_{N2}}{\sqrt{3} \cdot Z_{S-F1}} = \frac{1,1 \cdot 150 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 60,4674} = 1,5754\text{kA} \quad (5.105)$$

$$I_{kQ}'' = \frac{c_{\max} \cdot U_{N2}}{\sqrt{3} \cdot Z_{Q-F1}} = \frac{1,1 \cdot 150 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 31,6013} = 3,0145\text{kA} \quad (5.106)$$

$$I_{k8M}'' = \frac{c_{\max} \cdot U_{N2}}{\sqrt{3} \cdot Z_{8M-F1}} = \frac{1,1 \cdot 150 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 895,8723} = 0,1063\text{kA} \quad (5.107)$$

Υπολογισμός της ισχύος βραχυκυκλώσεως στο σημείο F1 και οι αντίστοιχες επί μέρους ρεύματα των κλάδων:

Η ισχύς βραχυκυκλώσεως και η συμβολή του σταθμού παραγωγής S και του δικτύου Q στην ισχύ αυτή είναι:

$$S_k'' = \sqrt{3} \cdot U_{N2} \cdot I_k'' = \sqrt{3} \cdot 150 \cdot 10^3 \cdot 4,6923 \cdot 10^3 = 1219,1014\text{MVA} \quad (5.108)$$

$$S_{kS}'' = \sqrt{3} \cdot U_{N2} \cdot I_{kS}'' = \sqrt{3} \cdot 150 \cdot 10^3 \cdot 1,5754 \cdot 10^3 = 409,3114\text{MVA} \quad (5.109)$$

$$S_{kQ}'' = \sqrt{3} \cdot U_{N2} \cdot I_{kQ}'' = \sqrt{3} \cdot 150 \cdot 10^3 \cdot 3,0145 \cdot 10^3 = 783,1955\text{MVA} \quad (5.110)$$

Υπολογισμός του κρουστικού τριπολικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως στο σημείο F1 και τα αντίστοιχα επί μέρους ρεύματα των κλάδων:

Αρχικά, για να υπολογιστεί το κρουστικό ρεύμα απαιτείται να βρεθεί ο όρος κ ο οποίος υπολογίζεται μέσω του λόγου R/X από την (4.47).

Όποτε, η συμβολή του σταθμού παραγωγής S στο κρουστικό ρεύμα είναι:

$$\frac{R}{X} = \frac{R_{S-F1}}{X_{S-F1}} = \frac{6,6697}{60,0984} = 0,111 \quad (5.111)$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R}{X}} = 1,7225 \quad (5.112)$$

Έτσι, από την (4.46) το κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι:

$$i_{pS} = \kappa \sqrt{2} I_{kS}'' = 3,8377 \text{ kA} \quad (5.113)$$

Οι σύγχρονες γεννήτριες και οι σταθμοί παραγωγής ισχύος χρησιμοποιούν «εικονικές» αντιστάσεις R_{Gf} , ώστε να χρησιμοποιηθούν στον λόγο R/X . Όμως, $R_{Gf} = R_G$, οπότε δεν λήφθηκε υπόψιν. Αντίστοιχα, η συμβολή του δικτύου Q στο κρουστικό ρεύμα είναι:

$$\frac{R}{X} = \frac{R_{Q-F1}}{X_{Q-F1}} = \frac{0,8172}{31,5907} = 0,0259 \quad (5.114)$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R}{X}} = 1,9268 \quad (5.115)$$

Έτσι, από την (4.47) το κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι:

$$i_{pQ} = \kappa \sqrt{2} I_{kQ}'' = 8,2144 \text{ kA} \quad (5.116)$$

Επειδή στους παράλληλους κλάδους υπάρχουν διαφορετικοί επιμέρους λόγοι R/X , χρησιμοποιείται η μέθοδος της ισοδύναμης συχνότητας για να βρεθεί ένας νέος λόγος. Η ωμική αντίσταση δεν επηρεάζεται από την συχνότητα, συνεπώς παραμένει σταθερή.

$$\bar{Z}_{S-F1} \Big|_{f_c=20\text{Hz}} = (6,6697 + j60,0984 \cdot 20 / 50) = (6,6697 + j24,0394) \Omega \quad (5.117)$$

$$\bar{Z}_{Q-F1}\Big|_{f_c=20\text{Hz}} = (0,8172 + j31,5907 \cdot 20 / 50) = (0,8172 + j12,6363)\Omega \quad (5.118)$$

$$\bar{Z}_{8M-F1}\Big|_{f_c=20\text{Hz}} = (113,0447 + j888,7114 \cdot 20 / 50) = (113,0447 + j355,4846)\Omega \quad (5.119)$$

$$\bar{Z}_{eq}\Big|_{f_c=20\text{Hz}} = \bar{Z}_{S-F1}\Big|_{f_c=20\text{Hz}} // \bar{Z}_{Q-F1}\Big|_{f_c=20\text{Hz}} // \bar{Z}_{8M-F1}\Big|_{f_c=20\text{Hz}} = (1,1331 + j8,1772)\Omega \quad (5.120)$$

Από την (4.49) ισχύει:

$$\frac{R}{X} = \frac{R_{eq}}{X_{eq}\Big|_{f_c=20\text{Hz}}} \cdot \frac{f_c}{f} = \frac{1,1331}{8,1772} \cdot \frac{20}{50} = 0,0554 \quad (5.121)$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R}{X}} = 1,8499 \quad (5.122)$$

Έτσι, από την (4.46) το κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι:

$$i_p = \kappa \sqrt{2} i_k'' = 12,2757 \text{kA} \quad (5.123)$$

Υπολογισμός του ρεύματος διακοπής του σταθμού παραγωγής S για βραχυκύκλωμα στο σημείο F1:

Το ονομαστικό ρεύμα της γεννήτριας G ανηγμένο στην πολική τάση 150kV είναι:

$$I_{rG} = \frac{S_{rG}}{\sqrt{3} \cdot U_{rG}} \cdot \frac{U_{rG}}{U_a} = \frac{150 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 10^3} \cdot \frac{10,5 \cdot 10^3}{150 \cdot 10^3} = 0,5774 \text{kA} \quad (5.124)$$

Το αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως της γεννήτριας G ισούται με το αντίστοιχο του σταθμού παραγωγής S.

$$I_{kG}'' = I_{kS}'' = 1,5754 \text{kA} \quad (5.125)$$

Για ελάχιστη διάρκεια βραχυκυκλώσεως 0,1s από τον Πίνακα 4-4 ισχύει:

$$\mu_G = 0,62 + 0,72 \cdot e^{-0,32 \cdot I_{kG}'' / I_{rG}} = 0,9207 \quad (5.126)$$

Οπότε, το ρεύμα διακοπής του σταθμού παραγωγής S από την (4.56) είναι:

$$I_{bs} = I_{bG} = \mu_G I_{kG}'' = 1,4505 \text{kA} \quad (5.127)$$

Το ρεύμα διακοπής του δικτύου Q από την (4.56) είναι:

$$I_{bQ} = I_{kQ}'' = 3,0145 \text{kA} \quad (5.128)$$

Υπολογισμός του μόνιμου ρεύματος βραχυκυκλώσεως του σταθμού παραγωγής S για βραχυκύκλωμα στο σημείο F1:

Αρχικά, για να υπολογιστεί το μέγιστο και ελάχιστο μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως του σταθμού παραγωγής S απαιτείται να βρεθεί οι συντελεστές λ_{\max} , λ_{\min} , οι οποίοι λαμβάνεται από το Σχήμα 4.20(α) αφού η γεννήτρια έχει κυλινδρικό δρομέα και $E_{\delta_{\max}} = 1,3 \cdot E_{\delta_n}$. Οπότε, αφού $I_{kG}'' / I_{rG} = 2,7287$, $x_d = 1,6$:

$$\lambda_{\max} \approx 1,62 \quad (5.129)$$

$$\lambda_{\min} \approx 0,44 \quad (5.130)$$

Όποτε, το μέγιστο και ελάχιστο μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως του σταθμού παραγωγής S από τις (4.68) και (4.69) είναι:

$$I_{kS_{\max}} = \lambda_{\max} \cdot I_{rG} = 1,62 \cdot 0,5774 \cdot 10^3 = 0,9353 \text{ kA} \quad (5.131)$$

$$I_{kS_{\min}} = \lambda_{\min} \cdot I_{rG} = 0,44 \cdot 0,5774 \cdot 10^3 = 0,254 \text{ kA} \quad (5.132)$$

5.3.1.2 Επίλυση στο σύστημα per-unit

Επιλέγεται:

- Βάση ισχύος: $S_b = 150 / 3 \text{ MVA}$.
- Βάση τάσης στο σημείο βραχυκυκλώσεως F1: $U_b = 150 / \sqrt{3} \text{ kV}$.

$$Z_b = \frac{U_b^2}{S_b} = \frac{(150 \cdot 10^3 / \sqrt{3})^2}{150 \cdot 10^6 / 3} = 150 \Omega \quad (5.133)$$

Αρχικά, γίνεται υπολογισμός των σύνθετων αντιστάσεων (pu) όλων των κλάδων του συστήματος.

Σύνθετη αντίσταση (pu) του κλάδου S-F1:

Από την επίλυση με υπολογισμούς ισχύει: $\bar{Z}_{S-F1} = \bar{Z}_{SK} + \bar{Z}_L = (6,6697 + j60,0984) \Omega$.

Συνεπώς, η σύνθετη αντίσταση (pu) του κλάδου S-F1 είναι:

$$\bar{Z}_{S-F1} (\text{pu}) = \frac{\bar{Z}_{S-F1}}{Z_b} = \frac{6,6697 + j60,0984}{150} = (0,0445 + j0,4007) \text{ pu} \quad (5.134)$$

Σύνθετη αντίσταση (pu) του κλάδου Q-F1:

Από την επίλυση με υπολογισμούς ισχύει:
 $\bar{Z}_{Q-F1} = \bar{Z}_{Qt} + \bar{Z}_{KT2} = (0,8172 + j31,5907)\Omega$. Συνεπώς, η σύνθετη αντίσταση (pu) του κλάδου S-F1 είναι:

$$\bar{Z}_{Q-F1}(pu) = \frac{\bar{Z}_{Q-F1}}{Z_b} = \frac{0,8172 + j31,5907}{150} = (0,0054 + j0,2106)pu \quad (5.135)$$

Σύνθετη αντίσταση (pu) του κλάδου 8M-F1:

Από την επίλυση με υπολογισμούς ισχύει: $\bar{Z}_{8M-F1} = (113,0447 + j888,7114)\Omega$. Συνεπώς, η σύνθετη αντίσταση (pu) του κλάδου 8M-F1 είναι:

$$\bar{Z}_{8M-F1}(pu) = \frac{\bar{Z}_{8M-F1}}{Z_b} = \frac{113,0447 + j888,7114}{150} = (0,7536 + j5,9247)pu \quad (5.136)$$

Συνολική σύνθετη αντίσταση (pu):

Από την επίλυση με υπολογισμούς ισχύει: $\bar{Z}_{eq} = (1,1472 + j20,2694)\Omega$. Συνεπώς, η συνολική σύνθετη αντίσταση (pu) που «φαίνεται» από το σημείο F1 είναι:

$$\bar{Z}_{eq}(pu) = \frac{\bar{Z}_{eq}}{Z_b} = \frac{1,1472 + j20,2694}{150} = (0,0076 + j0,1351)pu \quad (5.137)$$

Υπολογισμός του αρχικού μέγιστου τριπολικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως στο σημείο F1 και τα αντίστοιχα επί μέρους:

Η τιμή της τάσεως (pu) στο σημείο F1 είναι:

$$u_{F1}(pu) = \frac{U_{N2}}{U_b} = \frac{150 \cdot 10^3 / \sqrt{3}}{150 \cdot 10^3 / \sqrt{3}} = 1pu \quad (5.138)$$

Η τιμή του μέγιστου τριπολικού αρχικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως (pu) στο σημείο F1 και τα αντίστοιχα επί μέρους είναι:

$$i_k''(pu) = \frac{c_{\max} \cdot u_{F1}(pu)}{z_{eq}(pu)} = \frac{1,1 \cdot 1}{0,1353} = 8,1273pu \quad (5.139)$$

$$i_{kS}''(pu) = \frac{c_{\max} \cdot u_{F1}(pu)}{\bar{Z}_{S-F1}(pu)} = \frac{1,1 \cdot 1}{0,4031} = 2,7287pu \quad (5.140)$$

$$i''_{kQ}(pu) = \frac{c_{\max} \cdot u_{F1}(pu)}{\bar{z}_{Q-F1}(pu)} = \frac{1,1 \cdot 1}{0,2107} = 5,2213pu \quad (5.141)$$

$$i''_{k8M}(pu) = \frac{c_{\max} \cdot u_{F1}(pu)}{z_{8M-F1}(pu)} = \frac{1,1 \cdot 1}{5,9725} = 0,1842pu \quad (5.142)$$

Η βάση ρεύματος είναι:

$$I_b = \frac{S_b}{U_b} = \frac{150 \cdot 10^6 / 3}{150 \cdot 10^3 / \sqrt{3}} = 0,5774kA \quad (5.143)$$

Άρα, η πραγματική τιμή των αρχικών μέγιστων ρευμάτων βραχυκυκλώσεως είναι:

$$I''_k = I_b \cdot i''_k(pu) = 4,6923kA \quad (5.144)$$

$$I''_{kS} = I_b \cdot i''_{kS}(pu) = 1,5754kA \quad (5.145)$$

$$I''_{kQ} = I_b \cdot i''_{kQ}(pu) = 3,0145kA \quad (5.146)$$

$$I''_{k8M} = I_b \cdot i''_{k8M}(pu) = 0,1063kA \quad (5.147)$$

Υπολογισμός της ισχύος βραχυκυκλώσεως στο σημείο F1 και οι αντίστοιχες επί μέρους:

Η ισχύς βραχυκυκλώσεως (pu) και η συμβολή του σταθμού παραγωγής S και του δικτύου Q στην ισχύ αυτή είναι:

$$s''_k(pu) = u_{F1}(pu) \cdot i''_k(pu) = 8,1273pu \quad (5.148)$$

$$s''_{kS}(pu) = u_{F1}(pu) \cdot i''_{kS}(pu) = 2,7287pu \quad (5.149)$$

$$s''_{kQ}(pu) = u_{F1}(pu) \cdot i''_{kQ}(pu) = 5,2213pu \quad (4.150)$$

Άρα, η πραγματική τιμή της ισχύς βραχυκυκλώσεως και της συμβολή του σταθμού παραγωγής S και του δικτύου Q στην ισχύ αυτή είναι:

$$S''_k = 3 \cdot S_b \cdot s''_k(pu) = 1219,1014MVA \quad (5.151)$$

$$S''_{kS} = 3 \cdot S_b \cdot s''_{kS}(pu) = 409,3114MVA \quad (5.152)$$

$$S''_{kQ} = 3 \cdot S_b \cdot s''_{kQ}(pu) = 783,1955MVA \quad (5.153)$$

Υπολογισμός του κρουστικού τριπολικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως στο σημείο F1 και τα αντίστοιχα επί μέρους:

Αρχικά, για να υπολογιστεί το κρουστικό ρεύμα απαιτείται να βρεθεί ο όρος κ ο οποίος υπολογίζεται μέσω του λόγου R/X από την (3.52). Όποτε, η συμβολή του σταθμού παραγωγής S στο κρουστικό ρεύμα είναι:

$$\frac{R}{X} = \frac{r_{S-F1}(pu)}{x_{S-F1}(pu)} = \frac{0,0445}{0,4007} = 0,111 \quad (5.154)$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R}{X}} = 1,7225 \quad (5.155)$$

Έτσι, από την (3.47) το κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι:

$$i_{pS} = \kappa \sqrt{2} I_{kS}'' = 3,8377 \text{kA} \quad (5.156)$$

Αντίστοιχα, η συμβολή του δικτύου Q στο κρουστικό ρεύμα είναι:

$$\frac{R}{X} = \frac{r_{Q-F1}(pu)}{x_{Q-F1}(pu)} = \frac{0,0054}{0,2106} = 0,0259 \quad (5.157)$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R}{X}} = 1,9268 \quad (5.158)$$

Έτσι, από την (3.47) το κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι:

$$i_{pQ} = \kappa \sqrt{2} I_{kQ}'' = 8,2144 \text{kA} \quad (5.159)$$

Θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της ισοδύναμης συχνότητας για να υπολογιστεί το συνολικό κρουστικό ρεύμα.

$$\bar{z}_{S-F1} \Big|_{f_c=20\text{Hz}} (pu) = 0,0445 + j0,4007 \cdot 20 / 50 = (0,0445 + j0,1603) pu \quad (5.160)$$

$$\bar{z}_{Q-F1} \Big|_{f_c=20\text{Hz}} (pu) = 0,0054 + j0,2106 \cdot 20 / 50 = (0,0054 + j0,0842) pu \quad (5.161)$$

$$\bar{z}_{8M-F1} \Big|_{f_c=20\text{Hz}} (pu) = 0,7536 + j5,9247 \cdot 20 / 50 = (0,7536 + j2,3699) pu \quad (5.162)$$

$$\begin{aligned} \bar{z}_{eq} \Big|_{f_c=20\text{Hz}} (pu) &= \bar{z}_{S-F1} \Big|_{f_c=20\text{Hz}} (pu) // \bar{z}_{Q-F1} \Big|_{f_c=20\text{Hz}} (pu) // \bar{z}_{8M-F1} \Big|_{f_c=20\text{Hz}} (pu) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \bar{z}_{eq} \Big|_{f_c=20\text{Hz}} (pu) &= (0,0076 + j0,0545) pu \end{aligned} \quad (5.163)$$

Από την (4.45) ισχύει:

$$\frac{R}{X} = \frac{r_{eq}(pu)}{x_{eq}|_{f_c=20\text{Hz}}(pu)} \cdot \frac{f_c}{f} = \frac{0,0076}{0,0545} \cdot \frac{20}{50} = 0,0554 \quad (5.164)$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R}{X}} = 1,8499 \quad (5.165)$$

Έτσι, από την (4.47) το κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι:

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' = 12,2757 \text{ kA} \quad (5.166)$$

Υπολογισμός του ρεύματος διακοπής του σταθμού παραγωγής S για βραχυκύκλωμα στο σημείο F1:

Από την επίλυση με υπολογισμούς ισχύει: $I_{rG} = 0,5774 \text{ kA}$. Συνεπώς, το ονομαστικό ρεύμα (pu) της γεννήτριας G είναι:

$$i_{rG}(pu) = \frac{I_{rG}}{I_b} = \frac{0,5774 \cdot 10^3}{0,5774 \cdot 10^3} = 1 \text{ pu} \quad (5.167)$$

Το αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως (pu) της γεννήτριας G ισούται με το αντίστοιχο του σταθμού παραγωγής S.

$$i_{kG}''(pu) = i_{kS}''(pu) = 2,7287 \text{ pu} \quad (5.168)$$

Για ελάχιστη διάρκεια βραχυκυκλώσεως 0,1s από τον Πίνακα 4-4 ισχύει:

$$\mu_G = 0,62 + 0,72 \cdot e^{-0,32 \cdot i_{kG}''(pu)/i_{rG}(pu)} = 0,9207 \quad (5.169)$$

Οπότε, το ρεύμα διακοπής (pu) του σταθμού παραγωγής S από την (4.56) είναι:

$$I_{bs} = I_{bg} = \mu_G I_{kG}'' = 2,5123 \text{ pu} \quad (5.170)$$

Άρα η πραγματική τιμή του ρεύματος διακοπής του σταθμού παραγωγής S είναι:

$$I_{bs} = I_b \cdot i_{bs} = 1,4505 \text{ kA} \quad (5.171)$$

Το ρεύμα διακοπής (pu) του δικτύου Q από την (4.56) είναι:

$$i_{bQ}(pu) = i_{kQ}''(pu) = 5,2213 \text{ pu} \quad (5.172)$$

Άρα, η πραγματική τιμή του ρεύματος διακοπής του δικτύου Q είναι:

$$I_{bQ} = I_b \cdot i_{bQ} = 3,0145 \text{ kA} \quad (5.173)$$

Υπολογισμός του μόνιμου ρεύματος βραχυκυκλώσεως του σταθμού παραγωγής S για βραχυκύκλωμα στο σημείο F1:

Αρχικά, για να υπολογιστεί το μέγιστο και ελάχιστο μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως του σταθμού παραγωγής S απαιτείται να βρεθεί οι συντελεστές λ_{\max} , λ_{\min} , οι οποίοι λαμβάνεται από το Σχήμα 5.20(α) αφού η γεννήτρια έχει κυλινδρικό δρομέα και $E_{\delta_{\max}} = 1,3 \cdot E_{\delta_n}$. Οπότε, αφού $i_{kG}''(pu) / i_{rG}(pu) = 2,7287$, $x_d = 1,6$:

$$\lambda_{\max} \approx 1,62 \quad (5.174)$$

$$\lambda_{\min} \approx 0,44 \quad (5.175)$$

Όποτε, το μέγιστο και ελάχιστο μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως (pu) του σταθμού παραγωγής S από τις (4.56) και (4.57) είναι:

$$i_{kS_{\max}}(pu) = \lambda_{\max} \cdot i_{rG}(pu) = 1,62 \cdot 1 = 1,62pu \quad (5.176)$$

$$i_{kS_{\min}}(pu) = \lambda_{\min} \cdot i_{rG}(pu) = 0,44 \cdot 1 = 0,44pu \quad (5.177)$$

Άρα, η πραγματική τιμή του μόνιμου ρεύματος βραχυκυκλώσεως του σταθμού παραγωγής S είναι:

$$I_{kS_{\max}}(pu) = I_b \cdot i_{kS_{\max}}(pu) = 0,9353kA \quad (5.178)$$

$$I_{kS_{\min}}(pu) = I_b \cdot i_{kS_{\min}}(pu) = 0,254kA \quad (5.179)$$

5.3.1.3 Προσομοιώσεις με το λογισμικό NEPLAN

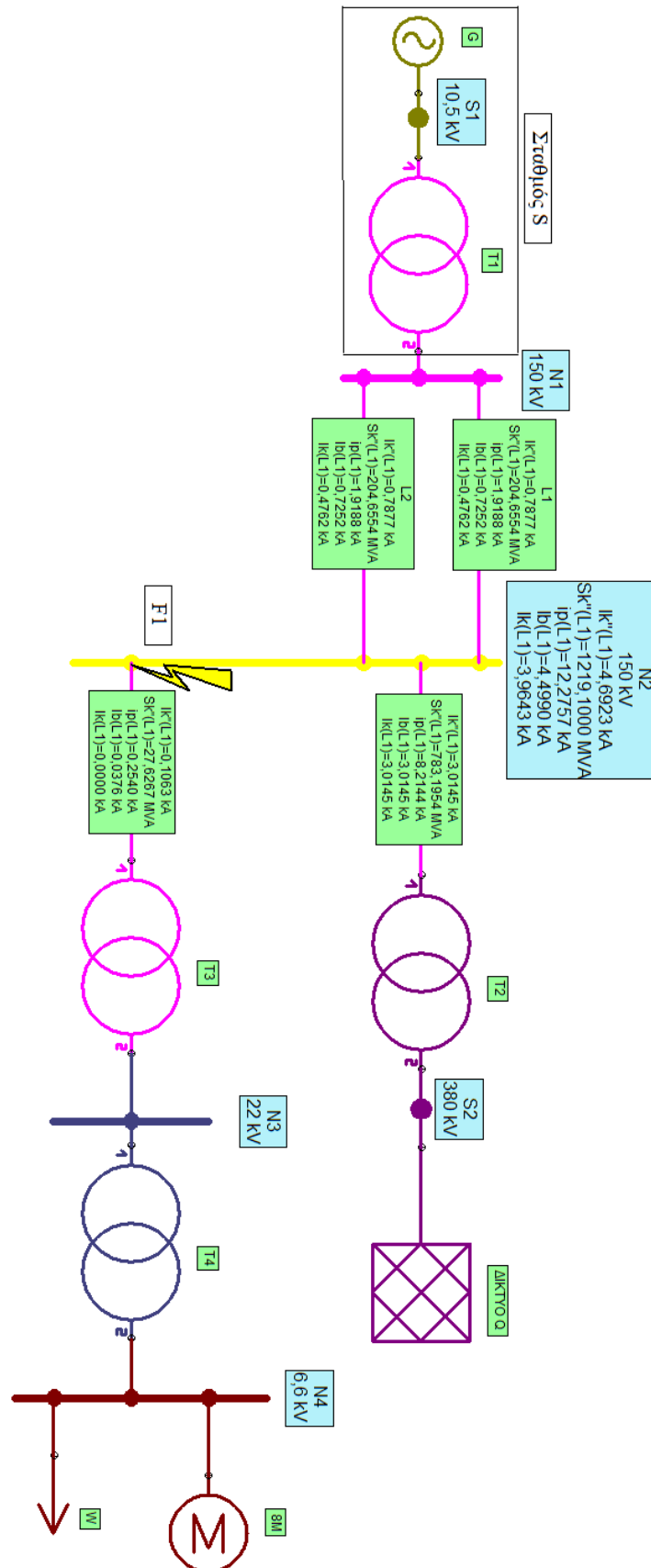
Με την βοήθεια του λογισμικού NEPLAN, υλοποιήθηκε το κύκλωμα του Σχήματος 4.3 για βραχυκύκλωμα στο σημείο F1, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5. Τα δεδομένα που εισήχθησαν στο NEPLAN, εκτός από όσα δίνονται στην εκφώνηση, είναι:

Η ανηγμένη ωμική πτώση τάσεως του μετασχηματιστή:

Υπολογίζεται σύμφωνα με την (4.25β):

$$\frac{u_{Rr1}}{100} \cdot \frac{U_{rT1}^2}{S_{rT1}} = \frac{P_{krT1}}{3 \cdot I_{rT1}^2} \Leftrightarrow u_{Rr1} = \frac{P_{krT1} \cdot 100}{S_{rT1}} = \frac{555 \cdot 10^3 \cdot 100}{150 \cdot 10^6} = 0,37\% \quad (5.180)$$

Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τις προσομοιώσεις για το τριπολικό βραχυκύκλωμα στο σημείο F1, σύμφωνα με το Σχήμα 5.5, καταγράφονται στον Πίνακα 5-4.



Σχήμα 5.5: αποτελέσματα για τριπολικό βραχυκύκλωμα στο σημείο F1

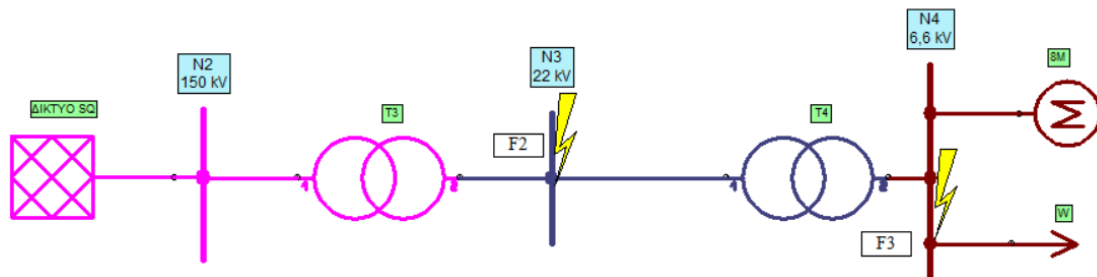
5.3.1.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Στον Πίνακα 5-4 συγκρίνονται τα αποτελέσματα που υπολογίστηκαν με τις διάφορες μεθόδους.

Πίνακας 5-4: Σύγκριση αποτελεσμάτων των τριών μεθόδων επίλυσης

Μεγέθη	Επίλυση με υπολογισμούς	Επίλυση στο σύστημα per-unit	Επίλυση στο λογισμικό Neplan
I_k'' (kA)	4,6923	4,6923	4,6923
I_{kS}'' (kA)	1,5754	1,5754	1,5754
I_{kQ}'' (kA)	3,0145	3,0145	3,0145
I_{k8M}'' (kA)	0,1063	0,1063	0,1063
S_k'' (MVA)	1219,1014	1219,1014	1219,1
S_{kS}'' (MVA)	409,3114	409,3114	409,3108
S_{kQ}'' (MVA)	783,1955	783,1955	783,1954
i_{pS} (kA)	3,8377	3,8377	3,8376
i_{pQ} (kA)	8,2144	8,2144	8,2144
i_p (kA)	12,2757	12,2757	12,2757
I_{bS} (kA)	1,4505	1,4505	1,4504
I_{bQ} (kA)	3,0145	3,0145	3,0145
I_{kSmin} (kA)	0,254	0,254	- ^α
I_{kSmax} (kA)	0,9353	0,9353	0,9524

^α Το ελάχιστο ρεύμα βραχυκυκλώσεως δεν υπολογίζεται από το NEPLAN καθώς δεν λαμβάνει υπόψη τον τον παραγοντα λ_{min} του σταθμού παραγωγής.



Σχήμα 5.6: Δίκτυο του Σχήματος 5.3 με αντικατάσταση του σταθμού παραγωγής S και του δικτύου Q από το δίκτυο SQ.

5.3.2 Υπολογισμοί σφάλματος F2

Για τον υπολογισμό του τριπολικού βραχυκυκλώματος στη θέση F2 να υπολογιστούν τα παρακάτω:

- Οι σύνθετες αντιστάσεις κάθε στοιχείου του δικτύου ανηγμένες στην πολική τάση 22kV. Η τροφοδότηση από τον σταθμό παραγωγής S και το δίκτυο Q μέχρι το σημείο F1 να αντικατασταθούν από ένα δίκτυο τροφοδοτήσεως SQ σύμφωνα με το Σχήμα 5.6.
- Το ισοδύναμο κύκλωμα για τριπολικό βραχυκύκλωμα στο σημείο F2.
- Το αρχικό μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώσεως και τα επί μέρους ρεύματα του δικτύου SQ και της ομάδας κινητήρων 8M.
- Η ισχύς βραχυκυκλώσεως και η συμβολή του δικτύου SQ.
- Το συνολικό κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως.
- Τα επί μέρους ρεύματα διακοπής του δικτύου SQ και της ομάδας κινητήρων 8M, για ελάχιστη διάρκεια βραχυκυκλώσεως 0,25s.
- Τα επί μέρους μέγιστα μόνιμα ρεύματα βραχυκυκλώσεως του δικτύου SQ και της ομάδας κινητήρων 8M και το συνολικό μέγιστο και ελάχιστο μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως.

5.3.2.1 Επίλυση με υπολογισμούς

Αρχικά, γίνεται υπολογισμός των σύνθετων αντιστάσεων, ανηγμένες στην πολική τάση 22kV, όλων των στοιχείων του συστήματος.

Σύνθετη αντίσταση δικτύου SQ:

Η ονομαστική αρχική ισχύς βραχυκυκλώσεως του δικτύου SQ είναι το αποτέλεσμα της συμβολής του σταθμού παραγωγής S και του δικτύου Q στη συνολική ισχύ βραχυκυκλώσεως κατά το βραχυκύκλωμα F1:

$$S''_{ksQ} = S''_{ks} + S''_{kQ} = 409,3114 + 783,1955 = 1192,5069 \text{MVA} \quad (5.181)$$

Το βραχυκύκλωμα τροφοδοτείται από το δίκτυο SQ, το οποίο είναι σε σύνδεση μέσω του μετασχηματιστή T3. Άρα στη σύνθετη αντίσταση του δικτύου SQ πρέπει να συνυπολογιστεί και ο λόγος μετασχηματισμού t_{r3} . Επιλέγεται $c_{SQ\max} = 1,1$ από τον Πίνακα 4-1, αφού $U_{nsQ} = 150 \text{kV}$. Το αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως του δικτύου SQ είναι:

$$I''_{ksQ} = \frac{S''_{ksQ}}{\sqrt{3} \cdot U_{nsQ}} = \frac{1192,5069 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 150 \cdot 10^3} = 4,59 \text{kA} \quad (5.182)$$

Έτσι, σύμφωνα με την (4.17) η σύνθετη αντίσταση του δικτύου SQ στα 22 kV:

$$Z_{sQ} = \frac{c_{SQ\max} U_{nsQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{ksQ}} \cdot \frac{1}{t_{r3}^2} = \frac{1,1 \cdot 150 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 4,59 \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{22 \cdot 10^3}{150 \cdot 10^3} \right)^2 = 0,4465 \Omega \quad (5.183)$$

Για το δίκτυο SQ ισχύει:

$$R_{sQ} = 0,1 \cdot X_{sQ} \Leftrightarrow X_{sQ} = 0,995 \cdot Z_{sQ} = 0,4442 \Omega \quad (5.184)$$

$$R_{sQ} = 0,1 \cdot X_{sQ} = 0,1 \cdot 0,4442 = 0,0444 \Omega \quad (5.185)$$

Άρα,

$$\bar{Z}_{sQt} = (0,0444 + j \cdot 0,4442) \Omega \quad (5.186)$$

Σύνθετη αντίσταση μετασχηματιστή T3:

Η σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή T3 για το βραχυκύκλωμα F1 ήταν $\bar{Z}_{T3} = (2,0455 + j \cdot 51,0954) \Omega$. Άρα με αναγωγή στην πολική τάση 22kV θα είναι:

$$\bar{Z}_{T3} = (2,0455 + j \cdot 51,0954) \cdot \left(\frac{22 \cdot 10^3}{150 \cdot 10^3} \right)^2 = (0,0440 + j \cdot 1,0991) \Omega \quad (5.187)$$

Πρέπει να εισαχθεί ο συντελεστής διόρθωσης του μετασχηματιστή T3. Οπότε, από την (4.26γ) ισχύει:

$$X_{T3} = X_{T3} \cdot \frac{S_{rT3}}{U_{rT3LV}^2} = 1,0991 \cdot \frac{66 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,1499 \text{ pu} \quad (5.188)$$

Επιλέγεται $c_{\max} = 1,1$ από τον Πίνακα 4-1, αφού $U_{rT3} = 22\text{kV}$. Ο συντελεστής διόρθωσης του μετασχηματιστή T3 από την (4.16β) είναι:

$$K_{T3} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_{T3}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,1499} = 0,9588 \quad (5.189)$$

Έτσι, η διορθωμένη σύνθετη αντίσταση από την (4.16α) είναι:

$$\bar{Z}_{T3K} = K_{T3} \cdot \bar{Z}_{T3} = (0,0422 + j1,0538)\Omega \quad (5.190)$$

Σύνθετη αντίσταση μετασχηματιστή T4:

Η σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή T4 για το βραχυκύκλωμα F1 ήταν $\bar{Z}_{T4} = (15 + j \cdot 199,4367)\Omega$. Άρα με αναγωγή στην πολική τάση 22kV θα είναι:

$$\bar{Z}_{T4} = (15 + j \cdot 199,4367) \cdot \left(\frac{22 \cdot 10^3}{150 \cdot 10^3} \right)^2 = (0,3227 + j \cdot 4,2901)\Omega \quad (5.191)$$

Πρέπει να εισαχθεί ο συντελεστής διόρθωσης του μετασχηματιστή. Οπότε, από την (4.26γ) ισχύει:

$$x_{T4} = X_{T4} \cdot \frac{S_{rT4}}{U_{rT4HV}^2} = 4,2901 \cdot \frac{9 \cdot 10^6}{(22 \cdot 10^3)^2} = 0,0798\text{pu} \quad (5.192)$$

Επιλέγεται $c_{\max} = 1,1$ από τον Πίνακα 4-1, αφού $U_{rT4} = 22\text{kV}$. Ο συντελεστής διόρθωσης του μετασχηματιστή T4 από την (4.26β) είναι:

$$K_{T4} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_{T4}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0798} = 0,9973 \quad (5.193)$$

Έτσι, η διορθωμένη σύνθετη αντίσταση από την (4.26γ) είναι:

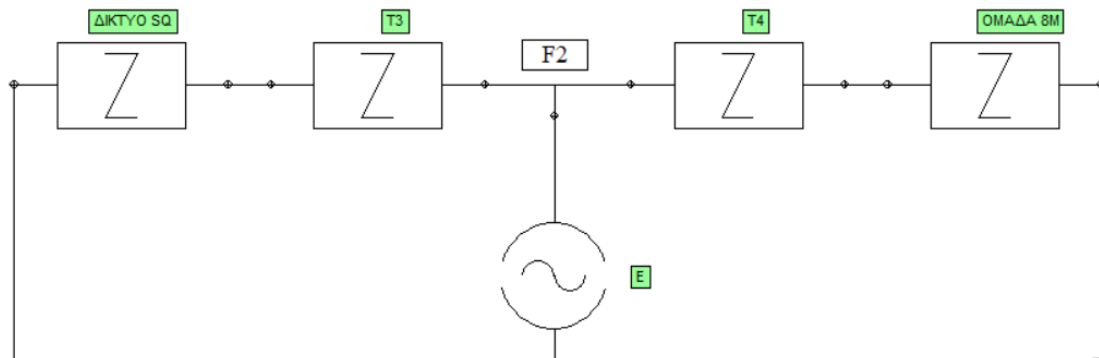
$$\bar{Z}_{T4K} = K_{T4} \cdot \bar{Z}_{T4} = (0,3218 + j4,2784)\Omega \quad (5.194)$$

Σύνθετη αντίσταση ομάδας κινητήρων 8M:

Η σύνθετη αντίσταση της ομάδας κινητήρων 8M για το βραχυκύκλωμα F1 ήταν $\bar{Z}_{8M} = (96,1246 + j640,8308)\Omega$. Άρα με αναγωγή στην πολική τάση 22kV θα είναι:

$$\bar{Z}_{8M} = (96,1246 + j640,8308) \cdot \left(\frac{22 \cdot 10^3}{150 \cdot 10^3} \right)^2 = (2,0688 + j \cdot 13,785)\Omega \quad (5.195)$$

Στο Σχήμα 5.7 φαίνεται το ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα για βραχυκύκλωμα στο σημείο F2. Η πηγή τάσης έχει τιμή ίση με $E = 1,1 \cdot 22 / \sqrt{3} \text{ kV}$.



Σχήμα 5.7: Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα για βραχυκύκλωμα στο σημείο F2.

Οι επιμέρους και η συνολική σύνθετη αντίσταση που «φαίνεται» από το σημείο F2 είναι:

$$\bar{Z}_{SQ-F2} = \bar{Z}_{SQ} + \bar{Z}_{T3} = (0,0866 + j1,4981) \Omega \quad (5.196)$$

$$\bar{Z}_{8M-F2} = \bar{Z}_{8M} + \bar{Z}_{KT4} = (2,3895 + j18,0634) \Omega \quad (5.197)$$

$$\bar{Z}_{eq} = \bar{Z}_{SQ-F2} // \bar{Z}_{8M-F2} = (0,0878 + j1,3839) \Omega \quad (5.198)$$

Υπολογισμός του αρχικού μέγιστου τριπολικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως στο σημείο F2 και τα αντίστοιχα επί μέρους:

Επιλέγεται $c_{max} = 1,1$ από τον Πίνακα 4-1, αφού $U_{N3} = 22 \text{ kV}$. Σύμφωνα με την (4.39) το αρχικό μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώσεως και τα αντίστοιχα επί μέρους είναι:

$$I_k'' = \frac{c_{max} \cdot U_{N3}}{\sqrt{3} \cdot Z_{eq}} = \frac{1,1 \cdot 22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1,3866} = 10,076 \text{ kA} \quad (5.199)$$

$$I_{kSQ}'' = \frac{c_{max} \cdot U_{N3}}{\sqrt{3} \cdot Z_{SQ-F2}} = \frac{1,1 \cdot 22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1,5006} = 9,3112 \text{ kA} \quad (5.200)$$

$$I_{k8M}'' = \frac{c_{max} \cdot U_{N3}}{\sqrt{3} \cdot Z_{8M-F2}} = \frac{1,1 \cdot 22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 18,2207} = 0,7668 \text{ kA} \quad (5.201)$$

Υπολογισμός της ισχύος βραχυκυκλώσεως στο σημείο F2 και της συμβολής του δικτύου SQ:

Η ισχύς βραχυκυκλώσεως και η συμβολή του δικτύου SQ στην ισχύ αυτή είναι:

$$S_k'' = \sqrt{3} \cdot U_{N3} \cdot I_k'' = \sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 10,076 \cdot 10^3 = 383,9485 \text{ MVA} \quad (5.202)$$

$$S_{kSQ}'' = \sqrt{3} \cdot U_{N3} \cdot I_{kSQ}'' = \sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 9,3112 \cdot 10^3 = 354,8025 \text{MVA} \quad (5.203)$$

Υπολογισμός του κρουστικού τριπολικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως στο σημείο F2:

Επειδή στους παράλληλους κλάδους υπάρχουν διαφορετικοί επιμέρους λόγοι R/X , χρησιμοποιείται η μέθοδος της ισοδύναμης συχνότητας για να βρεθεί ένας νέος λόγος. Η ωμική αντίσταση δεν επηρεάζεται από την συχνότητα, συνεπώς παραμένει σταθερή.

$$\bar{Z}_{SQ-F2} \Big|_{f_c=20\text{Hz}} = (0,0866 + j1,4981 \cdot 20 / 50) = (0,0866 + j0,5992) \Omega \quad (5.204)$$

$$\bar{Z}_{8M-F2} \Big|_{f_c=20\text{Hz}} = (2,3895 + j18,0634 \cdot 20 / 50) = (2,3895 + j7,2253) \Omega \quad (5.205)$$

$$\bar{Z}_{eq} \Big|_{f_c=20\text{Hz}} = \bar{Z}_{S-F2} \Big|_{f_c=20\text{Hz}} // \bar{Z}_{8M-F2} \Big|_{f_c=20\text{Hz}} = (0,0875 + j0,5546) \Omega \quad (5.206)$$

Από την (4.52) ισχύει:

$$\frac{R}{X} = \frac{R_{eq}}{X_{eq} \Big|_{f_c=20\text{Hz}}} \cdot \frac{f_c}{f} = \frac{0,0875}{0,5546} \cdot \frac{20}{50} = 0,0631 \quad (5.207)$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R}{X}} = 1,831 \quad (5.208)$$

Έτσι, από την (4.47) το κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι:

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' = 26,0911 \text{kA} \quad (5.209)$$

Υπολογισμός του ρεύματος διακοπής του δικτύου SQ και της ομάδας κινητήρων 8M:

Το ρεύμα διακοπής του δικτύου SQ από την (4.56) είναι:

$$I_{bsQ} = I_{kSQ}'' = 9,3112 \text{kA} \quad (5.210)$$

Ο αριθμός των ζευγών πόλων ενός κινητήρα από την ομάδα 8M υπολογίζεται από:

$$p = \frac{f}{v} = \frac{50 \text{s}^{-1}}{1485 \cdot (60 \text{s})^{-1}} = 2 \quad (5.211)$$

Από την επίλυση με υπολογισμούς ισχύει ότι $I_{r8M} = 607,4813 \text{A}$ για τάση ίση με 6,6 kV. Οπότε, το ονομαστικό ρεύμα της ομάδα κινητήρων 8M ανηγμένο στα 22kV είναι:

$$I_{r8M} = 607,4813 \cdot \frac{U_{r8M}}{U_a} = 607,4813 \cdot \frac{6,6 \cdot 10^3}{22 \cdot 10^3} = 182,2444A \quad (5.212)$$

Για ελάχιστη διάρκεια βραχυκυκλώσεως 0,25s από τον Πίνακα 4-4 και 4-5 ισχύει, αντίστοιχα:

$$\mu_M = 0,56 + 0,94 \cdot e^{-0,38 \cdot I_{k8M}'' / I_{r8M}} = 0,75 \quad (5.213)$$

$$q_M = 0,26 + 0,1 \cdot \ln(P_{rM} / p) = 0,26 + 0,1 \cdot \ln\left(\frac{625 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^6}\right) = 0,1437 \quad (5.214)$$

Οπότε, το ρεύμα διακοπής της ομάδας κινητήρων 8M από την (4.58) είναι:

$$I_{b8M} = \mu_M \cdot q_M \cdot I_{k8M}'' = 82,6338A \quad (5.215)$$

Υπολογισμός του μέγιστου μόνιμου ρεύματος βραχυκυκλώσεως του δικτύου SQ, της ομάδας κινητήρων 8M και το συνολικό μέγιστο και ελάχιστο μόνιμο για βραχυκύκλωμα στο σημείο F2:

Το μέγιστο μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως του δικτύου SQ, της ομάδας κινητήρων 8M και το συνολικό υπολογίζονται με βάση την ενότητα 4.10 και είναι:

$$I_{kSQmax} = I_{kSQ}'' = 9,3112kA \quad (5.216)$$

$$I_{k8Mmax} = 0 \quad (5.217)$$

$$I_{kmax} = I_{kSQmax} = 9,3112kA \quad (5.218)$$

Για το συνολικό ελάχιστο απαιτείται να υπολογιστεί το ελάχιστο αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως του δικτύου SQ.

$$I_{kSQmin}'' = \frac{c_{min} \cdot U_{N3}}{\sqrt{3} \cdot Z_{SQ-F2}} = \frac{1 \cdot 22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1,5006} = 8,4647kA \quad (5.219)$$

$$I_{kmin} = I_{kSQmin}'' = 8,4647kA \quad (5.220)$$

5.3.2.2 Επίλυση στο σύστημα per-unit

Επιλέγεται:

- Βάση ισχύος: $S_b = 50 / 3MVA$.
- Βάση τάσης στο σημείο βραχυκυκλώσεως F2: $U_b = 22 / \sqrt{3}kV$.

$$Z_b = \frac{U_b^2}{S_b} = \frac{(22 \cdot 10^3 / \sqrt{3})^2}{50 \cdot 10^6 / 3} = 9,68 \Omega \quad (5.221)$$

Αρχικά, γίνεται υπολογισμός των σύνθετων αντιστάσεων (pu) όλων των κλάδων του συστήματος.

Σύνθετη αντίσταση (pu) του κλάδου SQ-F2:

Από την επίλυση με υπολογισμούς ισχύει: $\bar{Z}_{SQ-F2} = (0,0866 + j1,4981) \Omega$. Συνεπώς, η σύνθετη αντίσταση (pu) του κλάδου SQ-F2 είναι:

$$\bar{Z}_{SQ-F2}(pu) = \frac{\bar{Z}_{SQ-F2}}{Z_b} = \frac{0,0866 + j1,4981}{9,68} = (0,0089 + j0,1548) pu \quad (5.222)$$

Σύνθετη αντίσταση (pu) του κλάδου 8M-F2:

Από την επίλυση με υπολογισμούς ισχύει: $\bar{Z}_{8M-F2} = (2,3895 + j18,0634) \Omega$. Συνεπώς, η σύνθετη αντίσταση (pu) του κλάδου 8M-F2 είναι:

$$\bar{Z}_{8M-F2}(pu) = \frac{\bar{Z}_{8M-F2}}{Z_b} = \frac{2,3895 + j18,0634}{9,68} = (0,2469 + j1,8660) pu \quad (5.223)$$

Συνολική σύνθετη αντίσταση (pu):

Από την επίλυση με υπολογισμούς ισχύει: $\bar{Z}_{eq} = (0,0878 + j1,3839) \Omega$. Συνεπώς, η συνολική σύνθετη αντίσταση (pu) που «φαίνεται» από το σημείο F2 είναι:

$$\bar{Z}_{eq}(pu) = \frac{\bar{Z}_{eq}}{Z_b} = \frac{0,0878 + j1,3839}{9,68} = (0,0091 + j0,1430) pu \quad (5.224)$$

Υπολογισμός του αρχικού μέγιστου τριπολικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως στο σημείο F2 και τα αντίστοιχα επί μέρους:

Η τιμή της τάσεως (pu) στο σημείο F2 είναι:

$$u_{F2}(pu) = \frac{U_{N3}}{U_b} = \frac{22 \cdot 10^3 / \sqrt{3}}{22 \cdot 10^3 / \sqrt{3}} = 1 pu \quad (5.225)$$

Η τιμή του μέγιστου τριπολικού αρχικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως (pu) στο σημείο F2 και τα αντίστοιχα επί μέρους είναι:

$$i_k''(pu) = \frac{c_{\max} \cdot u_{F2}(pu)}{z_{eq}(pu)} = \frac{1,1 \cdot 1}{0,1432} = 7,679 pu \quad (5.226)$$

$$i''_{kSQ}(\rho u) = \frac{c_{\max} \cdot u_{F2}(\rho u)}{z_{SQ-F2}(\rho u)} = \frac{1,1 \cdot 1}{0,155} = 7,0960 \rho u \quad (5.227)$$

$$i''_{k8M}(\rho u) = \frac{c_{\max} \cdot u_{F2}(\rho u)}{z_{8M-F2}(\rho u)} = \frac{1,1 \cdot 1}{1,8823} = 0,5844 \rho u \quad (5.228)$$

Η βάση ρεύματος είναι:

$$I_b = \frac{S_b}{U_b} = \frac{50 \cdot 10^6 / 3}{22 \cdot 10^3 / \sqrt{3}} = 1,3122 \text{ kA} \quad (5.229)$$

Άρα, η πραγματική τιμή των μέγιστων ρευμάτων βραχυκυκλώσεως είναι:

$$I''_k = I_b \cdot i''_k(\rho u) = 10,076 \text{ kA} \quad (5.230)$$

$$I''_{kSQ} = I_b \cdot i''_{kSQ}(\rho u) = 9,3112 \text{ kA} \quad (5.231)$$

$$I''_{k8M} = I_b \cdot i''_{k8M}(\rho u) = 0,7668 \text{ kA} \quad (5.232)$$

Υπολογισμός της ισχύος βραχυκυκλώσεως στο σημείο F2 και της συμβολής του δικτύου SQ:

Η ισχύς βραχυκυκλώσεως (pu) και η συμβολή του δικτύου SQ στην ισχύ αυτή είναι:

$$s''_k(\rho u) = u_{F2}(\rho u) \cdot i''_k(\rho u) = 7,679 \rho u \quad (5.233)$$

$$s''_{kSQ}(\rho u) = u_{F2}(\rho u) \cdot i''_{kSQ}(\rho u) = 7,096 \rho u \quad (5.234)$$

Άρα, η πραγματική τιμή της ισχύς βραχυκυκλώσεως και της συμβολή του δικτύου SQ στην ισχύ αυτή είναι:

$$S''_k = 3 \cdot S_b \cdot s''_k(\rho u) = 383,9485 \text{ MVA} \quad (5.235)$$

$$S''_{kSQ} = 3 \cdot S_b \cdot s''_{kSQ}(\rho u) = 354,8025 \text{ MVA} \quad (5.236)$$

Υπολογισμός του κρουστικού τριπολικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως στο σημείο F2:

Θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της ισοδύναμης συχνότητας για να υπολογιστεί το συνολικό κρουστικό ρεύμα.

$$\bar{z}_{SQ-F2} \Big|_{f_c=20\text{Hz}}(\rho u) = 0,0089 + j0,1548 \cdot 20 / 50 = (0,0089 + j0,0619) \rho u \quad (5.237)$$

$$\bar{z}_{8M-F2} \Big|_{f_c=20\text{Hz}}(\rho u) = 0,2469 + j1,8660 \cdot 20 / 50 = (0,2469 + j0,7464) \rho u \quad (5.238)$$

$$\bar{z}_{eq}|_{f_c=20\text{Hz}}(\rho u) = \bar{z}_{SQ-F2}|_{f_c=20\text{Hz}}(\rho u) / / \bar{z}_{8M-F2}|_{f_c=20\text{Hz}}(\rho u) = (0,009 + j0,0573)\rho u \quad (5.239)$$

Από την (4.52) ισχύει:

$$\frac{R}{X} = \frac{r_{eq}(\rho u)}{x_{eq}|_{f_c=20\text{Hz}}(\rho u)} \cdot \frac{f_c}{f} = \frac{0,009}{0,0573} \cdot \frac{20}{50} = 0,0631 \quad (5.240)$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R}{X}} = 1,831 \quad (5.241)$$

Έτσι, από την (4.47) το κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι:

$$i_p = \kappa \sqrt{2} i_k'' = 26,0911 \text{kA} \quad (5.242)$$

Υπολογισμός του ρεύματος διακοπής του δικτύου SQ και της ομάδας κινητήρων 8M για βραχυκύκλωμα στο σημείο F2:

Το ρεύμα διακοπής του δικτύου SQ από την (4.56) είναι:

$$I_{bSQ} = I_{ksQ}'' = 9,3112 \text{kA} \quad (5.243)$$

Από την επίλυση με υπολογισμούς ισχύει ότι το ονομαστικό ρεύμα της ομάδα κινητήρων 8M ανηγμένο στην πολική 22kV είναι: $I_{r8M} = 182,2444 \text{A}$. Οπότε, το ονομαστικό ρεύμα (pu) της ομάδα κινητήρων 8M είναι:

$$i_{r8M}(\rho u) = \frac{I_{r8M}}{I_b} = \frac{182,2444}{1,3122 \cdot 10^3} = 0,1389 \rho u \quad (5.244)$$

Για ελάχιστη διάρκεια βραχυκυκλώσεως 0,25s από τον Πίνακα 4-4 και 4-5 ισχύει:

$$\mu_M = 0,56 + 0,94 \cdot e^{-0,38 \cdot i_{k8M}''(\rho u) / i_{r8M}(\rho u)} = 0,75 \quad (5.245)$$

$$q_M = 0,26 + 0,1 \cdot \ln(P_{r8M} / p) = 0,26 + 0,1 \cdot \ln\left(\frac{625 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^6}\right) = 0,1437 \quad (5.246)$$

Οπότε, το ρεύμα διακοπής (pu) της ομάδας κινητήρων 8M από την (4.58) είναι:

$$i_{b8M}(\rho u) = \mu_M \cdot q_M \cdot i_{k8M}''(\rho u) = 0,0630 \rho u \quad (5.247)$$

Άρα η πραγματική τιμή του ρεύματος διακοπής της ομάδας κινητήρων 8M είναι:

$$I_{b8M} = I_b \cdot i_{b8M}(\rho u) = 82,6338 \text{A} \quad (5.248)$$

Υπολογισμός του μέγιστου μόνιμου ρεύματος βραχυκυκλώσεως του δικτύου SQ, της ομάδας κινητήρων 8M και το συνολικό μέγιστο και ελάχιστο για βραχυκύκλωμα στο σημείο F2:

Το μέγιστο μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως του δικτύου SQ, της ομάδας κινητήρων 8M και το συνολικό και από την (4.64),(4.63) και (4.65) είναι:

$$I_{kSQmax} = I_{kSQ}'' = 9,3112kA \quad (5.249)$$

$$I_{k8Mmax} = 0 \quad (5.250)$$

$$I_{kmax} = I_{kSQmax} = 9,3112kA \quad (5.251)$$

Για το συνολικό ελάχιστο μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως (ρu) απαιτείται να υπολογιστεί το ελάχιστο αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως (ρu) του δικτύου SQ.

$$i_{kSQmin}'' = \frac{c_{min} \cdot u_{F2}(\rho u)}{z_{SQ-F2}(\rho u)} = \frac{1 \cdot 1}{0,155} = 6,451\rho u \quad (5.252)$$

Άρα η πραγματική τιμή του συνολικού ελάχιστου μόνιμου ρεύματος βραχυκυκλώσεως είναι:

$$I_{kSQmin}'' = I_b \cdot i_{kSQmin}'' = 8,4647kA \quad (5.253)$$

$$I_{kmin} = I_{kSQmin}'' = 8,4647kA \quad (5.254)$$

5.3.2.3 Προσομοιώσεις με το λογισμικό NEPLAN

Με την βοήθεια του λογισμικού NEPLAN, υλοποιήθηκε το κύκλωμα του Σχήματος 5.6 για βραχυκύκλωμα στο σημείο F2, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7. Τα δεδομένα που εισήχθησαν στο NEPLAN, εκτός από όσα δίνονται στην εκφώνηση, είναι:

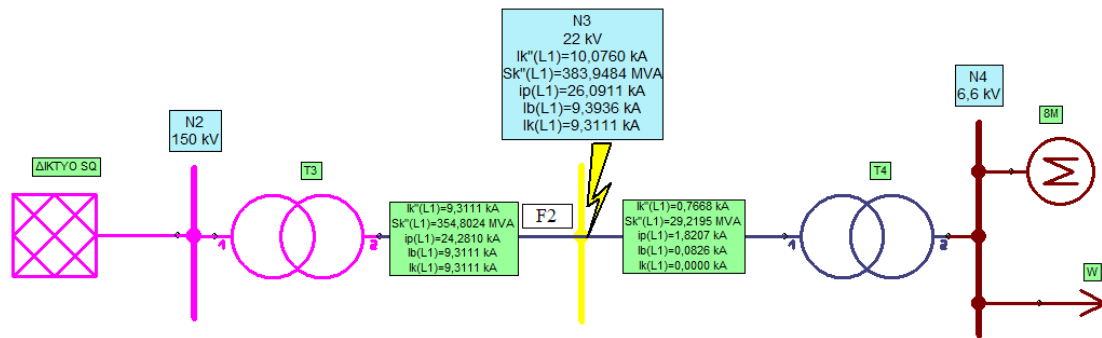
Η ονομαστική αρχική ισχύς βραχυκυκλώσεως του δικτύου SQ:

Υπολογίζεται σύμφωνα την προσομοίωση του λογισμικού NEPLAN για βραχυκύκλωμα στο σημείο F1:

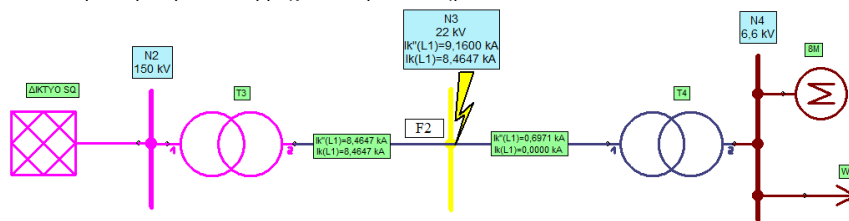
$$S_{kSQ}'' = S_{kS}'' + S_{kQ}'' = 409,3108 + 783,1954 = 1192,5062MVA \quad (5.255)$$

Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τις προσομοιώσεις για το τριπολικό βραχυκύκλωμα στο σημείο F2, σύμφωνα με το Σχήμα 5.8, καταγράφονται στον Πίνακα 5-4. Στο Σχήμα 5.9 φαίνονται τα αποτελέσματα του ελάχιστου αρχικού και μόνιμου ρεύματος βραχυκυκλώσεως, τα οποία επιτυγχάνονται με την επιλογή

σταθερού παράγοντα $c = 1$, μέσω της καρτέλας Parameter. Ο παράγοντας $c = 1$ επιλέγεται από τον Πίνακα 4-1, αφού $U_{N3} = 22\text{kV}$.



Σχήμα 5.8: αποτελέσματα για τριτολικό βραχυκύκλωμα στο σημείο F2.



Σχήμα 5.9: Αποτελέσματα ελάχιστου μόνιμου ρεύματος βραχυκυκλώσεως για τριτολικό βραχυκύκλωμα στο σημείο F2.

5.3.2.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

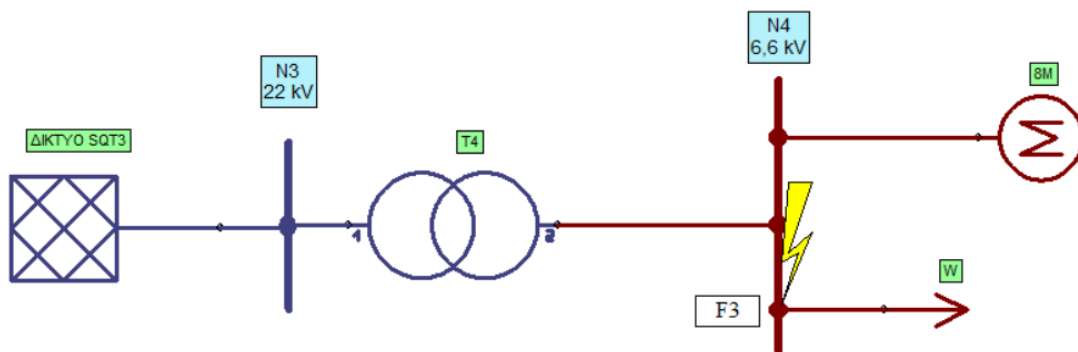
Στον Πίνακα 5-5 καταγράφονται τα αποτελέσματα, όπως υπολογίστηκαν με κάθε μέθοδο.

Πίνακας 5-5: Σύγκριση αποτελεσμάτων των τριών μεθόδων επίλυσης

Μεγέθη	Επίλυση με υπολογισμούς	Επίλυση στο σύστημα per-unit	Επίλυση στο λογισμικό Nerslan
I_k'' (kA)	10,076	10,076	10,076
I_{kSQ}'' (kA)	9,3112	9,3112	9,3111
I_{k8M}'' (kA)	0,7668	0,7668	0,7668
S_k'' (MVA)	383,9485	383,9485	383,9484
S_{kSQ}'' (MVA)	354,8025	354,8025	354,8024
i_p (kA)	26,0911	26,0911	26,0911
I_{bSQ} (kA)	9,3112	9,3112	9,3111

Μεγέθη	Επίλυση με υπολογισμούς	Επίλυση στο σύστημα per-unit	Επίλυση στο λογισμικό Neplan
I_{b8M} (A)	82,6338	82,6338	82,6
I_{kSQmax} (kA)	9,3112	9,3112	9,3111
I_{k8Mmax} (kA)	0	0	0
I_{kmax} (kA)	9,3112	9,3112	9,3111
I_{kmin} (kA)	8,4647	8,4647	8,4647 ^α

^α Το ελάχιστο ρεύμα βραχυκυκλώσεως υπολογίζεται από το NEPLAN επιλέγοντας σταθερό παράγοντα $c=1$ από την καρτέλα Parameters



Σχήμα 5.10: Δίκτυο του Σχήματος 5.3 με αντικατάσταση του σταθμού παραγωγής S, του δικτύου Q και του μετασχηματιστή T3 από το δίκτυο SQT3.

5.3.3 Υπολογισμοί σφάλματος F3

Για τον υπολογισμό του τριπολικού βραχυκυκλώματος στη θέση F3 να υπολογιστούν τα παρακάτω:

- Οι σύνθετες αντιστάσεις κάθε στοιχείου του δικτύου ανηγμένες στην πολική τάση 6,6kV. Η τροφοδότηση από τον σταθμό παραγωγής S, δίκτυο Q και ο μετασχηματιστής T3 μέχρι το σημείο F2 να αντικατασταθούν από ένα δίκτυο τροφοδοτήσεως SQT3 σύμφωνα με το Σχήμα 5.10.
- Το ισοδύναμο κύκλωμα για τριπολικό βραχυκύκλωμα στο σημείο F3.
- Το αρχικό μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώσεως και τα επί μέρος ρεύματα του δικτύου SQT3 και της ομάδας κινητήρων 8M.
- Η ισχύς βραχυκυκλώσεως.

- Το συνολικό κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως.
- Τα επί μέρους ρεύματα διακοπής του δικτύου SQT3, της ομάδας κινητήρων 8M και το συνολικό ρεύμα διακοπής για ελάχιστη διάρκεια βραχυκυκλώσεως 0,25s.
- Τα επί μέρους μέγιστα μόνιμα ρεύματα βραχυκυκλώσεως του δικτύου SQT3 και της ομάδας κινητήρων 8M και το συνολικό μέγιστο μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως.

5.3.3.1 Επίλυση με υπολογισμούς

Αρχικά, γίνεται υπολογισμός των σύνθετων αντιστάσεων, ανηγμένες στην πολική τάση 6,6kV, όλων των στοιχείων του συστήματος.

Σύνθετη αντίσταση δικτύου SQT3:

Η ονομαστική αρχική ισχύς βραχυκυκλώσεως του δικτύου SQT3 είναι η ισχύς βραχυκυκλώσεως του δικτύου SQ για βραχυκύκλωμα στο σημείο F2:

$$S''_{kSQT3} = S''_{kSQ} = 354,8025\text{MVA} \quad (5.256)$$

Το βραχυκύκλωμα τροφοδοτείται από το δίκτυο SQT3, το οποίο είναι σε σύνδεση μέσω του μετασχηματιστή T4. Άρα στη σύνθετη αντίσταση του δικτύου SQT3 πρέπει να συνυπολογιστεί και ο λόγος μετασχηματισμού t_{r4} . Επιλέγεται $c_{SQT3\max} = 1,1$ από τον Πίνακα 4-1, αφού $U_{nSQT3} = 22\text{kV}$. Το αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως του δικτύου SQT3 είναι:

$$I''_{kSQT3} = \frac{S''_{kSQT3}}{\sqrt{3} \cdot U_{nSQT3}} = \frac{354,8025 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = 9,3112\text{kA} \quad (5.257)$$

Έτσι, σύμφωνα με την (4.17), η σύνθετη αντίσταση του δικτύου ανηγμένη στα 6,6 kV είναι:

$$Z_{SQT3} = \frac{c_{SQT3\max} \cdot U_{nSQT3}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kSQT3}} \cdot \frac{1}{t_{r4}^2} = \frac{1,1 \cdot 22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 9,3112 \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{6,6 \cdot 10^3}{22 \cdot 10^3} \right)^2 = 0,135\Omega \quad (5.258)$$

Το δίκτυο έχει ονομαστική τάση $\leq 35\text{kV}$, άρα από τις (4.19), (4.20) ισχύει:

$$R_{SQ} = 0,1 \cdot X_{SQ} \Leftrightarrow X_{SQ} = 0,995 \cdot Z_{SQ} = 0,1344\Omega \quad (5.259)$$

$$R_{SQ} = 0,1 \cdot X_{SQ} = 0,1 \cdot 0,4442 = 0,0134\Omega \quad (5.260)$$

Άρα,

$$\bar{Z}_{SQT3t} = (0,0134 + j \cdot 0,1344)\Omega \quad (5.261)$$

Σύνθετη αντίσταση μετασχηματιστή T4:

Η σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή T4 για το βραχυκύκλωμα F2 ήταν $\bar{Z}_{T4} = (0,3227 + j \cdot 4,2901)\Omega$. Άρα με αναγωγή στην τάση 6,6kV θα είναι:

$$\bar{Z}_{T4} = (0,3227 + j \cdot 4,2901) \cdot \left(\frac{6,6 \cdot 10^3}{22 \cdot 10^3} \right)^2 = (0,029 + j \cdot 0,3861)\Omega \quad (5.261)$$

Πρέπει να εισαχθεί ο συντελεστής διόρθωσης του μετασχηματιστή. Οπότε, από την (4.17) ισχύει:

$$x_{T4} = X_{T4} \cdot \frac{S_{rT4}}{U_{rT4LV}^2} = 0,3861 \cdot \frac{9 \cdot 10^6}{(6,6 \cdot 10^3)^2} = 0,0798 \text{pu} \quad (5.262)$$

Επιλέγεται $c_{\max} = 1,1$ από τον Πίνακα 4-1, αφού $U_{rT4LV} = 6,6\text{kV}$. Ο συντελεστής διόρθωσης του μετασχηματιστή T4 από την (4.26b) είναι:

$$K_{T4} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_{T4}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0798} = 0,9973 \quad (5.263)$$

Έτσι, η διορθωμένη σύνθετη αντίσταση από την (4.26a) είναι:

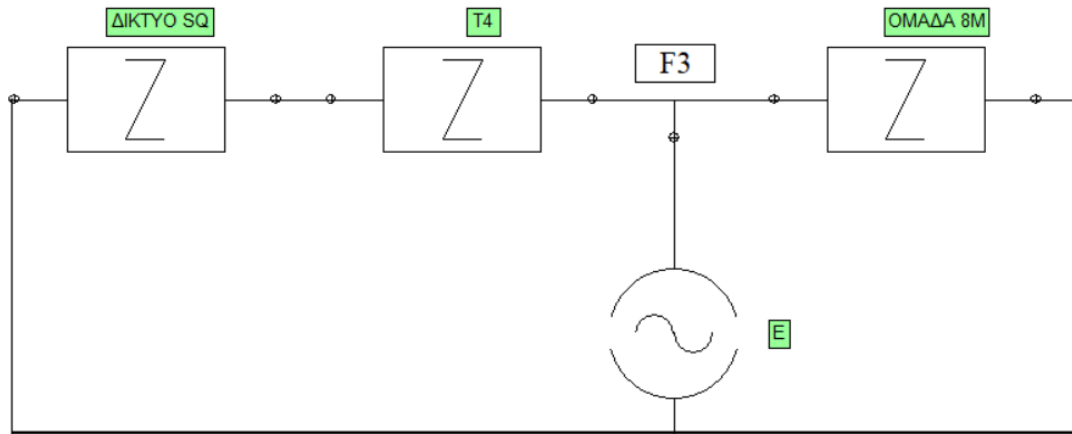
$$\bar{Z}_{T4K} = K_{T4} \cdot \bar{Z}_{T4} = (0,029 + j0,3851)\Omega \quad (5.264)$$

Σύνθετη αντίσταση ομάδας κινητήρων 8M:

Η σύνθετη αντίσταση της ομάδας κινητήρων 8M για το βραχυκύκλωμα F2 ήταν $\bar{Z}_{8M} = (2,0688 + j13,785)\Omega$. Άρα με αναγωγή στα 6,6 kV θα είναι:

$$\bar{Z}_{8M} = (2,0688 + j13,785)\Omega \cdot \left(\frac{6,6 \cdot 10^3}{22 \cdot 10^3} \right)^2 = (0,1861 + j \cdot 1,2406)\Omega \quad (5.265)$$

Στο Σχήμα 5.11 φαίνεται το ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα για βραχυκύκλωμα στο σημείο F3. Η πηγή τάσης έχει τιμή ίση με $E = 1,1 \cdot 6,6 / \sqrt{3}\text{kV}$.



Σχήμα 5.11: Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα για βραχυκύκλωμα στο σημείο F3.

Οι επιμέρους και η συνολική σύνθετη αντίσταση που «φαίνεται» από το σημείο F3 είναι:

$$\bar{Z}_{SQ-T3-F3} = \bar{Z}_{SQ-T3} + \bar{Z}_{T4} = (0,0424 + j0,5194)\Omega \quad (5.266)$$

$$\bar{Z}_{8M-F3} = \bar{Z}_{8M} = (0,1861 + j1,2406)\Omega \quad (5.267)$$

$$\bar{Z}_{eq} = \bar{Z}_{SQ-T3-F3} // \bar{Z}_{8M-F3} = (0,0373 + j0,3665)\Omega \quad (5.268)$$

Υπολογισμός του αρχικού μέγιστου τριπολικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως στο σημείο F3 και τα αντίστοιχα επί μέρους:

Επιλέγεται $c_{max} = 1,1$ από τον Πίνακα 4-1, αφού $U_{N4} = 6,6kV$. Σύμφωνα με την (4.35) το αρχικό μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώσεως και τα αντίστοιχα επί μέρους είναι:

$$I_k'' = \frac{c_{max} \cdot U_{N4}}{\sqrt{3} \cdot Z_{eq}} = \frac{1,1 \cdot 6,6 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,3684} = 11,3785kA \quad (5.269)$$

$$I_{kSQ-T3}'' = \frac{c_{max} \cdot U_{N4}}{\sqrt{3} \cdot Z_{SQ-T3-F3}} = \frac{1,1 \cdot 6,6 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,5212} = 8,0427kA \quad (5.270)$$

$$I_{k8M}'' = \frac{c_{max} \cdot U_{N4}}{\sqrt{3} \cdot Z_{8M-F3}} = \frac{1,1 \cdot 6,6 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1,2545} = 3,3411kA \quad (5.271)$$

Υπολογισμός της ισχύος βραχυκυκλώσεως στο σημείο F3:

Η ισχύς βραχυκυκλώσεως είναι:

$$S_k'' = \sqrt{3} \cdot U_{N4} \cdot I_k'' = \sqrt{3} \cdot 6,6 \cdot 10^3 \cdot 11,3785 \cdot 10^3 = 130,0739MVA \quad (5.272)$$

Υπολογισμός του κρουστικού τριπολικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως στο σημείο F2:

Επειδή στους παράλληλους κλάδους υπάρχουν διαφορετικοί επιμέρους λόγοι R/X , χρησιμοποιείται η μέθοδος της ισοδύναμης συχνότητας για να βρεθεί ένας νέος λόγος. Η ωμική αντίσταση δεν επηρεάζεται από την συχνότητα, συνεπώς παραμένει σταθερή.

$$\bar{Z}_{SQT3-F3} \Big|_{f_c=20\text{Hz}} = (0,0424 + j0,5194 \cdot 20 / 50) = (0,0424 + j0,2078) \Omega \quad (5.273)$$

$$\bar{Z}_{8M-F3} \Big|_{f_c=20\text{Hz}} = (0,1861 + j1,2406 \cdot 20 / 50) = (0,1861 + j0,4963) \Omega \quad (5.274)$$

$$\bar{Z}_{eq} \Big|_{f_c=20\text{Hz}} = \bar{Z}_{S-F3} \Big|_{f_c=20\text{Hz}} // \bar{Z}_{8M-F3} \Big|_{f_c=20\text{Hz}} = (0,037 + j0,1473) \Omega \quad (5.275)$$

Από την (4.52) ισχύει:

$$\frac{R}{X} = \frac{R_{eq}}{X_{eq} \Big|_{f_c=20\text{Hz}}} \cdot \frac{f_c}{f} = \frac{0,037}{0,1473} \cdot \frac{20}{50} = 0,1005 \quad (5.276)$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R}{X}} = 1,7448 \quad (5.277)$$

Έτσι, από την (4.47) το κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι:

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' = 28,0773 \text{ kA} \quad (5.278)$$

Υπολογισμός του ρεύματος διακοπής του δικτύου SQT3 και της ομάδας κινητήρων 8M:

Το ρεύμα διακοπής του δικτύου SQT3 από την (4.52) είναι:

$$I_{bSQT3} = I_{kSQT3}'' = 8,0427 \text{ kA} \quad (5.279)$$

Από την επίλυση με υπολογισμούς ισχύει: $I_{r8M} = 607,4813 \text{ A}$. Σε αυτή την περίπτωση δεν χρειάζεται να ανοιχθεί, καθώς το σημείο βραχυκυκλώσεως F3 είναι στο ίδιο επίπεδο πολιτικής τάσης με την ομάδα κινητήρων 8M.

Για ελάχιστη διάρκεια βραχυκυκλώσεως 0,25s από τον Πίνακα 4-4 και 4-5 ισχύει:

$$\mu_M = 0,56 + 0,94 \cdot e^{-0,38 \cdot I_{k8M}'' / I_{r8M}} = 0,6763 \quad (5.280)$$

$$q_M = 0,26 + 0,1 \cdot \ln(P_{rM} / p) = 0,26 + 0,1 \cdot \ln\left(\frac{625 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^6}\right) = 0,1437 \quad (5.281)$$

Οπότε, το ρεύμα διακοπής της ομάδας κινητήρων 8M από την (4.58) είναι:

$$I_{b8M} = \mu_M \cdot q_M I_{k8M}'' = 324,6567 \text{ A} \quad (5.282)$$

Υπολογισμός του μέγιστου μόνιμου ρεύματος βραχυκυκλώσεως του δικτύου SQ, της ομάδας κινητήρων 8M και το συνολικό για βραχυκύκλωμα στο σημείο F2:

Το μέγιστο μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως του δικτύου SQ, της ομάδας κινητήρων 8M και το συνολικό υπολογίζονται με βάση την Ενότητα 4.10:

$$I_{kSQT3\max} = I''_{kSQT3} = 8,0427\text{kA} \quad (5.283)$$

$$I_{k8M\max} = 0 \quad (5.284)$$

$$I_{k\max} = I_{kSQ\max} = 8,0427\text{kA} \quad (5.285)$$

5.3.3.2 Επίλυση στο σύστημα per-unit

Επιλέγεται:

- Βάση ισχύος: $S_b = 20/3\text{MVA}$.
- Βάση τάσης στο σημείο βραχυκυκλώσεως F2: $U_b = 6,6/\sqrt{3}\text{kV}$.

$$Z_b = \frac{U_b^2}{S_b} = \frac{(6,6 \cdot 10^3 / \sqrt{3})^2}{20 \cdot 10^6 / 3} = 2,178\Omega \quad (5.286)$$

Αρχικά, γίνεται υπολογισμός των σύνθετων αντιστάσεων (pu) όλων των στοιχείων του συστήματος.

Σύνθετη αντίσταση (pu) του κλάδου SQT3-F3:

Από την επίλυση με υπολογισμούς ισχύει: $\bar{Z}_{SQT3-F3} = (0,0866 + j1,4981)\Omega$. Συνεπώς, η σύνθετη αντίσταση (pu) του κλάδου SQT3-F2 είναι:

$$\bar{Z}_{SQT3-F3}(pu) = \frac{\bar{Z}_{SQT3-F3}}{Z_b} = \frac{0,0424 + j0,5194}{2,178} = (0,0195 + j0,2385)pu \quad (5.287)$$

Σύνθετη αντίσταση (pu) του κλάδου 8M-F3:

Από την επίλυση με υπολογισμούς ισχύει: $\bar{Z}_{8M-F3} = (0,1861 + j1,2406)\Omega$. Συνεπώς, η σύνθετη αντίσταση (pu) του κλάδου 8M-F2 είναι:

$$\bar{Z}_{8M-F2}(pu) = \frac{\bar{Z}_{8M-F2}}{Z_b} = \frac{0,1861 + j1,2406}{2,178} = (0,0854 + j0,5696)pu \quad (5.288)$$

Συνολική σύνθετη αντίσταση (pu):

Από την επίλυση με υπολογισμούς ισχύει: $\bar{Z}_{eq} = (0,0373 + j0,3665)\Omega$. Συνεπώς, η συνολική σύνθετη αντίσταση (pu) που «φαίνεται» από το σημείο F2 είναι:

$$\bar{z}_{eq}(\rho u) = \frac{\bar{Z}_{eq}}{Z_b} = \frac{0,0373 + j0,3665}{2,178} = (0,0171 + j0,1638)\rho u \quad (5.289)$$

Υπολογισμός του αρχικού μέγιστου τριπολικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως στο σημείο F3 και τα αντίστοιχα επί μέρους:

Η τιμή της τάσεως (ρu) στο σημείο F2 είναι:

$$u_{F3}(\rho u) = \frac{U_{N4}}{U_b} = \frac{6,6 \cdot 10^3}{6,6 \cdot 10^3} = 1\rho u \quad (5.290)$$

Η τιμή του μέγιστου τριπολικού αρχικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως (ρu) στο σημείο F3 και τα αντίστοιχα επί μέρους είναι:

$$i_k''(\rho u) = \frac{c_{\max} \cdot u_{F3}(\rho u)}{z_{eq}(\rho u)} = \frac{1,1 \cdot 1}{0,1691} = 6,5037\rho u \quad (5.291)$$

$$i_{kSQ}''(\rho u) = \frac{c_{\max} \cdot u_{F3}(\rho u)}{z_{SQT3-F3}(\rho u)} = \frac{1,1 \cdot 1}{0,2392} = 4,5970\rho u \quad (5.292)$$

$$i_{k8M}''(\rho u) = \frac{c_{\max} \cdot u_{F3}(\rho u)}{z_{8M-F3}(\rho u)} = \frac{1,1 \cdot 1}{0,576} = 1,9097\rho u \quad (5.293)$$

Η βάση ρεύματος είναι:

$$I_b = \frac{S_b}{U_b} = \frac{20 \cdot 10^6 / 3}{6,6 \cdot 10^3 / \sqrt{3}} = 1,7495 \text{ kA} \quad (5.294)$$

Άρα, η πραγματική τιμή των μέγιστων ρευμάτων βραχυκυκλώσεως είναι:

$$I_k'' = I_b \cdot i_k''(\rho u) = 11,3785 \text{ kA} \quad (5.295)$$

$$I_{kSQT3}'' = I_b \cdot i_{kSQT3}''(\rho u) = 8,0427 \text{ kA} \quad (5.296)$$

$$I_{k8M}'' = I_b \cdot i_{k8M}''(\rho u) = 3,3411 \text{ kA} \quad (5.297)$$

Υπολογισμός της ισχύος βραχυκυκλώσεως στο σημείο F3:

Η ισχύς βραχυκυκλώσεως (ρu) είναι:

$$s_k''(\rho u) = u_{F3}(\rho u) \cdot i_k''(\rho u) = 6,5037\rho u \quad (5.298)$$

Άρα, η πραγματική τιμή της ισχύς βραχυκυκλώσεως είναι:

$$S_k'' = 3 \cdot S_b \cdot s_k''(\rho u) = 130,074 \text{ MVA} \quad (5.299)$$

Υπολογισμός του κρουστικού τριπολικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως στο σημείο F3:

Θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της ισοδύναμης συχνότητας για να υπολογιστεί το συνολικό κρουστικό ρεύμα.

$$\bar{z}_{SQT3-F3} \Big|_{f_c=20\text{Hz}} (pu) = 0,0195 + j0,2385 \cdot 20 / 50 = (0,0195 + j0,0954) pu \quad (5.300)$$

$$\bar{z}_{8M-F3} \Big|_{f_c=20\text{Hz}} (pu) = 0,0854 + j0,5696 \cdot 20 / 50 = (0,0854 + j0,2279) pu \quad (5.301)$$

$$\bar{z}_{eq} \Big|_{f_c=20\text{Hz}} (pu) = \bar{z}_{SQT3-F3} \Big|_{f_c=20\text{Hz}} (pu) // \bar{z}_{8M-F3} \Big|_{f_c=20\text{Hz}} (pu) = (0,017 + j0,0676) pu \quad (5.302)$$

Από την (4.49) ισχύει:

$$\frac{R}{X} = \frac{r_{eq} (pu)}{x_{eq} \Big|_{f_c=20\text{Hz}} (pu)} \cdot \frac{f_c}{f} = \frac{0,017}{0,0676} \cdot \frac{20}{50} = 1,005 \quad (5.303)$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R}{X}} = 1,7448 \quad (5.304)$$

Έτσι, από την (4.42) το κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι:

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' = 28,0773 \text{kA} \quad (5.305)$$

Υπολογισμός του ρεύματος διακοπής του δικτύου SQT3 και της ομάδας κινητήρων 8M για βραχυκύκλωμα στο σημείο F3:

Το ρεύμα διακοπής του δικτύου SQT3 από την (3.56) είναι:

$$I_{bSQT3} = I_{kSQT3}'' = 8,0427 \text{kA} \quad (5.306)$$

Από την επίλυση με υπολογισμούς ισχύει ότι το ονομαστικό ρεύμα της ομάδα κινητήρων 8M είναι: $I_{r8M} = 607,4813 \text{A}$. Οπότε, το ονομαστικό ρεύμα (pu) της ομάδα κινητήρων 8M είναι:

$$i_{r8M} (pu) = \frac{I_{r8M}}{I_b} = \frac{607,4814}{1,7495 \cdot 10^3} = 0,3472 pu \quad (5.307)$$

Για ελάχιστη διάρκεια βραχυκυκλώσεως 0,25s από τον Πίνακα 4-4 και 4-5 ισχύει:

$$\mu_M = 0,56 + 0,94 \cdot e^{-0,38 \cdot i_{k8M}''(pu) / i_{r8M}(pu)} = 0,6763 \quad (5.308)$$

$$q_M = 0,26 + 0,1 \cdot \ln(P_{r8M} / p) = 0,26 + 0,1 \cdot \ln\left(\frac{625 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^6}\right) = 0,1437 \quad (5.309)$$

Οπότε, το ρεύμα διακοπής (pu) της ομάδας κινητήρων 8M από την (4.58) είναι:

$$i_{b8M}(\rho u) = \mu_M \cdot q_M \cdot i''_{k8M}(\rho u) = 0.1856 \rho u \quad (5.310)$$

Άρα η πραγματική τιμή του ρεύματος διακοπής της ομάδας κινητήρων 8M είναι:

$$I_{b8M} = I_b \cdot i_{b8M}(\rho u) = 324,6567 \text{A} \quad (5.311)$$

Υπολογισμός του μέγιστου μόνιμου ρεύματος βραχυκυκλώσεως του δικτύου SQT3, της ομάδας κινητήρων 8M και το συνολικό για βραχυκύκλωμα στο σημείο F3:

Το μέγιστο μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως του δικτύου SQT3, της ομάδας κινητήρων 8M και το συνολικό ρεύμα με βάση την Ενότητα 4.10:

$$I_{ksQT3\max} = I''_{ksQT3} = 8,0427 \text{kA} \quad (5.312)$$

$$I_{k8M\max} = 0 \quad (5.313)$$

$$I_{k\max} = I_{ksQT3\max} = 8,0427 \text{kA} \quad (5.314)$$

5.3.3.3 Προσομοιώσεις με το λογισμικό NEPLAN

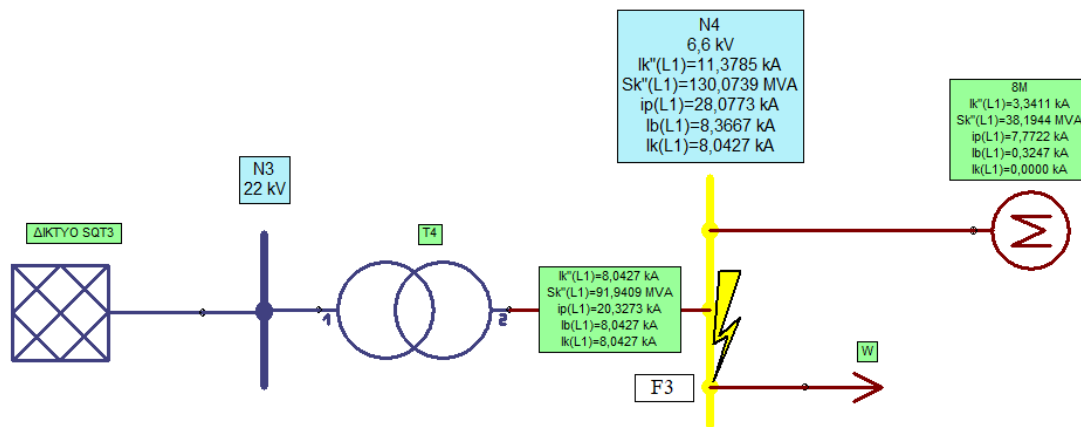
Με την βοήθεια του λογισμικού NEPLAN, υλοποιήθηκε το κύκλωμα του Σχήματος 5.10 για βραχυκύκλωμα στο σημείο F2, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.12. Τα δεδομένα που εισήχθησαν στο NEPLAN, εκτός από όσα δίνονται στην εκφώνηση, είναι:

Η ονομαστική αρχική ισχύς βραχυκυκλώσεως του δικτύου SQT3:

Υπολογίζεται σύμφωνα με την προσομοίωση του λογισμικού NEPLAN για βραχυκύκλωμα στο σημείο F2:

$$S''_{ksQT3} = S''_{ksQ} = 354,8024 \text{MVA} \quad (5.315)$$

Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τις προσομοιώσεις για το τριπολικό βραχυκύκλωμα στο σημείο F3, σύμφωνα με το Σχήμα 5.12, καταγράφονται στον Πίνακα 5-6.



Σχήμα 5.12: αποτελέσματα για τριπολικό βραχυκύκλωμα στο σημείο F3

5.3.3.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Στον Πίνακα 5-6 καταγράφονται τα αποτελέσματα, όπως υπολογίστηκαν με κάθε μέθοδο.

Πίνακας 5-6: Σύγκριση αποτελεσμάτων των τριών μεθόδων επίλυσης

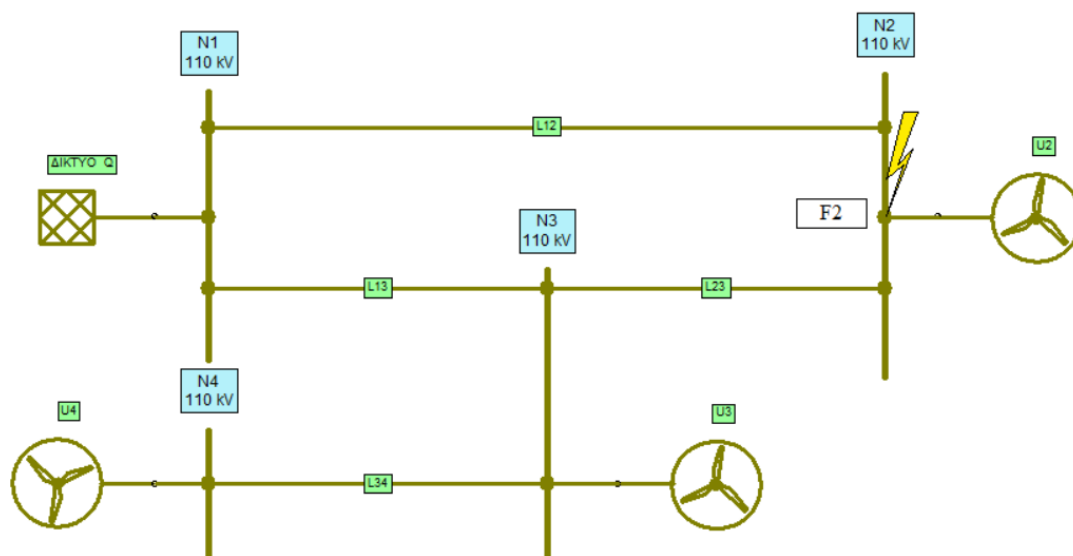
Μεγέθη	Επίλυση με υπολογισμούς	Επίλυση στο σύστημα per-unit	Επίλυση στο λογισμικό Neplan
I_k'' (kA)	11,3785	11,3785	11,3785
$I_{k\Sigma\Omega T3}''$ (kA)	8,0427	8,0427	8,0427
I_{k8M}'' (kA)	3,3411	3,3411	3,3411
S_k'' (MVA)	130,074	130,074	130,0739
i_p (kA)	28,0773	28,0773	28,0773
$I_{b\Sigma\Omega T3}$ (kA)	8,0427	8,0427	8,0427
I_{b8M} (A)	324,6567	324,6567	324,656
$I_{k\Sigma\Omega T3\max}$ (kA)	8,0427	8,0427	8,0427
$I_{k8M\max}$ (kA)	0	0	0
$I_{k\max}$ (kA)	8,0427	8,0427	8,0427

5.4 Δίκτυο με ΑΠΕ

Το Σχήμα 5.13 δείχνει ένα δίκτυο υψηλής τάσης. Το σημείο F2, είναι το σημείο σφάλματος, για το οποίο υπολογίζεται το τριπολικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως. Το δίκτυο τροφοδοτείται από τρεις αιολικούς σταθμούς με μετατροπείς (full-size converters) U2, U3, U4 και από ένα δίκτυο Q. Τα δεδομένα των διαφόρων στοιχείων του δικτύου συνοψίζονται στον Πίνακα 5-7 [8].

Πίνακας 5-7: Δεδομένα δικτύου

Στοιχείο	Δεδομένα
Δίκτυο Q	$U_{nQ} = 110\text{kV}$, $I''_{kQ} = 20\text{kA}$, $R_Q / X_Q = 0,1$
Εναέρια γραμμή L12, L13, L23, L34	$l_{12} = 100\text{km}$, $l_{13} = l_{23} = 50\text{km}$, $l_{34} = 25\text{km}$, $R'_L = 0,12\Omega/\text{km}$, $X'_L = 0,393\Omega/\text{km}$
Μετατροπείς U2, U3, U4	$P_{U2} = 100\text{MW}$, $P_{U3} = P_{U4} = 50\text{MW}$, $I_{kU} = k \cdot I_{rU}$, $k = 1,2$



Σχήμα 5.13: Σύνθετο δίκτυο ΣΗΕ με ΑΠΕ.

5.4.1 Υπολογισμοί σφάλματος F2

Για τον υπολογισμό του τριπολικού βραχυκυκλώματος στη θέση F2 να υπολογιστούν τα παρακάτω:

- Οι σύνθετες αντιστάσεις κάθε στοιχείου του δικτύου.
- Το ισοδύναμο κύκλωμα για τριπολικό βραχυκύκλωμα στο σημείο F2.
- Το αρχικό μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώσεως στο σημείο F2.
- Το συνολικό κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως στο σημείο F2.
- Το ρεύμα διακοπής στο σημείο F2.
- Το μέγιστο μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως στο σημείο F2.

5.4.1.1 Επίλυση με υπολογισμούς

Αρχικά, υπολογίζονται οι σύνθετες αντιστάσεις όλων των στοιχείων του συστήματος σύμφωνα με το Κεφάλαιο 4.

Εναέρια γραμμή L12, L13, L23, L34:

Η σύνθετη αντίσταση των εναέριων γραμμών L12, L13, L23 και L34 είναι:

$$\bar{Z}_{L12} = I_{12} \cdot (R_L' + jX_L') = 100 \cdot (0,12 + j0,393) = (12 + j39,3)\Omega \quad (5.316)$$

$$\bar{Z}_{L13} = \bar{Z}_{L23} = I_{13} \cdot (R_L' + jX_L') = 50 \cdot (0,12 + j0,393) = (6 + j19,65)\Omega \quad (5.317)$$

$$\bar{Z}_{L34} = I_{34} \cdot (R_L' + jX_L') = 25 \cdot (0,12 + j0,393) = (3 + j9,825)\Omega \quad (5.318)$$

Σύνθετη αντίσταση δικτύου Q:

Επιλέγεται $c_{Qmax} = 1,1$ από τον Πίνακα 4-1, αφού $U_{nQ} = 110kV$. Έτσι, σύμφωνα με την (4.17):

$$Z_Q = \frac{c_{Qmax} U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}''} = \frac{1,1 \cdot 110 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3} = 3,493\Omega \quad (5.319)$$

Για το δίκτυο Q ισχύει:

$$R_Q = 0,1 \cdot X_Q \Leftrightarrow X_Q = 0,995 \cdot Z_Q = 3,4756\Omega \quad (5.320)$$

$$R_Q = 0,1 \cdot X_Q = 0,1 \cdot 3,4756 = 0,3476 \quad (5.321)$$

Άρα,

$$\bar{Z}_Q = (0,3476 + j \cdot 3,4756)\Omega \quad (5.322)$$

Μετατροπείς U2, U3, U4 (αιολικά πάρκα):

Οι μετατροπείς σε περίπτωση τριπολικού βραχυκυκλώματος προσομοιώνονται ως πηγές ρεύματος με άπειρη αντίσταση. Τα ονομαστικά ρεύματα των μετατροπέων είναι:

$$I_{rU2} = \frac{P_{U2}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{100 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3} = 0,5249 \text{ kA} \quad (5.323)$$

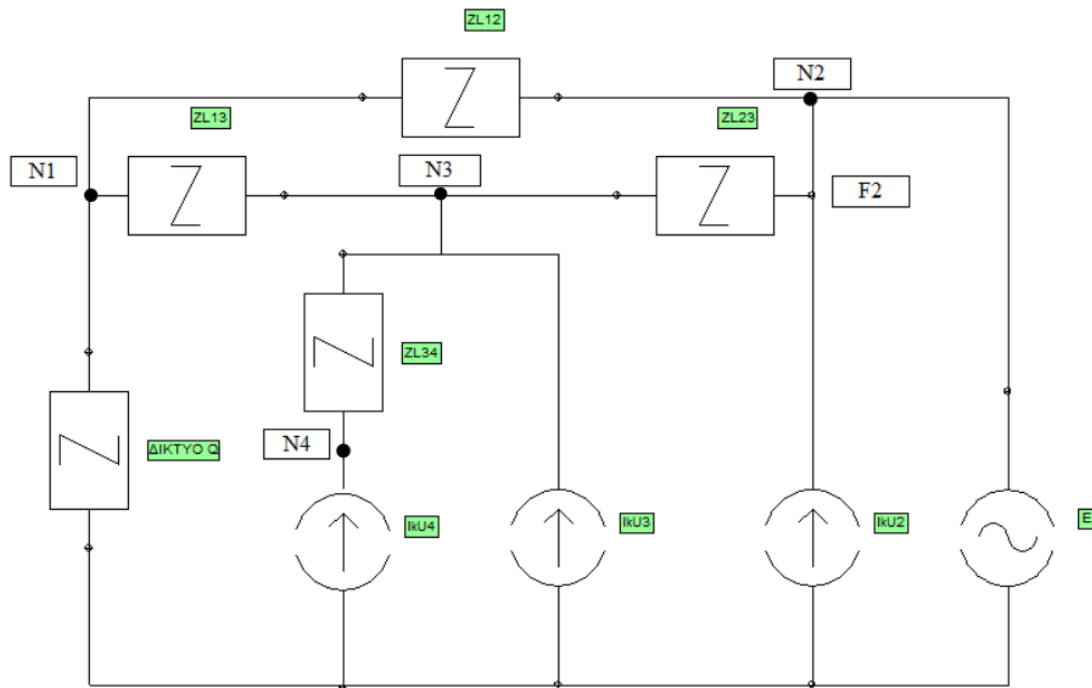
$$I_{rU3} = I_{rU4} = \frac{P_{U3}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{50 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3} = 0,2624 \text{ kA} \quad (5.324)$$

Οι rms τιμή του ρεύματος με το οποίο τροφοδοτεί κάθε μετατροπέας το τριπολικό βραχυκύκλωμα είναι:

$$I_{kU2} = k \cdot I_{rU2} = 1,2 \cdot 0,5249 = 0,6298 \text{ kA} \quad (5.325)$$

$$I_{kU3} = I_{kU4} = k \cdot I_{rU3} = 1,2 \cdot 0,2624 = 0,3149 \text{ kA} \quad (5.326)$$

Στο Σχήμα 5.14 φαίνεται το ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα για βραχυκύκλωμα στο σημείο F2. Επιλέγεται $c_{\max} = 1,1$ από τον Πίνακα 4-1, αφού $V_{N2} = 110 \text{ kV}$. Η πηγή τάσης έχει τιμή ίση με $E = 1,1 \cdot 110 / \sqrt{3} \text{ kV}$.



Σχήμα 5.14: Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα για βραχυκύκλωμα στο σημείο F2.

Υπολογισμός του αρχικού μέγιστου τριπολικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως στο σημείο F2:

Το σημείο βραχυκυκλώσεως F2 τροφοδοτείται και από σταθμούς παραγωγής με μετατροπείς (αιολικά πάρκα), οπότε το μέγιστο τριπολικό αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως υπολογίζεται από την (4.40). Συνεπώς, απαιτείται να βρεθεί ο πίνακας σύνθετων αντιστάσεων του μονοφασικού ισοδύναμου με την βοήθεια της μεθόδου κόμβων.

Για τον κόμβο N1 ισχύει:

$$\begin{aligned} V_1 \cdot Y_Q + (V_1 - V_2) \cdot Y_{L12} &= (V_3 - V_1) \cdot Y_{L13} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow V_1 \cdot (Y_Q + Y_{L12} + Y_{L23}) + V_2 \cdot (-Y_{L12}) + V_3 \cdot (-Y_{L13}) + V_4 \cdot (0) &= 0 \end{aligned} \quad (5.327)$$

Για τον κόμβο N2 ισχύει:

$$\begin{aligned} (V_2 - V_1) \cdot Y_{L12} + (V_2 - V_3) \cdot Y_{L23} &= I_{kU2} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow V_1 \cdot (-Y_{L12}) + V_2 \cdot (Y_{L12} + Y_{L23}) + V_3 \cdot (-Y_{L23}) + V_4 \cdot (0) &= I_{kU2} \end{aligned} \quad (5.328)$$

Για τον κόμβο N3 ισχύει:

$$\begin{aligned} (V_4 - V_3) \cdot Y_{L34} + I_{kU3} &= (V_3 - V_1) \cdot Y_{L13} + (V_3 - V_2) \cdot Y_{L23} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow V_1 \cdot (-Y_{L13}) + V_2 \cdot (-Y_{L23}) + V_3 \cdot (Y_{L13} + Y_{L23} + Y_{L34}) + V_4 \cdot (-Y_{L34}) &= I_{kU3} \end{aligned} \quad (5.329)$$

Για τον κόμβο N4 ισχύει:

$$\begin{aligned} (V_4 - V_3) \cdot Y_{L34} &= I_{kU4} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow V_1 \cdot (0) + V_2 \cdot (0) + V_3 \cdot (-Y_{L34}) + V_4 \cdot (Y_{L34}) &= I_{kU4} \end{aligned} \quad (5.330)$$

Συνεπώς, ισχύει ότι:

$$I_{kU} = \begin{pmatrix} I_{kU1} \\ I_{kU2} \\ I_{kU3} \\ I_{kU4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0,6298 \\ 0,3149 \\ 0,3149 \end{pmatrix} \text{ kA} \quad (5.331)$$

$$Y = \begin{pmatrix} Y_Q + Y_{L12} + Y_{L13} & -Y_{L12} & -Y_{L13} & 0 \\ -Y_{L12} & Y_{L12} + Y_{L23} & -Y_{L23} & 0 \\ -Y_{L13} & -Y_{L23} & Y_{L13} + Y_{L23} + Y_{L34} & -Y_{L34} \\ 0 & 0 & -Y_{L34} & Y_{L34} \end{pmatrix} \quad (5.332)$$

Για τις αγωγιμότητες ισχύει:

$$Y_{L12} = \frac{1}{Z_{L12}} = (0,0071 - j0,0233) \text{ S} \quad (5.333)$$

$$Y_{L13} = Y_{L23} = \frac{1}{Z_{L13}} = (0,0142 - j0,0466)S \quad (5.334)$$

$$Y_{L34} = \frac{1}{Z_{L34}} = (0,0284 - j0,0931)S \quad (5.335)$$

$$Y_Q = \frac{1}{Z_Q} = (0,0285 - j0,2849)S \quad (5.336)$$

Άρα, ο πίνακας Y είναι:

$$Y = \begin{pmatrix} 0,0498 + j0,3547 & -0,0071 + j0,0233 & -0,0142 + j0,0466 & 0 \\ -0,0071 + j0,0233 & 0,0213 - j0,0698 & -0,0142 + j0,0466 & 0 \\ -0,0142 + j0,0466 & -0,0142 + j0,0466 & 0,0569 - j0,1862 & -0,0284 + j0,0931 \\ 0 & 0 & -0,0284 + j0,0931 & 0,0284 - j0,0931 \end{pmatrix} S \quad (5.337)$$

Ο πίνακας Z είναι ο αντίστροφος του Y (οι τιμές του προέκυψαν με την βοήθεια του περιβάλλοντος MATLAB):

$$Z = \begin{pmatrix} 0,3476 + j3,4756 & 0,3476 + j3,4756 & 0,3476 + j3,4756 & 0,3476 + j3,4756 \\ 0,3476 + j3,4756 & 6,3476 + j23,1256 & 3,3476 + j13,3006 & 3,3476 + j13,3006 \\ 0,3476 + j3,4756 & 3,3476 + j13,3006 & 4,8476 + j18,2131 & 4,8476 + j18,2131 \\ 0,3476 + j3,4756 & 3,3476 + j13,3006 & 4,8476 + j18,2131 & 7,8476 + j28,0381 \end{pmatrix} \Omega \quad (5.338)$$

Το βραχυκύκλωμα βρίσκεται στον κόμβο N2. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.13 η τάση της ισοδύναμη πηγής $V_2 = E = 1,1 \cdot 110 / \sqrt{3} \text{ kV}$ εφαρμόζεται στον κόμβο N2. Για να βρεθεί το αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως στο σημείο F2 πρέπει να υπολογιστεί ξεχωριστά η συνεισφορά των μετατροπέων, I_{kPF}'' , με την συνεισφορά του υπόλοιπου δικτύου, $I_{k\max PFO}''$ στο αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως I_k'' .

Για να υπολογιστεί η συνεισφορά του δικτύου χωρίς τους μετατροπείς, όλα τα ρεύματα του συστήματος θεωρούνται μηδενικά εκτός από το αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως $I_2 = I_{k\max PFO}''$ στο σημείο F2, που προέρχεται μόνο από το δίκτυο Q. Οι μετατροπείς θεωρούνται ανοιχτοκυκλώματα, καθώς δεν λαμβάνεται υπόψη η συνεισφορά τους ($I_{kUi} = 0$) και έχουν άπειρη αντίσταση ($Z_{Ui} = \infty$). Συνεπώς, ισχύει:

$$V_i = Z \cdot I_i \Leftrightarrow \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ I''_{k_{\max PFO}} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.339)$$

Άρα, η συνεισφορά του δικτύου Q στο αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι:

$$V_2 = Z_{22} \cdot I''_{k_{\max PFO}} \Leftrightarrow 1,1 \cdot \frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 23,9810 \cdot I''_{k_{\max PFO}} \Leftrightarrow I''_{k_{\max PFO}} = 2,9131 \text{kA} \quad (5.340)$$

Για να υπολογιστεί η συνεισφορά των μετατροπέων, όλα τα ρεύματα θεωρούνται μηδενικά εκτός από το αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως $I_2 = I''_{k_{PF}}$ στο σημείο F2, που προέρχεται μόνο τους μετατροπείς. Η τάση στο σημείο βραχυκυκλώσεως F2, στον κόμβο N2, είναι μηδενική καθώς ο κόμβος είναι βραχυκυκλωμένος. Συνεπώς, ισχύει:

$$V_i = Z \cdot (I_i - I_{kUj}) \Leftrightarrow \begin{pmatrix} V_1 \\ 0 \\ V_3 \\ V_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} \end{pmatrix} \cdot \left[\begin{pmatrix} 0 \\ I''_{k_{PF}} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} I_{kU1} \\ I_{kU2} \\ I_{kU3} \\ I_{kU4} \end{pmatrix} \right] \quad (5.341)$$

Άρα, η συνεισφορά των μετατροπέων στο αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι:

$$\begin{aligned} 0 &= Z_{22} \cdot I_{k_{PF}} - (Z_{21} \cdot I_{kU1} + Z_{22} \cdot I_{kU2} + Z_{23} \cdot I_{kU3} + Z_{24} \cdot I_{kU4}) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow I''_{k_{PF}} = \frac{1}{Z_{22}} \cdot \sum_{j=1}^n Z_{2j} \cdot I_{kUj} = 0,9901 \text{kA} \end{aligned} \quad (5.342)$$

Άρα, το μέγιστο τριπολικό αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως σύμφωνα με την (4.40) είναι:

$$I''_{k_{\max}} = I''_{k_{\max PFO}} + I''_{k_{PF}} = 3,9032 \quad (5.343)$$

Υπολογισμός του κρουστικού τριπολικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως στο σημείο F2:

Η συνεισφορά των μετατροπέων στο συνολικό κρουστικό ρεύμα σύμφωνα με την (4.47) είναι:

$$i_{pPF} = \sqrt{2} \cdot I''_{k_{PF}} = \sqrt{2} \cdot 0,9901 = 1,4002 \text{kA} \quad (5.344)$$

Για να υπολογιστεί η συνεισφορά του δικτύου Q στο κρουστικό ρεύμα απαιτείται να βρεθεί ο όρος κ ο οποίος υπολογίζεται μέσω του λόγου R/X από την (4.52). Όποτε, η συμβολή του δικτύου Q στο κρουστικό ρεύμα είναι:

$$\frac{R}{X} = \frac{R_{22}}{X_{22}} = \frac{6,3476}{23,1256} = 0,2745 \quad (5.345)$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R}{X}} = 1,4501 \quad (5.346)$$

Έτσι, από την (3.51) η συμβολή του δικτύου Q στο κρουστικό ρεύμα είναι:

$$i_{pPFO} = \kappa \sqrt{2} I''_{k_{\max PFO}} = 5,9742 \text{ kA} \quad (5.347)$$

Άρα, το κρουστικό ρεύμα σύμφωνα με την (4.49) είναι:

$$i_p = i_{pPFO} + i_{pPF} = 5,9742 + 1,4002 = 7,3744 \text{ kA} \quad (5.348)$$

Υπολογισμός του ρεύματος διακοπής στο σημείο F2:

Το βραχυκύκλωμα στο σημείο F2 αποτελεί ένα βραχυκύκλωμα πολλαπλών τροφοδοσιών. Συνεπώς, το συνολικό ρεύμα διακοπής υπολογίζεται ως:

$$I_b = I''_{k_{\max}} = 3,9032 \text{ kA} \quad (5.349)$$

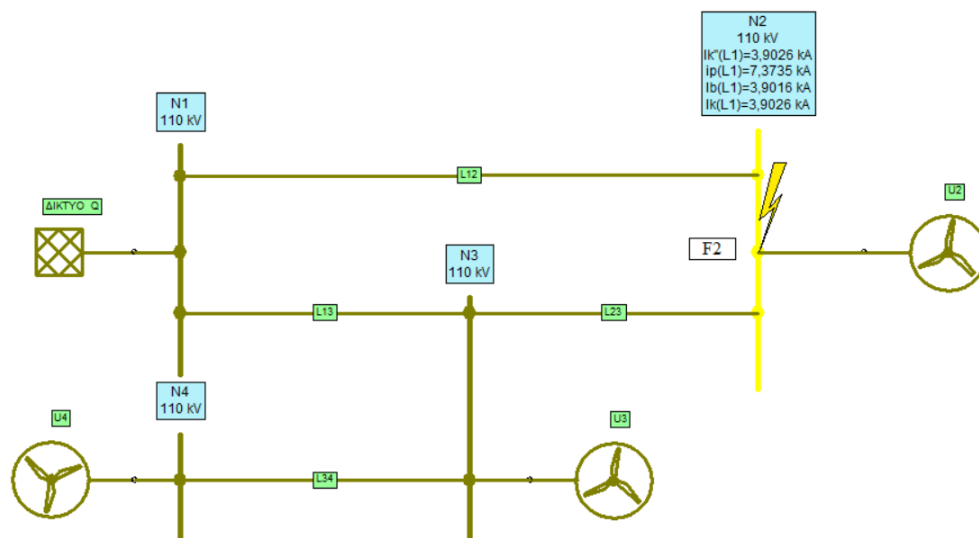
Υπολογισμός του μέγιστου μόνιμου ρεύματος βραχυκυκλώσεως στο σημείο F2:

Το συνολικό μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώσεως υπολογίζεται από την (4.49):

$$I_{k_{\max}} = I_{bMO} = I_b = 3,9032 \text{ kA} \quad (5.350)$$

5.4.1.2 Προσομοιώσεις με το λογισμικό NEPLAN

Με την βοήθεια του λογισμικού NEPLAN, υλοποιήθηκε το κύκλωμα του Σχήματος 5.13 για βραχυκύκλωμα στο σημείο F2, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.15.



Σχήμα 5.15: αποτελέσματα για τριπολικό βραχυκύκλωμα στο σημείο F2

5.4.1.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Στον Πίνακα 5-8 καταγράφονται τα αποτελέσματα, όπως υπολογίστηκαν με κάθε μέθοδο.

Πίνακας 5-8: Σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων επίλυσης

Μεγέθη	Επίλυση με υπολογισμούς	Επίλυση στο λογισμικό Neplan
I_k'' (kA)	3,9032	3,9026
i_p (kA)	7,3744	7,3735
I_{bmax} (kA)	3,9032	3,9016
I_{kmax} (kA)	3,9032	3,9026

6 Μεταβατικές φαινόμενα στα ΣΗΕ

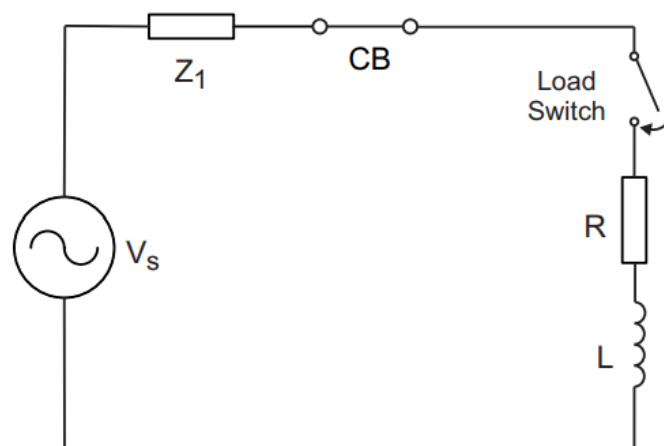
6.1 Γενικά

Όποτε συμβαίνει κάποια αλλαγή σε ένα ΣΗΕ, τα ηλεκτρικά του μεγέθη (τάση, ρεύμα, κτλ.) δεν αλλάζουν στιγμιαία, αλλά ακολουθούν μια ορισμένη μεταβατική διαδικασία. Αυτό συμβαίνει επειδή αποθηκεύεται ενέργεια στα χωρητικά και επαγωγικά φορτία του συστήματος, και με οποιαδήποτε αλλαγή ξεκινάει μια μεταβατική διαδικασία μεταξύ των αρχικών και τελικών σταθερών καταστάσεων [9]. Για να προσδιοριστεί η διαδικασία της μετάβασης χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός Laplace.

6.2 Κύκλωμα RL

Σε αυτή την ενότητα αναλύεται η ενεργοποίηση ενός επαγωγικού φορτίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1. Το φορτίο είναι ένας συνδυασμός ωμικής και επαγωγικής αντίστασης με συντελεστή ισχύος [9]:

$$\cos \varphi = \frac{R}{|Z|} = \frac{R}{(R^2 + (\omega \cdot L)^2)^{1/2}} \quad (6.1)$$



Σχήμα 6.1: κύκλωμα RL [9].

Η πηγή θεωρείται μηδενικής αντίστασης και τάσης $V_s(t) = V_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \theta)$. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, η διαφορική εξίσωση $I = I(t)$ που εκφράζει το ρεύμα είναι:

$$R \cdot I + L \cdot \frac{dI}{dt} = V_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \theta) \quad (6.2)$$

Σύμφωνα με τον μετασχηματισμό Laplace, ισχύει:

$$R \cdot i(s) + L \cdot s \cdot i(s) - L \cdot I(0) = V_0 \cdot \frac{s \cdot \sin \theta + \omega \cdot \cos \theta}{s^2 + \omega^2} \quad (6.3)$$

Από τις αρχικές συνθήκες σε αυτό το παράδειγμα ισχύει $I(0) = 0$. Οπότε, θεωρώντας $a = R/L$ τότε η (6.3) λύνετε ως προς $i(s)$:

$$i(s) = \frac{V_0 \cdot \omega \cdot \cos \theta}{L} \frac{1}{(s+a) \cdot (s^2 + \omega^2)} + \frac{V_0 \cdot \sin \theta}{L} \frac{s}{(s+a) \cdot (s^2 + \omega^2)} \quad (6.4)$$

Αναδιατυπώνοντας τον πρώτο όρο της (6.4) ισχύει:

$$\frac{1}{(s+a) \cdot (s^2 + \omega^2)} = \frac{1}{a^2 + \omega^2} \cdot \left(\frac{1}{s+a} - \frac{s}{s^2 + \omega^2} - \frac{a}{s^2 + \omega^2} \right) \quad (6.5)$$

Άρα, ο αντίστροφος μετασχηματισμός της (6.4) στο πεδίο του χρόνου σύμφωνα με την (6.5) είναι:

$$I(t) = \frac{V_0 \cdot \omega \cdot \cos \theta}{L \cdot (a^2 + \omega^2)} \cdot \left(e^{-a \cdot t} - \cos(\omega \cdot t) + \frac{a}{\omega} \cdot \sin(\omega \cdot t) \right) - \frac{V_0 \cdot \sin \theta}{L \cdot (a^2 + \omega^2)} \cdot (a \cdot e^{-a \cdot t} - a \cdot \cos(\omega \cdot t) + \omega \cdot \sin(\omega \cdot t)) \quad (6.6)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι θεωρήθηκε ότι $a = R/L$, η (6.1) απλοποιείται σε:

$$\cos \varphi = \frac{a}{(a^2 + \omega^2)^{1/2}} \quad (6.7)$$

και

$$\sin \varphi = \frac{\omega}{(a^2 + \omega^2)^{1/2}} \quad (6.8)$$

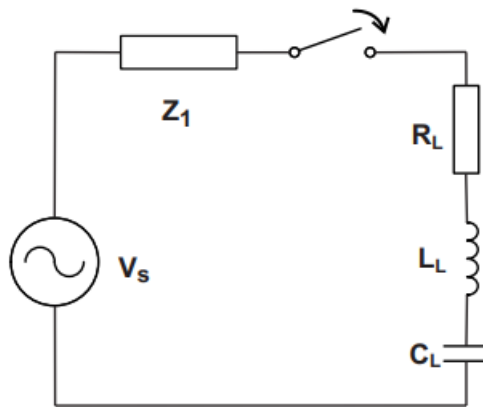
Άρα, και η (6.6) απλοποιείται σε:

$$I(t) = \frac{V_0}{(R^2 + (\omega \cdot L)^2)^{1/2}} \cdot [\sin(\omega \cdot t + \theta - \varphi) - \sin(\theta - \varphi) \cdot e^{-\sigma t}] \quad (6.9)$$

Ο πρώτος όρος της (6.9) εκφράζει τη μόνιμη κατάσταση. Το ρεύμα έχει πλάτος $I_0 = V_0 / |Z|$ και υστερεί της τάσης κατά γωνία φ . Ο δεύτερος όρος περιγράφει τη μεταβατική κατάσταση από την αρχική στη μόνιμη κατάσταση. Τη στιγμή $t = 0$, όπου κλείνει ο διακόπτης, η τιμή της μόνιμης κατάστασης είναι ίση και αντίθετη από την μετάβαση διασφαλίζοντας ότι $I(0) = 0$. Στην ειδική περίπτωση όπου $\theta = \varphi$, τότε ο μεταβατικός όρος είναι μηδενικός και η κυματομορφή του ρεύματος είναι ημιτονοειδής και συμμετρική ως προς τον άξονα του χρόνου. Ενώ, εάν ισχύει $\theta - \varphi = \pm \pi / 2$, τότε ο μεταβατικός όρος λαμβάνει τη μέγιστη δυνατή τιμή και η πρώτη κορυφή του ρεύματος λαμβάνει τιμή η οποία προσεγγίζει το διπλάσιο πλάτος του ρεύματος μόνιμης κατάστασης [9].

6.3 Κύκλωμα RLC

Οι περισσότερες μεταβατικές καταστάσεις στα ΣΗΕ αναλύονται σε απλούστερα κυκλώματα. Για αυτό πρόκειται να αναλυθεί η συμπεριφορά του κυκλώματος RLC με όλα τα στοιχεία σε σειρά όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.3 [9].



Σχήμα 6.2: κύκλωμα RLC [9].

Για το κύκλωμα του Σχήματος 6.2 ισχύει:

$$R \cdot I(t) + L \cdot \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int I(t) dt = U_G \quad (6.10)$$

Όπου $U_G = V_s(0)$ είναι η τιμή της τάσης τη στιγμή που κλείνει το κύκλωμα. Σύμφωνα με τους με τον μετασχηματισμό Laplace, ισχύει:

$$R \cdot i(s) + L \cdot s \cdot i(s) - L \cdot I(0) + \frac{1}{s \cdot C} \cdot i(s) + \frac{Q_c(0)}{s \cdot C} = \frac{U_G}{s} \quad (6.11)$$

Το ρεύμα πριν κλείσει ο διακόπτης είναι $I(0) = 0$ και ο πυκνωτής είναι αφόρτιστος $Q_c(0) = 0$. Συνεπώς, για την (6.11) ισχύει:

$$i(s) = \frac{U_G}{L} \cdot \frac{1}{s^2 + s \cdot \frac{R}{L} + \frac{1}{L \cdot C}} \quad (6.12)$$

Οι πόλοι του παρονομαστή είναι:

$$s_{1,2} = -\frac{R}{2 \cdot L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4 \cdot L^2} - \frac{1}{L \cdot C}} = -a \pm \sqrt{a^2 - \omega_0^2} = -a \pm j\nu \quad (6.13)$$

Όπου έχουν εισαχθεί οι παρακάτω σταθερές για να διευκολύνουν τους υπολογισμούς:

- $a = \frac{R}{2 \cdot L}$ είναι η σταθερά απόσβεσης.
- $\omega_0^2 = \frac{1}{L \cdot C}$ είναι η φυσική συχνότητα του συστήματος απουσία απόσβεσης.
- $\nu^2 = \omega_0^2 - a^2$ είναι η συχνότητα συντονισμού.

Οπότε η (6.12) μπορεί να γραφτεί:

$$i(s) = \frac{U_G}{L} \cdot \frac{1}{(s-s_1) \cdot (s-s_2)} = \frac{U_G}{L} \cdot \frac{1}{s_1-s_2} \cdot \left(\frac{1}{s-s_1} - \frac{1}{s-s_2} \right) \quad (6.14)$$

Άρα, ο μετασχηματισμός της (6.14) στον χρόνο είναι:

$$I(t) = \frac{U_G}{L} \cdot \frac{1}{s_1-s_2} \cdot (e^{s_1 t} - e^{s_2 t}) \quad (6.15)$$

6.3.1 Υποαπόσβεση ή ασθενής απόσβεση

Εάν η απόσβεση του κυκλώματος είναι ασθενής (weak damping), δηλ. ισχύει $R^2 < 4 \cdot L / C$, η συχνότητα συντονισμού είναι πραγματικός αριθμός ($\nu \approx \omega_0$) και για το ρεύμα ισχύει [9]:

$$I(t) = \frac{U_G}{L} \cdot \frac{1}{(-a + j\omega_0 + \alpha + j\omega_0)} \cdot (e^{(-\alpha + j\omega_0)t} - e^{(-\alpha - j\omega_0)t}) \Leftrightarrow$$

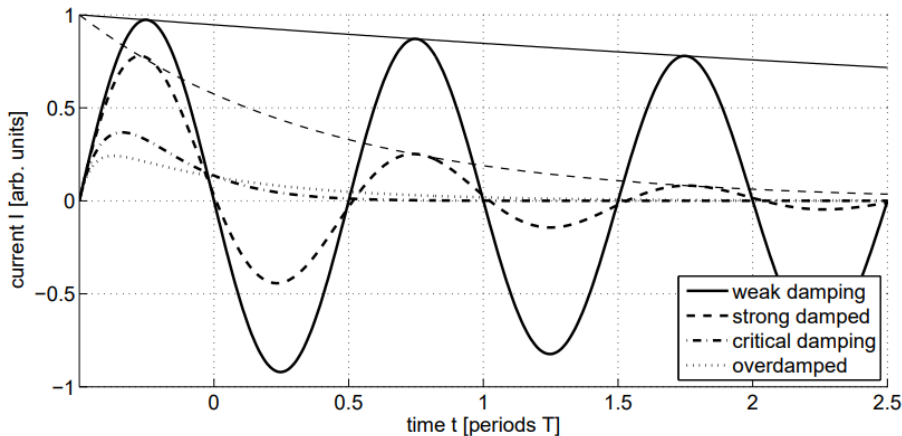
$$\Leftrightarrow I(t) = \frac{U_G}{L \cdot \omega_0} \cdot e^{-a \cdot t} \cdot (e^{j\omega_0 \cdot t} - e^{-j\omega_0 \cdot t}) = \frac{U_G}{L \cdot \omega_0} \cdot e^{-a \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) \quad (6.16)$$

Η ταλάντωση του ρεύματος εξαρτάται από τη σταθερά απόσβεσης a και τη φυσική συχνότητα του ή συχνότητα συντονισμού του συστήματος ω_0 . Η κυματομορφή του ρεύματος, γι' αυτό το κύκλωμα (underdamped oscillating circuit) φαίνεται στο Σχήμα 6.3.

6.3.2 Υπεραπόσβεση

Ισχύει ότι: $\nu^2 = \omega_0^2 - a^2 = \frac{1}{L \cdot C} - \frac{R^2}{4 \cdot L^2}$. Οπότε, όσο αυξάνει η ωμική αντίσταση R

τόσο μειώνεται η συχνότητα συντονισμού ν . Εάν το σύστημα χαρακτηρίζεται από ισχυρή απόσβεση (υπεραπόσβεσης), $R^2 > 4 \cdot L / C$ η συχνότητα συντονισμού αντιστοιχεί σε φανταστικό αριθμό και οι δύο πόλοι $s_{1,2}$ γίνονται πραγματικοί [9]. Η ταλάντωση του ρεύματος δίνεται από την (5.16) και φαίνεται στο Σχήμα 6.4. Η ειδική περίπτωση όπου $R^2 = 4 \cdot L / C$ καλείται κρίσιμη απόσβεση (critical damping) και επίσης απεικονίζεται στο Σχήμα 6.4.

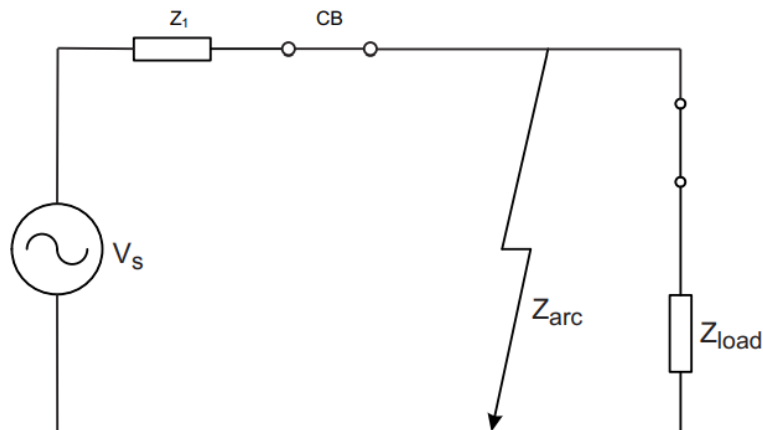


Σχήμα 6.3: Κυματομορφή ρεύματος ανάλογα με την απόσβεση [9].

6.4 Ρεύμα βραχυκυκλώσεως

Το βραχυκύκλωμα σε ένα κύκλωμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.4, είναι παρόμοιο με μονοφασικό βραχυκύκλωμα με επαφή γης σε μία γραμμή μονού κυκλώματος. Πριν το βραχυκύκλωμα το ρεύμα έχει πλάτος $I_{load} = V_0 / |Z_{load}|$. Τη στιγμή που συμβαίνει το

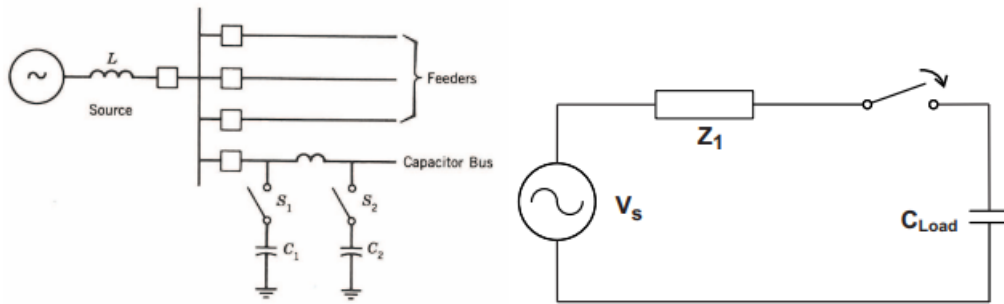
βραχυκύκλωμα το κύκλωμα αλλάζει μορφή και εμφανίζει σχεδόν επαγωγική συμπεριφορά ακόμα και αν ο συντελεστής ισχύος ήταν προηγουμένως 1. Το τόξο σφάλματος παρουσιάζει πολύ μικρή ωμική αντίσταση και η επαγωγική αντίδραση του συστήματος είναι τάξεις μεγαλύτερη από την αντίστασή του. Το ρεύμα αυξάνεται ραγδαία λόγω της δραστηκής μείωσης της σύνθετης αντίστασης και υστερεί της τάσης κατά 90° . Αυτή η αλλαγή δεν πραγματοποιείται ακαριαία αλλά μεσολαβεί μια διαδικασία μεταβατικής μετάβασης. Ανάλογα με τη δομή του συστήματος, το πλάτος του μεταβατικού ρεύματος δύναται να είναι πάνω από το διπλάσιο του μόνιμου ρεύματος βραχυκυκλώσεως. Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 62271-100, η τυπική σταθερά χρόνου $\tau=1/\alpha$ ισούται με 45ms για δίκτυα ισχύος. Οι διακόπτες του συστήματος ενεργοποιούνται μετά από 2 έως 3 περιόδους, συνεπώς διακόπτουν οποιοδήποτε ασύμμετρο ρεύμα με πλάτος μεγαλύτερο του μόνιμου ρεύματος βραχυκυκλώσεως.



Σχήμα 6.4: Κύκλωμα μονοπολικού βραχυκυκλώματος [9].

6.5 Συστοιχίες πυκνωτών

Οι συστοιχίες πυκνωτών στα συστήματα ισχύος τοποθετούνται συχνά μεταξύ αγωγού φάσης και ουδετέρου ή αγωγού φάσης και γης. Βοηθούν στη βελτίωση του συντελεστή ισχύος ή παρέχουν στήριξη τάσης στο σύστημα. Οι συστοιχίες πυκνωτών συνδέονται και αποσυνδέονται με το υπόλοιπο σύστημα ανάλογα με τη μεταβολή του φορτίου και τη μεταβολή της τάσης. Οι συστοιχίες πυκνωτών αποτελούνται από παράλληλα τμήματα, τα οποία ενεργοποιούνται ανεξάρτητα μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.5 [9].



Σχήμα 6.5: Συστοιχίες πυκνωτών με την μονοφασική αναπαράσταση ενός πυκνωτή [9].

Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει το αντίστοιχο ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα (Σχήμα 6.5), όπου $i = i(t)$ είναι:

$$L \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int i dt = V_s(t) \quad (6.17)$$

Το ρεύμα πριν κλείσει ο διακόπτης είναι $i(0) = 0$. Επίσης, ισχύει ότι η φυσική συχνότητα ή συχνότητα συντονισμού (resonance frequency) ή ιδιοσυχνότητα ω_0 του κυκλώματος απουσία απόσβεσης είναι $\omega_0^2 = 1/(L \cdot C)$ και η χαρακτηριστική (κυματική) αντίσταση $Z_0 = \sqrt{L/C}$. Για τη φυσική συχνότητα f_0 ισχύει ότι $f_0 = \omega_0 / (2 \cdot \pi) \gg 50\text{Hz}$, συνεπώς η τάση της πηγής παραμένει σχεδόν σταθερή καθ' όλη την διάρκεια των μεταβατικών φαινομένων. Σύμφωνα με τον μετασχηματισμό Laplace, ισχύει:

$$L \cdot s \cdot i(s) - L \cdot i(0) + \frac{1}{s \cdot C} \cdot i(s) + \frac{Q(0)}{s \cdot C} = \frac{V_s(0)}{s} \quad (6.18)$$

Για έναν αφόρτιστο πυκνωτή, $Q(0) = 0$, ισχύει:

$$i(s) = \frac{V_s(0)}{L} \cdot \frac{1}{s^2 + \omega_0^2} = \frac{V_s(0)}{Z_0} \cdot \frac{\omega_0}{s^2 + \omega_0^2} \quad (6.19)$$

Άρα, ο μετασχηματισμός της (6.19) στον χρόνο είναι:

$$i(t) = \frac{V_s(0)}{Z_0} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) \quad (6.20)$$

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι είναι μείζονος σημασίας ποια χρονική στιγμή θα κλείσει ο διακόπτης. Η κίνηση των μηχανικών μερών των διακοπών είναι αργή σε σχέση με τη συχνότητα του συστήματος και οι επαφές πλησιάζουν ελάχιστα κατά τη διάρκεια ενός πλήρους ηλεκτρικού κύκλου.

Η ακριβής στιγμή που κλείνει το κύκλωμα δεν είναι η στιγμή που εφάπτονται οι επαφές, αλλά η στιγμή που η κινητή επαφή έχει πλησιάσει την σταθερή επαφή τόσο όσο η ισχύς του ηλεκτρικού πεδίου στις επαφές να γίνει μεγαλύτερη από την τάση διάσπασης του διακένου. Έτσι, εμφανίζεται ηλεκτρικό τόξο πριν την μηχανική επαφή και επιτρέπει την εισροή ρεύματος (inrush current) [10]. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται «pre-strike breakdown». Επίσης, επειδή η κίνηση των επαφών είναι αργή, η διάσπαση εμφανίζεται όταν μεγιστοποιείται η τάση και έτσι τότε εμφανίζεται και το μέγιστο ρεύμα εισροής. Επειδή, η κυματική αντίσταση της συστοιχίας πυκνωτών είναι πολύ μικρή, λόγω μικρής αυτεπαγωγής και μεγάλης χωρητικότητας, το μεταβατικό ρεύμα αναμένεται να αποκτήσει μέγεθος αρκετές τάξεις μεγαλύτερο σε σχέση με το ρεύμα στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας [9].

Σημαντικά μεταβατικά ρεύματα υψηλής συχνότητας, όπως αυτό που περιεγράφηκε παραπάνω, προκαλούν πολλά προβλήματα στα ΣΗΕ. Δημιουργούν ισχυρές μηχανικές καταπονήσεις στα στοιχεία του δικτύου και ανεπιθύμητες αλληλεπιδράσεις σε γειτονικά δίκτυα. Έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι για τον περιορισμό των ρεύματα εισροής σε διατάξεις συστοιχιών πυκνωτών. Δύναται να χρησιμοποιηθούν αντιστάσεις αλλά εάν δεν βραχυκυκλωθούν μετά το πέρας του μεταβατικού φαινομένου τότε εμφανίζονται ωμικές απώλειες στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας. Για αυτό απαιτείται ένας δεύτερος διακόπτης ο οποίος είναι πιο περίπλοκος και κοστοβόρος. Μια άλλη μέθοδος είναι η χρησιμοποίηση σύγχρονης εναλλαγής (ή ελεγχόμενη εναλλαγή), η οποία δίνει τη δυνατότητα επιλογής του ακριβούς χρονικού σημείου του ηλεκτρικού κύκλου όπου γίνεται η ενεργοποίηση του διακόπτη κάτι το οποίο γίνεται, ιδανικά, όταν δεν υπάρχει διαφορά δυναμικού μεταξύ των επαφών (poles) του. Αυτό απαιτεί υψηλή ευαισθησία στον διακόπτη και ακριβή και συνεπή λειτουργία των μηχανικών μερών του. Για την αποφυγή του «pre-strike breakdown» χρησιμοποιούνται ταχείς διακόπτες ημιαγωγών [9].

6.6 Μεταβατικές καταστάσεις διακοπής λειτουργίας κυκλώματος

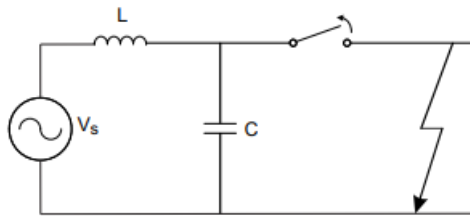
Όταν ένας διακόπτης ανοίγει, οπότε διακόπτει τη λειτουργία ενός κυκλώματος ή απομονώνει ένα βραχυκύκλωμα τότε αλλάζει η δομή του κυκλώματος. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη των μεταβατικών αποκρίσεων που αφορούν στη διαφορά δυναμικού μεταξύ των ανοιχτών επαφών, καθώς εμφανίζονται σημαντικές μηχανικές δυνάμεις όπου μπορούν να προκαλέσουν βλάβη και ανεπιτυχή διακοπή του ρεύματος [9].

6.6.1 Διακοπτόμενα ρεύματα βραχυκυκλώσεως

Προηγουμένως, περιεγράφηκαν οι μεταβατικές αποκρίσεις για την περίπτωση βραχυκυκλώματος έως το ρεύμα να φτάσει στη μόνιμη κατάστασή του. Στην ενότητα αυτή αναλύονται οι μεταβατικές αποκρίσεις του ρεύματος όταν το βραχυκύκλωμα διακοπεί [9].

Η αυτεπαγωγή L της γραμμής είναι ο μόνος ουσιαστικός παράγοντας που περιορίζει το ρεύμα στο σημείο βραχυκυκλώσεως, καθώς η επίδραση της χωρητικότητας C είναι πολύ περιορισμένη. Η C αντιστοιχεί στη χωρητικότητα προς γη εμφανίζεται μεταξύ των επαφών του διακόπτη και της γης καθώς η μία επαφή του διακόπτη (στην πλευρά του βραχυκυκλώματος) θα έχει γειωθεί. Οι ωμικές αντιστάσεις του κυκλώματος παραλείπονται προς το παρόν προς διευκόλυνση των υπολογισμών.

Στο κύκλωμα του Σχήματος 6.6 το ρεύμα θεωρείται ότι είναι συμμετρικό και πλήρως επαγωγικό καθώς περιορίζεται σχεδόν αποκλειστικά από την αυτεπαγωγή. Βέβαια, όσον αφορά το ρεύμα βραχυκυκλώσεως, σε αυτό υπεισέρχεται μία DC συνιστώσα που μερικές φορές δεν έχει μηδενιστεί τη στιγμή του σφάλματος. Αυτό σημαίνει ότι τη χρονική στιγμή που το ρεύμα είναι μηδέν η τάση στις επαφές του διακόπτη μεγιστοποιείται και επομένως κατά μήκος του πυκνωτή C υπάρχει ένα τόξο τάσης. Για κυκλώματα υψηλής τάσης αυτό το τόξο αποτελεί πολύ μικρό ποσοστό της τάσης του συστήματος. Ενώ για κυκλώματα χαμηλής τάσης είναι πιο σημαντικό. Προς το παρόν θα θεωρηθεί αμελητέα.



Σχήμα 6.6: Διακοπή βραχυκυκλώματος [9].

Σε αυτή την ανάλυση, η χρονική στιγμή $t=0$ θεωρείται η στιγμή της διακοπής του βραχυκυκλώματος όπου το ρεύμα μόλις έχει μηδενιστεί, καθώς αυτό είναι το σημείο όπου ανοίγει ένας διακόπτης. Συνεπώς η πηγή τάσεως τη στιγμή $t=0$ έχει μέγιστη τιμή. Άρα εκφράζεται ως $U_0 \cdot \cos(\omega \cdot t)$. Η εξίσωση που περιγράφει το κύκλωμα του Σχήματος 6.6 είναι:

$$U_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) = L \frac{di}{dt} + U_c \quad (6.21)$$

Από τη στιγμή που έχει ανοίξει ο διακόπτης το ρεύμα εξαρτάται από τη μεταβολή της τάσης του πυκνωτή:

$$I = C \cdot \frac{dU_c}{dt} \quad (6.22)$$

Σύμφωνα με τις (6.21) και (6.22) ισχύει:

$$\frac{U_0}{L \cdot C} \cdot \cos(\omega \cdot t) = L \cdot \frac{d^2 U_c}{dt^2} + \frac{U_c}{L \cdot C} \quad (6.23)$$

Σύμφωνα με τον μετασχηματισμό Laplace, με $\omega_0^2 = 1 / (L \cdot C)$, ισχύει:

$$s^2 \cdot u_c(s) - s \cdot U_c(0) - \frac{dU_c(0)}{dt} + \omega_0^2 \cdot u_c(s) = \omega_0^2 \cdot U_0 \cdot \frac{s}{s^2 + \omega^2} \quad (6.24)$$

Αφού το τόξο τάσης θεωρείται αμελητέο τότε $U_c(0) = 0$. Επίσης, τη χρονική στιγμή $t=0$ ισχύει $I(0) = 0$ και $\frac{dU_c(0)}{dt} = I(0) / C = 0$. Συνεπώς η (6.24) απλοποιείται σε:

$$u_c(s) = \frac{\omega_0^2 \cdot U_0}{\omega_0^2 - \omega^2} \cdot \left(\frac{s}{s^2 + \omega^2} - \frac{s}{s^2 + \omega_0^2} \right) \quad (6.25)$$

Άρα, ο μετασχηματισμός της (6.25) στο πεδίο του χρόνου είναι:

$$U_c(t) = \frac{\omega_0^2 \cdot U_0}{\omega_0^2 - \omega^2} \cdot (\cos(\omega \cdot t) - \cos(\omega_0 \cdot t)) \quad (6.26)$$

Αυτή είναι η τάση που εμφανίζεται στην επαφές του διακόπτη όταν το ρεύμα μηδενιστεί και καλείται κλασσική μεταβατική τάση ανάκαμψης (classical transient recovery voltage - TRV). Επίσης, ισχύει ότι $\omega_0 \gg \omega$ άρα η (5.26) απλοποιείται σε:

$$U_c(t) = U_0 \cdot (\cos(\omega \cdot t) - \cos(\omega_0 \cdot t)) \quad (6.27)$$

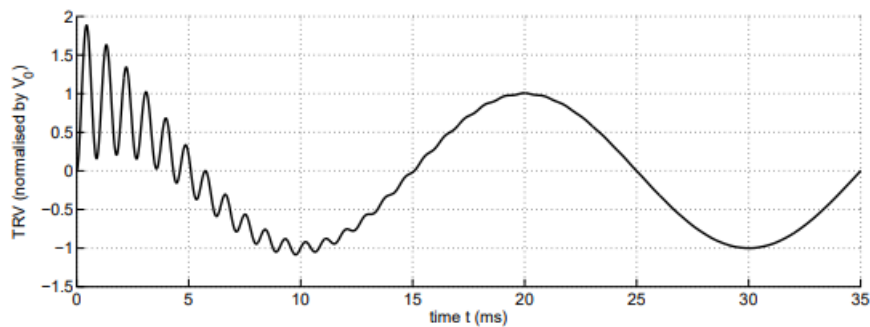
Κατά τη διαδικασία υπολογισμού της (6.27) δεν συμπεριλήφθηκε κανένα στοιχείο ωμικής αντίστασης. Εάν υπήρχε μία αντίσταση R σε σειρά με την αυτεπαγωγή τότε η (6.27) θα γινόταν:

$$U_c(t) = U_0 \cdot \left(\cos(\omega \cdot t) - e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \right) \quad (6.28)$$

Όπως φαίνεται και στο παράδειγμα του Σχήματος 6.7, η τάση TRV αυξάνεται ραγδαία και φτάνει ως και το διπλάσιο του πλάτους της τάσης του συστήματος. Αυτό

σημαίνει ότι ο διακόπτης πρέπει να έχει αντοχή τάσης τουλάχιστον τη διπλάσια τάση συστήματος σε μόλις 450μs μετά το άνοιγμα του διακόπτη σε αυτό το συγκεκριμένο παράδειγμα. Αυτή είναι μια πολύ σημαντική απαίτηση και ειδικότερα ο ρυθμός αύξησης της τάσης ανάκαμψης TRV (rate of rise of TRV) είναι πολύ σημαντικός στις εφαρμογές διακοπών.

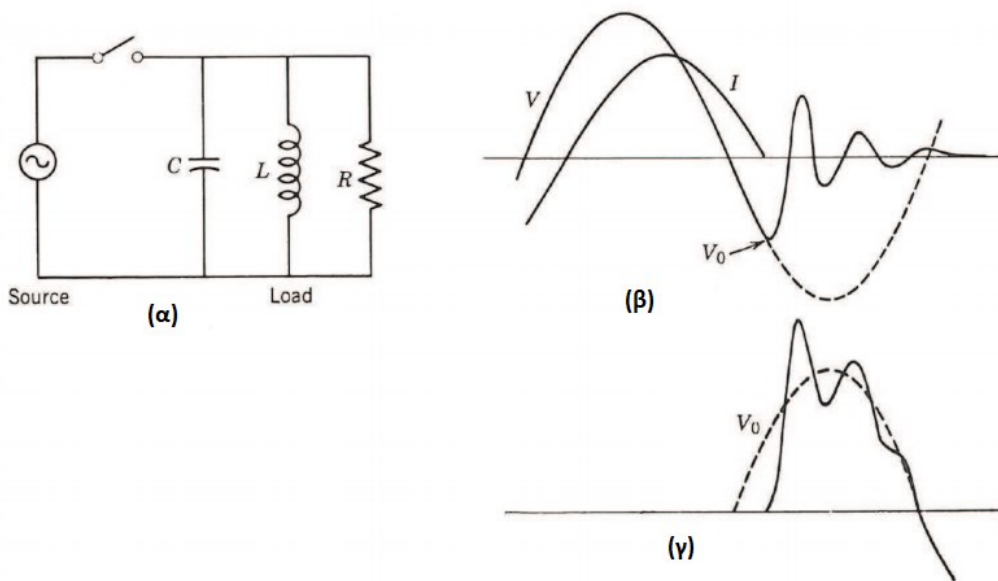
Όπως έχει ήδη αναλυθεί, όταν το σφάλμα συμβαίνει σε τυχαία στιγμή τότε το ρεύμα βραχυκυκλώσεως δεν είναι συμμετρικό και ο βαθμός ασυμμετρίας του εξαρτάται με τη στιγμή που γίνεται το σφάλμα κατά τη διάρκεια της περιόδου. Ο διακόπτης ανοίγει όταν το ρεύμα μηδενιστεί στιγμιαία και η τάση TRV ταλαντώνεται στιγμιαία προς την τάση τροφοδοσίας. Αντίθετα, με τα συμμετρικά, τα ασύμμετρα σφάλματα έχουν μεγαλύτερο πλάτος ρεύματος βραχυκυκλώσεως, αλλά και χαμηλότερη τάση TRV.



Σχήμα 6.7: παράδειγμα τάσης TRV στις επαφές του διακόπτη με $R/(2 \cdot L) = 250$, $f_0 = 1,125$ kHz, $f = 50$ Hz [9].

6.6.2 Αποσύνδεση φορτίου

Οι πιο συνηθισμένες διαδικασίες που εκτελούν οι διακόπτες είναι η σύνδεση και η αποσύνδεση φορτίων, τα οποία συνήθως αναπαρίστανται με ένα παράλληλο RL κύκλωμα. Τα κυκλώματα με υψηλό συντελεστή ισχύος είναι κατά κύριο λόγο ωμικά ενώ με χαμηλό επαγωγικά. Όταν σε ένα τέτοιο κύκλωμα όπως στο Σχήμα 6.8, διακόπτης ανοίγει, τότε η χωρητικότητα C αποκτάει καθοριστικό ρόλο για τις μεταβατικές αποκρίσεις που εμφανίζονται [9].



Σχήμα 6.8: (α) Παράλληλο κύκλωμα RLC, (β) μεταβατική απόκριση τάσης του φορτίου, (γ) μεταβατική απόκριση τάσης του διακόπτη [9].

Το φορτίο του Σχήματος 6.8(α) παρουσιάζει υψηλό συντελεστή ισχύος. Ο διακόπτης ανοίγει όταν το ρεύμα μηδενιστεί στιγμιαία και τότε η τάση του φορτίου είναι V_0 . Ο πυκνωτής C φορτίζεται σε αυτή την τάση και εκφορτίζεται μέσω του πηνίου L και της ωμικής αντιστάσεως R . Στο Σχήμα 6.8(β) παρουσιάζεται η αποσβεννύμενη ταλάντωση της τάσης λόγω της εκφόρτισης του πυκνωτή. Όσο ο συντελεστής ισχύος βελτιώνεται (πλησιάζει να γίνει ωμικό φορτίο, $\cos\phi = 1$), τόσο η διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος μειώνεται. Αν το φορτίο γίνει καθαρά ωμικό, τότε τάση και ρεύμα είναι συμφασικά, συνεπώς τη στιγμή που ανοίγει ο διακόπτης το ρεύμα έχει μηδενική τιμή άρα και η τάση. Άρα δεν υπάρχει μεταβατική απόκριση.

6.6.3 Διακοπή τριφασικού κυκλώματος

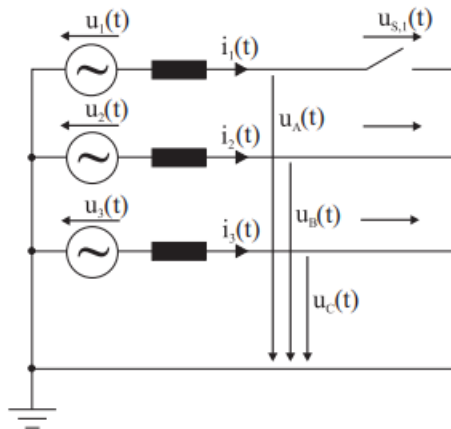
Όταν διακόπτεται η ροή του ρεύματος σε ένα τριφασικό δίκτυο, τότε οι θερμικές και οι διηλεκτρικές καταπονήσεις στις τρεις διακοπτόμενες φάσεις συνήθως διαφέρουν σημαντικά. Προς διευκόλυνση των υπολογισμών, θεωρείται ότι οι διακόπτες συνδέονται μηχανικά μεταξύ τους και η στιγμή του ανοίγματος είναι κοινή για όλες τις φάσεις. Για να μελετηθούν οι διεργασίες που προκαλούν οι διακόπτες στα τριφασικά δίκτυα είναι απαραίτητο να κατηγοριοποιηθούν τα δίκτυα σε [9]:

- Σε στερεά γειωμένα (solidly grounded) δίκτυα και με γειωμένο ουδέτερο. Εδώ το ρεύμα μπορεί να ρέει προς τη σύνδεση με τη γη. Οι τρεις φάσεις θεωρούνται

αποζευγμένες, δηλαδή όλες οι φάσεις δύναται να αναλυθούν ως ξεχωριστά μονοφασικά κυκλώματα.

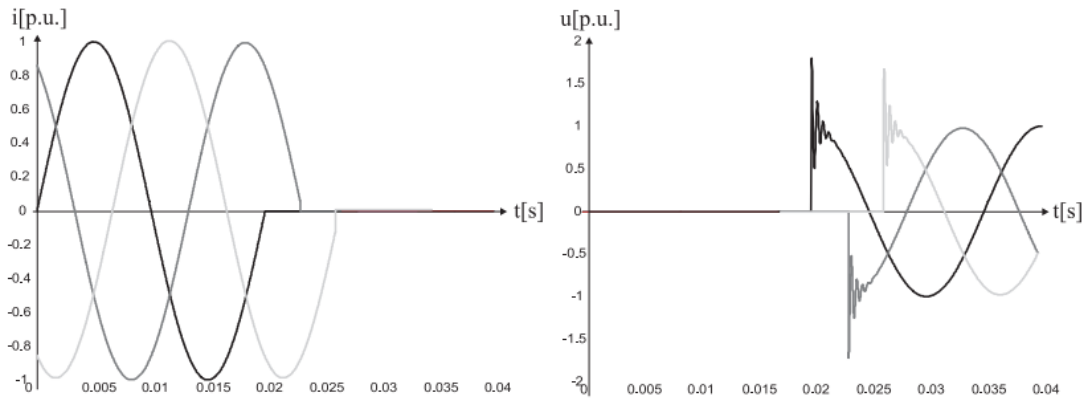
- Σε δίκτυα που συνδέονται με τη γη μέσω πολύ μεγάλης αντίστασης ή ο ουδέτερος του φορτίου έχει διακοπεί· τότε μη ισοζυγισμένα ρεύματα ρέουν προς την γη. Αυτό οδηγεί σε ζεύξη των φασικών τάσεων επειδή το άθροισμα των τριών φασικών ρευμάτων είναι μηδενικό κάθε χρονική στιγμή.

Τα δίκτυα υψηλής τάσης είναι συνήθως στερεά γειωμένα. Σε ένα τέτοιο δίκτυο με ιδανικά γειωμένο τον ουδέτερο κόμβο της γεννήτριας εάν υπάρξει βραχυκύκλωμα τότε αφού υπάρχει σύνδεση με τη γη το ρεύμα μπορεί να ρέει. Οι τρεις φάσεις του δικτύου μπορούν να προσεγγιστούν και σαν ανεξάρτητα δίκτυα. Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος οι επαγωγές του δικτύου λειτουργούν σαν στοιχεία περιορισμού ρεύματος. Στο παράδειγμα του Σχήματος 6.9 φαίνεται ένα τέτοιο δίκτυο όπου έχει ανοίξει ο διακόπτης μόνο της μιας φάσης λόγω βραχυκυκλώματος.



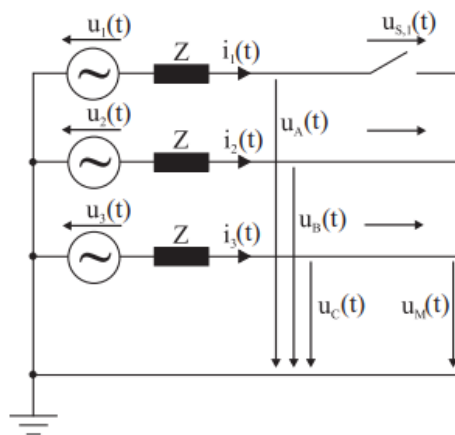
Σχήμα 6.9: τριπολικό βραχυκύκλωμα με σύνδεση γης [9].

Το άνοιγμα των τριών διακοπών γίνεται ταυτόχρονα με μηχανική ζεύξη. Το σύστημα ελέγχου οδηγεί στην απομάκρυνση των επαφών του διακόπτη και συνεπώς, εμφανίζεται ηλεκτρικό τόξο και στους τρεις διακόπτες παράλληλα. Το ρεύμα της φάσης που θα μηδενιστεί πρώτο μπορεί να διακοπεί και η τάση κατά μήκος του διακόπτη υπολογίζεται από την (6.29), δηλαδή είναι η τάση TRV αφότου διακοπεί το ρεύμα. Το ίδιο ισχύει και για τις άλλες δύο φάσεις απλά πρέπει πρώτα να μηδενιστεί το ρεύμα το οποίο γίνεται μετά από 60° και 120° , αντίστοιχα.

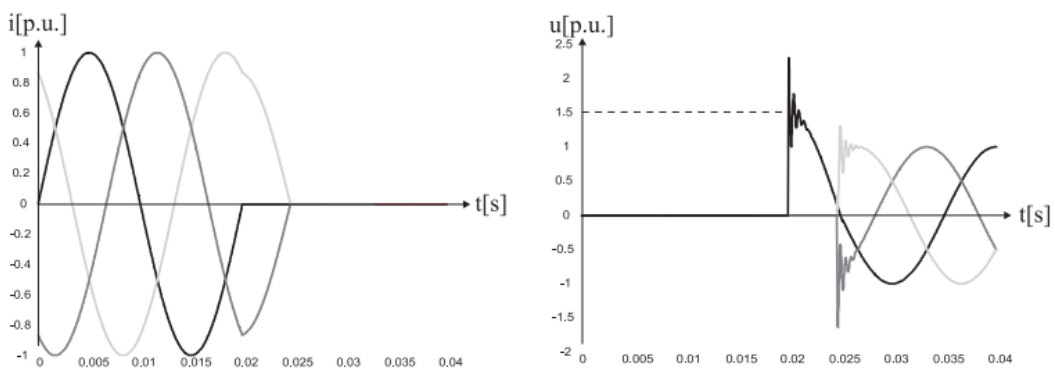


Σχήμα 6.10: Διαγράμματα ρεύματος και τάσης κατά μήκος των διακοπών για τριπολικό βραχυκύκλωμα με σύνδεση γης σε στερεό γειωμένο δίκτυο [9].

Σε τριφασικά δίκτυα με γειωμένο τον ουδέτερο μέσω πολύ μεγάλων αντιστάσεων ή χωρίς καθόλου γείωση ουδετέρου (Σχήμα 6.11) οι τρεις φάσεις δεν μπορούν να θεωρηθούν ως ανεξάρτητες. Λόγω της έλλειψης ουδετέρου το άθροισμα των ρευμάτων γραμμής πρέπει να είναι συνεχώς ίσο με το μηδέν [9].



Σχήμα 6.11: Τριπολικό βραχυκύκλωμα χωρίς σύνδεση γης [9].



Σχήμα 6.12: Διαγράμματα ρεύματος και τάσης κατά μήκος των διακοπών για τριπολικό βραχυκύκλωμα χωρίς ουδέτερο [9].

Αφού ανοίξει ο πρώτος διακόπτης, εμφανίζεται τόξο και στους τρεις διακόπτες. Έτσι, η πρώτη φάση διακόπτεται όταν το ρεύμα μηδενιστεί στιγμιαία, ενώ στις άλλες δύο φάσεις το τόξο παραμένει. Όμως το άθροισμα των φασικών ρευμάτων συνεχίζει να είναι μηδενικό. Άρα μετά τη διακοπή της πρώτης φάσης ισχύει $i_2(t) + i_3(t) = 0$, άρα τα ρεύματα των δύο άλλων φάσεων είναι αντίθετα με ίσο πλάτος. Επίσης, μετά το άνοιγμα του πρώτου διακόπτη η τάση η τάση u_1 δεν επιδράει πια στον ουδέτερο κόμβο, όπου η τάση u_M δεν θα έχει πλέον μηδενική τιμή. Η τιμή της υπολογίζεται μέσω του νόμου του Kirchoff:

$$-u_2(t) + i_2(t) \cdot Z - i_3(t) \cdot Z + u_3(t) = 0 \Leftrightarrow i_2(t) = \frac{u_2(t) - u_3(t)}{2 \cdot Z} \quad (6.29)$$

Όσο αφορά την τάση u_M υπολογίζεται από:

$$u_M(t) = u_2(t) - i_2(t) \cdot Z \quad (6.30)$$

$$u_M(t) = u_3(t) - i_3(t) \cdot Z \quad (6.31)$$

Άρα, προσθέτοντας τις κατά μέλη ισχύει:

$$u_M(t) = \frac{u_2(t) + u_3(t)}{2} \quad (6.32)$$

Άρα το πλάτος της τάσης του ουδέτερου, u_M , αυξάνεται κατά 0,5 p.u. Επίσης, η τάση στα άκρα του διακόπτη είναι $u_{s,1}(t) = u_A(t) - u_M(t)$, όμως αφού δεν ρέει καθόλου ρεύμα στην πρώτη φάση τότε $u_A(t) = u_1(t)$, άρα ισχύει:

$$u_{s,1}(t) = u_1(t) - \frac{u_2(t) + u_3(t)}{2} \quad (6.33)$$

Άρα, η τάση στον διακόπτη είναι 1,5 φορές μεγαλύτερη από την τάση του δικτύου, δηλ. η κυματομορφή της TRV μεταβάλλεται κατά 1,5 p.u., οδηγώντας σε υπερτάσεις της τάξης των 3 p.u. Στην πραγματικότητα ωστόσο σε τέτοιες περιπτώσεις, η ταλάντωση της TRV δεν κυμαίνεται σε μικρότερα επίπεδα.

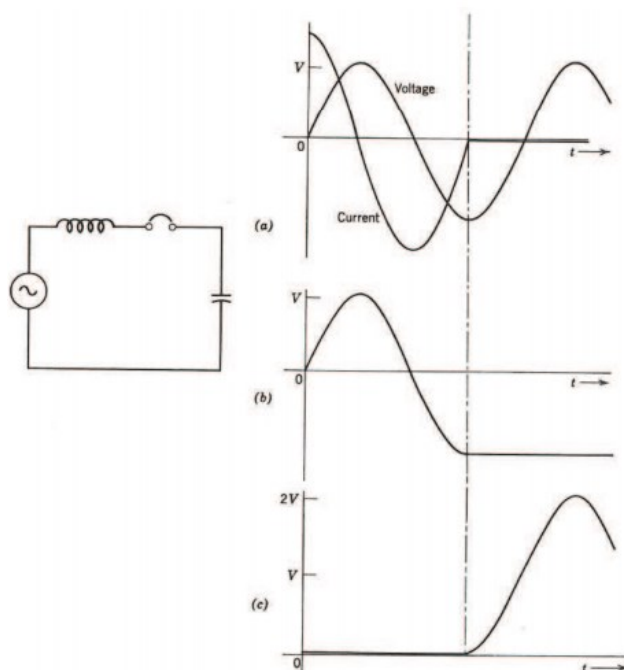
Όπως αποδείχθηκε τα ρεύματα στις φάσεις 2 και 3 που δεν έχουν διακοπεί ακόμα και είναι αντίθετα με ίσα πλάτη. Έτσι, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.12 η διάρκεια της ροής ρεύματος στη μία φάση αυξάνει ενώ στην άλλη μειώνεται αντίστοιχα. Αυτή η εναλλαγή εμφανίζεται στις 60° και 120°, ή 240° και 300°. Οπότε, η φασικές τάσεις πριν

διακοπούν οι δύο φάσεις αποκτούν πλάτος $\sin(60^\circ)$ p.u. = 0,866 p.u.. Συνεπώς, σε αυτές τις φάσεις τα επίπεδα υπερτάσεως είναι μικρότερα [9].

6.6.4 Διακοπή συστοιχίας πυκνωτών

Έχει ήδη περιγραφεί η συμπεριφορά μιας συστοιχίας πυκνωτών όταν συνδέεται στο δίκτυο. Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η μεταβατική συμπεριφορά της όταν αποσυνδέεται από αυτό. Τέτοιες διατάξεις μπορεί να γίνουν πολύ επικίνδυνες. Το πρόβλημα μπορεί να διογκωθεί εάν ο διακόπτης ενεργοποιηθεί ή επαναφλεγεί κατά την διάρκεια του ανοίγματός του. Η πιθανότητα να συμβεί αυτό είναι πολύ μικρή, αλλά δεν μπορεί να αγνοηθεί καθώς η διαδικασία εναλλαγής των πυκνωτών είναι αρκετά συχνή [9].

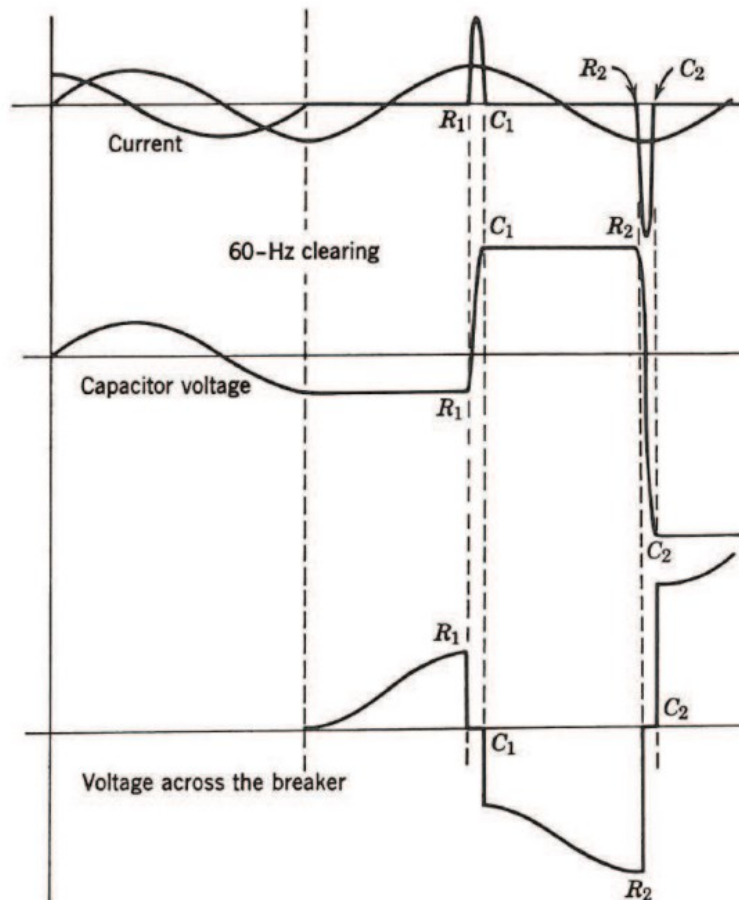
Το Σχήμα 6.13 παρουσιάζει τις κυματομορφές τάσης και ρεύματος της πηγής, της τάσης του πυκνωτή και της τάσης κατά μήκος του διακόπτη πριν και μετά από επιτυχημένο άνοιγμα του διακόπτη. Επειδή το ρεύμα προηγείται της τάσης κατά 90° τότε τη στιγμή της διακοπής (όταν το ρεύμα έχει μηδενική τιμή άρα και μηδενική φάση) και ο πυκνωτής φορτίζεται στη μέγιστη τάση U_p . Μετά τη διακοπή, ο πυκνωτής απομονώνεται από την πηγή και διατηρεί την τάση που είχε εκείνη την στιγμή. Όσον αφορά τον διακόπτη, μετά το άνοιγμα του η τάση ταλαντώνεται από $0 \sim 2 \cdot U_p$, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.13 (γ), κάτι το οποίο μπορεί να γίνει αρκετά επικίνδυνο.



Σχήμα 6.13: (α): κυματομορφή ρεύματος και τάσης της πηγής (β) κυματομορφή τάσης πυκνωτή, (γ) κυματομορφή τάσης στον διακόπτη [9].

Μερικοί διακόπτες δεν είναι σε θέση να ανοίξουν, για την απομόνωση ενός βραχυκυκλώματος ή την απόζευξη ενός φορτίου, στον πρώτο στιγμιαίο μηδενισμό του ρεύματος. Αφού αποτύχουν αρχικά να ανοίξουν, στον επόμενο μηδενισμό του ρεύματος γίνεται η ίδια διαδικασία μέχρις ότου επιτευχθεί επαρκής απόσταση (gap) μεταξύ των επαφών του και οι συνθήκες εξάλειψης του τόξου να είναι καλύτερες. Στις περισσότερες περιπτώσεις, δεν είναι ανησυχητικό να μην ανοίξουν κατευθείαν οι διακόπτες καθώς οι μηχανικές και θερμικές αντοχές του δικτύου είναι παρόμοιες με αυτές που προκαλούνται από τη DC συνιστώσα του ρεύματος βραχυκυκλώσεως τη στιγμή του επόμενου μηδενισμού του ρεύματος. Το ρεύμα τέτοιων συστημάτων είναι συνήθως μικρό και καθιστά τον διακόπτη ικανό να ανοίξει στον πρώτο μηδενισμό του ρεύματος. Εάν συμβεί αυτό, αμέσως μετά τον διαχωρισμό των επαφών, η τάση κατά μήκος του διακόπτη γίνεται διπλάσια από τη μέγιστη τάση του συστήματος ενώ η απόσταση μεταξύ των επαφών είναι ακόμα μικρή, οπότε υπάρχει αυξημένη πιθανότητα επανάφλεξης του διακόπτη. Αν η επανάφλεξη πραγματοποιηθεί ακριβώς τη στιγμή που η τάση του συστήματος είναι στο μέγιστο της, αυτό οδηγεί στην επανάφλεξη του διακόπτη αυτή τη χρονική στιγμή. Το ισοδύναμο κύκλωμα σε αυτή την περίπτωση είναι ένα LC, οπότε αναμένεται να αποκριθεί σε αυτή την ξαφνική διαταραχή εμφανίζοντας μια ταλάντωση στη φυσική συχνότητα του κυκλώματος $\omega_0 = 1 / (L \cdot C)$, όπου L είναι η αυτεπαγωγή της πηγής και C η χωρητικότητα του πυκνωτή. Μία τέτοιου είδους συμπεριφορά αποτελεί μία περίπτωση τυχαίας επανάφλεξης του διακόπτη με παγιδευμένο φορτίο τάσης (trapped charge) σε τιμή ίση με την κορυφή του συστήματος. Το ρεύμα εισροής ισούται με την τάση κατά μήκος του διακόπτη διαιρεμένη με τη σύνθετη αντίσταση της πηγής:

$$I(t) = 2 \cdot U_p \cdot \left(\frac{L}{C} \right)^{1/2} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) \quad (6.34)$$



Σχήμα 6.14: διακόπτης πυκνωτή με πολλαπλές επανεκκινήσεις [9].

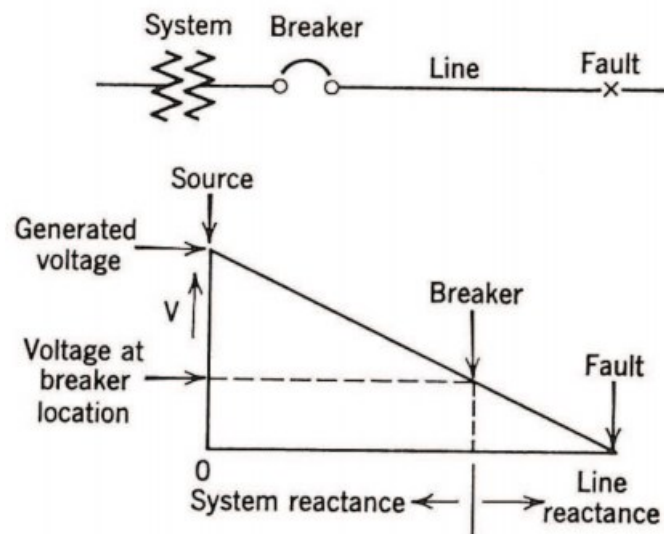
Αγνοώντας την απόσβεση, η τάση θα είναι πολύ υψηλότερη από αυτή της αρχικής. Η μεταβατική τάση του πυκνωτή $+3 \cdot U_p$ είναι μια ασυνήθιστα υψηλή υπέρταση η οποία εμφανίζεται ως συνέπεια της αποθηκευμένης ενέργειας στον πυκνωτή τη στιγμή της επανάφλεξης. Είναι αρκετά πιθανό ο διακόπτης να ανοίξει και να διακόψει το ρεύμα αλλά η υψηλή τάση θα έχει ήδη «παγιδευτεί» στον πυκνωτή. Η πηγή τάσεως συνεχίζει να λειτουργεί φυσιολογικά και στον επόμενο μισό ηλεκτρικό κύκλο της, η τάση κατά μήκος του διακόπτη θα είναι $4 \cdot U_p$. Εάν αυτό οδηγήσει σε δεύτερη κατάρρευση του διακένου του διακόπτη, μια δεύτερη μεταβατική κατάσταση θα εμφανιστεί στην οποία η τάση του διακόπτη θα είναι διπλάσια και αντίστοιχα και το ρεύμα. Η τάση του πυκνωτή θα μεταβληθεί από $+3 \cdot U_p$ σε $-5 \cdot U_p$ (η τάση του πυκνωτή, αγνοώντας την απόσβεση, είναι πάντα διπλάσια της τάσεως του διακόπτη). Είναι πιθανό αυτή η διαδικασία να συνεχιστεί μέχρι να γίνει κάποια εξωτερική παρέμβαση η να καταστραφεί ο πυκνωτής κάτι το οποίο δεν είναι εν γένει δύσκολο να συμβεί. Στο Σχήμα 6.14 το R_s αναπαριστά τις διαδοχικές επανεκκινήσεις και το C_s τις εκκαθαρίσεις. Όλη αυτή η διαδικασία περιγράφηκε για ιδανικές καταστάσεις και είναι

αρκετά υπεραπλουστευμένη. Για παράδειγμα, οι πραγματικές επαναφλέξεις διακοπών δεν γίνονται πάντα τη στιγμή που εμφανίζεται η μέγιστη τάση άρα η ανύψωση της τάσεως είναι πιο αργή. Επίσης, στο κύκλωμα προστίθενται πυκνωτές στην πλευρά της πηγής πριν τον διακόπτη, οι οποίες προκαλούν υψηλότερης συχνότητας ταλαντώσεις.

6.6.5 Σφάλματα σε γραμμές μικρού μήκους

Έχει παρατηρηθεί ότι οι διακόπτες παρουσιάζουν μικρότερη δυσκολία να διακόψουν βραχυκυκλώματα όταν αυτά εμφανίζονται κοντά στις επαφές τους σε αντίθεση με περιπτώσεις που η απόσταση είναι μεγάλη μέσω μιας γραμμής μεταφοράς. Λόγω της πρόσθετης αντίδρασης της γραμμής το ρεύμα είναι μικρότερο και ευκολότερο να διακοπεί. Σε αντίθετη περίπτωση, φαίνεται να υπάρχει κάποια αλληλεπίδραση μεταξύ του διακόπτη και της γραμμής μεταφοράς. Αυτό το φαινόμενο καλείται σφάλμα γραμμής μικρού μήκους και έχει πλέον πλήρως κατανοηθεί και συμπεριληφθεί στα διεθνές πρότυπα.

Η πιο σημαντική διαφορά για βραχυκυκλώματα κοντά και μακριά από τους διακόπτες αφορά στην αντίδραση των γραμμών που περιορίζουν το ρεύμα σε κάποιο βαθμό, αλλά και σαν συνέπεια αυτού στηρίζουν και την τάση του συστήματος. Η εμφανιζόμενη τάση διαιρείται σε κάθε πλευρά του διακόπτη, ανάλογα με την αντίδραση του συστήματος και της γραμμής, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.15. Όσο πιο μακριά είναι το σφάλμα από τον διακόπτη τόσο μεγαλύτερο ποσοστό της τάσης διατηρεί η γραμμή. Επομένως, όταν συμβεί το βραχυκύκλωμα, η γραμμή αποσυνδέεται από το σύστημα και είναι φορτισμένη ακολουθώντας γραμμική κατανομή όπου το μέγιστο εμφανίζεται στον διακόπτη και μηδενίζεται στο σημείο του σφάλματος. Μία απεριόριστη κατανομή φόρτισης στη γραμμή δεν παραμένει στατική αλλά «ταξιδεύει», και στις δύο κατευθύνσεις τις γραμμής. Για να κατανοηθεί καλύτερα το φαινόμενο, πρέπει να αναλυθεί η κυματική θεωρία με βάση τα οδεύοντα κύματα. Αρχικά η τάση και το ρεύμα είναι ανάλογα μεταξύ τους και ο συντελεστής που τα συνδέει είναι η κυματική αντίσταση της γραμμής. Έπειτα, η λύση της κυματικής εξίσωσης έχει δύο λύσεις, οι οποίες αντιστοιχούν σε δύο κύματα που οδεύουν προς τα εμπρός και προς τα πίσω, αντίστοιχα.



Σχήμα 6.15: κατανομή της τάσης σε ένα βραχυκυκλωμένο σύστημα [9].

Όταν ένα κύμα φτάνει σε ασυνέχεια σε μια γραμμή, δηλ. αλλάζει η χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση της γραμμής, πρέπει να γίνει κάποια προσαρμογή, καθώς δεν γίνεται να παραβιαστεί αυτή η αναλογικότητα. Αυτή η προσαρμογή έχει τη μορφή έναρξης δύο νέων κυμάτων. Το ανακλώμενο κύμα τάσης και το αντίστοιχο κύμα ρεύματος «ταξιδεύουν» πίσω στη γραμμή και αθροίζονται με το αρχικό κύμα. Το διαθλώμενο κύμα διεισδύει πέρα από την ασυνέχεια. Τα πλάτη των ανακλώμενων και διαθλώμενων κυμάτων είναι τέτοια ώστε να διατηρείται η αναλογικότητα τους.

Ας θεωρηθεί η σύνδεση δύο γραμμών A, B όπου έχουν χαρακτηριστικές σύνθετες αντιστάσεις $Z_A > Z_B$. Ένα τέτοιο παράδειγμα κάλλιστα θα μπορούσε να αναφέρεται σε μία εναέρια γραμμή και ένα καλώδιο. Η πηγή τάσεως είναι βηματικού τύπου, πλάτους U_1 και εφαρμόζεται στην πλευρά της εναέριας γραμμής. Το κύμα ρεύματος έχει ίδια μορφή και πλάτος $I_1 = U_1 / Z_A$. Το ανακλώμενο και διαθλώμενο κύμα είναι $I_2 = -U_2 / Z_A$ και $I_3 = U_3 / Z_B$, αντίστοιχα. Το ρεύμα I_1 είναι το προσπίπτον κύμα και η φορά του είναι η φορά θετικής κατεύθυνσης. Αφού η τάση και το ρεύμα είναι συνεχή μεγέθη, και στο σημείο της σύνδεσης, τότε συνεπάγεται ότι $I_1 + I_2 = I_3$ και $U_1 + U_2 = U_3$. Όμως, η φορά του ρεύματος $I_1 + I_2 = I_3$ από την φορά της θετικής κατεύθυνσης. Άρα, ισχύει:

$$\frac{U_1}{Z_A} - \frac{U_2}{Z_A} = \frac{U_3}{Z_B} \quad (6.35)$$

Συνεπώς, προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις που περιγράφουν τα ανακλώμενα και το διαθλώμενα κύματα τάσης και ρεύματος:

$$U_2 = \left(\frac{Z_B - Z_A}{Z_A + Z_B} \right) \cdot U_1 \quad (6.36)$$

$$I_2 = \left(\frac{Z_A - Z_B}{Z_A + Z_B} \right) \cdot I_1 \quad (6.37)$$

$$U_3 = \left(\frac{2 \cdot Z_B}{Z_A + Z_B} \right) \cdot U_1 \quad (6.38)$$

$$I_3 = \left(\frac{2 \cdot Z_A}{Z_A + Z_B} \right) \cdot I_1 \quad (6.39)$$

Ο συντελεστής ανάκλασης τάσης προκύπτει από την (6.37):

$$\rho = \frac{Z_B - Z_A}{Z_A + Z_B} \quad (6.40)$$

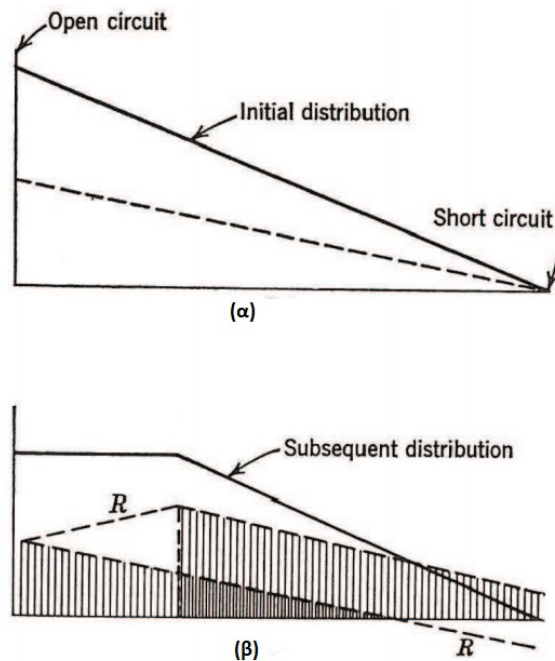
Ένας άλλος τύπος ασυνέχειας γραμμής είναι ο τερματισμός της, σε σύνθετη αντίσταση η οποία δύναται να λαμβάνει τιμές από ανοιχτό κύκλωμα έως βραχυκύκλωμα. Στη συνέχεια μελετώνται αυτές οι δύο ακραίες αυτές περιπτώσεις καθώς είναι σημαντικές σε περιπτώσεις βραχυκυκλωμάτων, τόσο κατά την εμφάνισή τους όσο και μετά την απομόνωσή τους (άνοιγμα διακόπτη).

Το χαρακτηριστικό των βραχυκυκλωμάτων είναι ότι είναι απίθανο να αναπτυχθεί τάση στο σημείο στο οποίο εμφανίζονται. Έτσι, όταν ένα οδεύον κύμα τάσης φτάσει σε βραχυκυκλωμένο σημείο, το ανακλώμενο κύμα πρέπει να ακυρώσει το προσπίπτον, άρα το διαθλώμενο είναι μηδενικό. Αν το προσπίπτον κύμα τάσης είναι U_1 και του ρεύματος I_1 , τότε τα ανακλώμενα κύματα τάσης και ρεύματος είναι $U_2 = -U_1$ και $I_2 = I_1$, αντίστοιχα, όπως προκύπτει από τις (6.36) και (6.37) για $Z_B = 0$.

Για ανοιχτό κύκλωμα στο τέλος της γραμμής, ισχύει ότι το ρεύμα σε αυτό το σημείο είναι πάντα μηδενικό. Έτσι, όταν ένα κύμα ρεύματος I_1 και τάσης U_1 φτάσει σε ένα σημείο ανοιχτοκυκλώματος, τότε το ανακλώμενο κύμα ρεύματος είναι $I_2 = -I_1$, ώστε να ικανοποιηθεί ο παραπάνω περιορισμός, και τάσης $U_2 = U_1$. Έτσι, η τάση στο ανοιχτό σημείο είναι διπλάσια του προσπίπτοντος κύματος τάσης. Αυτές οι τιμές λαμβάνονται και από τις (6.36) και (6.37) για $Z_B = \infty$.

Γυρίζοντας πίσω στην περίπτωση της διακοπής μίας γραμμής μεταφοράς μικρού μήκους, η κατανομή της τάσης (και μαζί με αυτή η κατανομή φόρτισης της γραμμής) πριν διακοπεί το ρεύμα φαίνεται στο Σχήμα 6.15. Με το που ανοίξει ο διακόπτης, η

αρχική κατανομή δεν παραμένει στατική, αλλά τείνει να ισοσταθμιστεί. Σε αυτή την περίπτωση, η φόρτιση είναι κάπως περιορισμένη καθώς το κύμα δεν φτάνει ποτέ στην πηγή καθώς «εμποδίζεται» από τον ανοιχτό διακόπτη. Ούτε μπορεί να διαδίδεται πέρα από το σφάλμα, υποθέτοντας ότι το σφάλμα είναι βραχυκύκλωμα, καθώς στα βραχυκυκλώματα δεν υπάρχει διαθλώμενο κύμα. Όμως αυτή την φορά, τα κύματα αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους, αλλά και με την υπάρχουσα κατανομή φόρτισης.

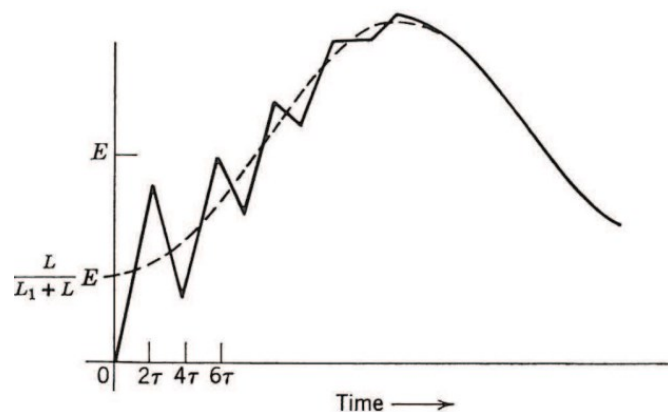


Σχήμα 6.16: κατανομή τάσης σε μία βραχυκυκλωμένη γραμμή μικρού μήκους. (α) αρχικά και (β) αφού τα κύματα έχουν αρχίσει να χωρίζονται [9].

Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αναλυθεί με ακρίβεια μέσω της κυματικής εξίσωσης και λύνοντάς την με την βοήθεια των αρχικών συνθηκών κατανομής τάσης και τους περιορισμούς που επιβάλλονται για το βραχυκυκλωμένο και το ανοιχτοκυκλωμένο σημείο. Υπάρχει, όμως, και πιο εύκολος τρόπος χωρίς να εμπλακούν τόσο δύσκολες μαθηματικές σχέσεις. Το Σχήμα 6.16(α) δείχνει την αρχική κατανομή τάσης της γραμμής. Το κύμα τάσης που οδεύει προς τα αριστερά (αριστερά είναι ο διακόπτης και δεξιά το βραχυκύκλωμα) θα ανακλαστεί με ίσο πλάτος και πρόσημο. Ενώ το κύμα τάσης που οδεύει προς τα δεξιά θα ανακλαστεί με αντίστροφο πλάτος. Η νέα κατανομή τάσης, λίγο χρόνο μετά το άνοιγμα του διακόπτη, φαίνεται στο Σχήμα 6.16(β). Τα δύο ανακλώμενα κύματα (είναι σκιασμένα και χαρακτηρίζονται από R), πλέον θα γίνουν «προσπίπτοντα» και ανακλώνται στα τέρματα της γραμμής. Αυτό το φαινόμενο θα συνεχίσει, λαμβάνοντας υπόψη και τις απώλειες τις γραμμής. Από το Σχήμα 6.16(β) μπορούν να υπολογιστούν οι μεταβολές τάσης σε οποιοδήποτε σημείο της γραμμής

σαν συνάρτηση του χρόνου, της ταχύτητας των κυμάτων και της απόστασης από το σφάλμα.

Η τάση του διακόπτη παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς συμπεριφέρεται με βάση την ανάλυση της TRV αφού διακοπεί το ρεύμα βραχυκυκλώσεως. Η τάση στην επαφή του διακόπτη στην πλευρά της γραμμής ταλαντώνεται από $+V$ σε $-V$ σε διάστημα $2 \cdot T$, όπου V είναι η τάση κορυφής της γραμμής και T ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει το κύμα από τον διακόπτη έως το βραχυκυκλωμένο σημείο. Ο γρήγορος ρυθμός αύξησης της τάσης μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην επιτυχή λειτουργία του διακόπτη. Η τάση TRV στην πλευρά της γραμμής λόγω των οδοντών κυμάτων, υπερτίθεται με τη τάση μεταβατική απόκριση (TRV) στην πλευρά του δικτύου. Έτσι, η τελική τάση TRV κατά μήκος του διακόπτη είναι η διαφορά των τάσεων στις δύο πλευρές του όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.17.



Σχήμα 6.17: τάση TRV κατά μήκος του διακόπτη για βραχυκυκλωμένη γραμμή μικρού μήκους [9].

7 Υπολογισμοί Μεταβατικών Καταστάσεων

7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται παραδείγματα κυκλωμάτων, στα οποία μελετώνται οι μεταβατικές αποκρίσεις κατά την ενεργοποίηση ή τη διακοπή της λειτουργίας τους. Η ανάλυση των φαινομένων αυτών γίνεται μέσω υπολογισμών, καθώς μέσω προσομοιώσεων με το λογισμικό ATP-EMTP.

7.2 Κύκλωμα RL

Στο Σχήμα 6.2 φαίνεται ένα κύκλωμα RL, το οποίο τροφοδοτείται από μία πηγή πλάτους 1pu και φασικής γωνίας ϑ . Ο διακόπτης μπορεί να θεωρηθεί ότι κλείνει οποιαδήποτε στιγμή της περιόδου της τάσης και η στιγμή αυτή να θεωρηθεί ως χρονική στιγμή $t = 0$ της μελέτης. Η πηγή θεωρείται μηδενικής εσωτερικής αντίστασης. Τα δεδομένα των διαφόρων στοιχείων του κυκλώματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-1 [9].

Πίνακας 7-1: Δεδομένα κυκλώματος

Στοιχείο	Δεδομένα
Φορτίο RL	$Z = 1000\Omega, \cos\varphi = 0,9$
Πηγή τάσης V	$V = \sin(\omega \cdot t + \vartheta)$

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζεται οι κυματομορφές ρεύματος και τάσης για διάφορες περιπτώσεις.

7.2.1 Επίλυση με υπολογισμούς

Αρχικά, γίνεται υπολογισμός των μεγεθών των στοιχείων του δικτύου.

Ωμική αντίσταση R και αυτεπαγωγή L:

$$R = Z \cdot \cos\varphi = 900\Omega \quad (7.1)$$

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} = 435,8899\Omega \quad (7.2)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 314,1593 \text{ rad/s} \quad (7.3)$$

$$L = \frac{X}{\omega} = 1,3875 \text{ H} \quad (7.4)$$

$$a = \frac{R}{L} = 648,6577 \quad (7.5)$$

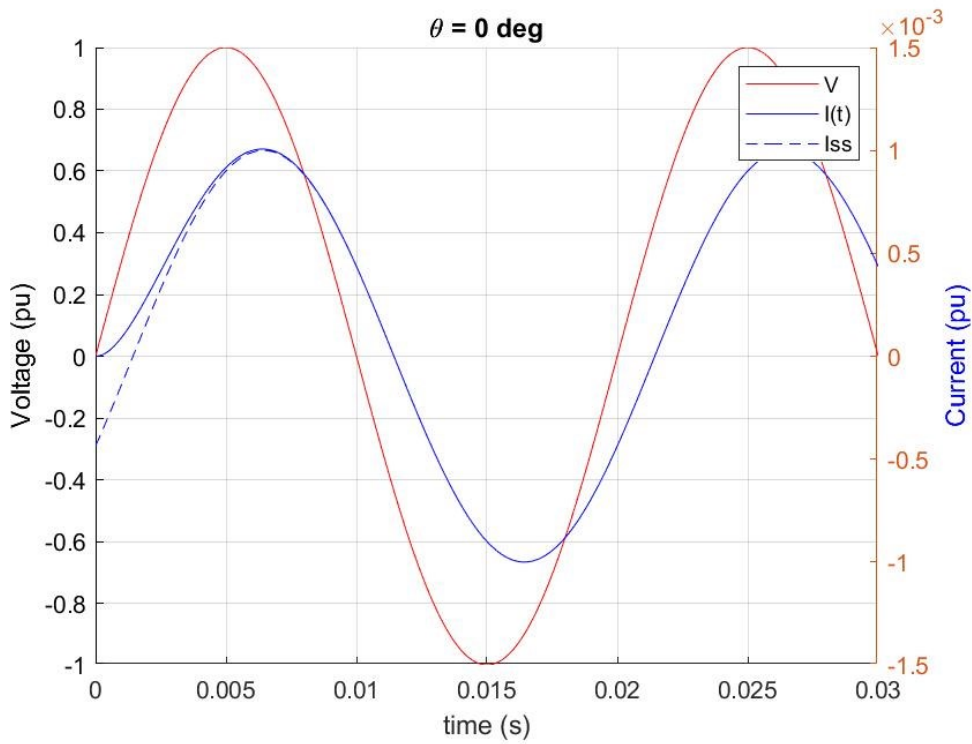
Υπολογισμός του ρεύματος:

Το ρεύμα υπολογίζεται από την (7.6), όπου το πλάτος του είναι $V_0 / |Z|$. Ο πρώτος όρος εκφράζει τη μόνιμη κατάσταση και ο δεύτερος περιγράφει τη μεταβατική κατάσταση:

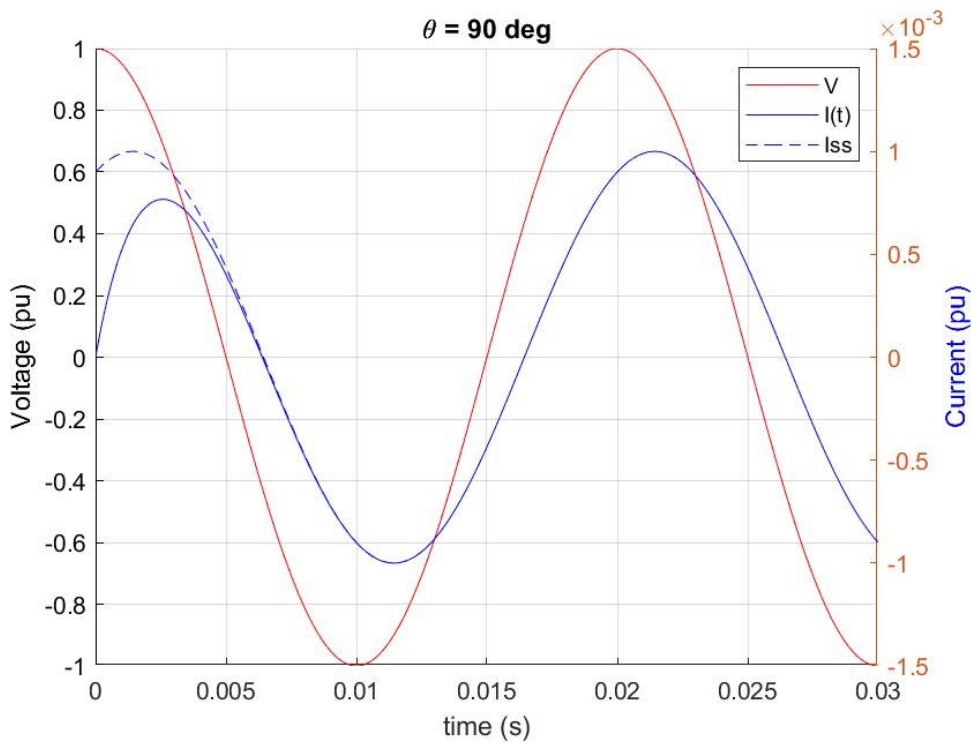
$$I(t) = \frac{V_0}{(R^2 + (\omega \cdot L)^2)^{1/2}} \cdot [\sin(\omega \cdot t + \vartheta - \varphi) - \sin(\vartheta - \varphi) \cdot e^{-a \cdot t}] \Leftrightarrow \quad (7.6)$$

$$\Leftrightarrow I(t) = 10^{-3} \cdot [\sin(\omega \cdot t + \vartheta - 25,8419) - \sin(\vartheta - 25,8419) \cdot e^{-648,6577 \cdot t}]$$

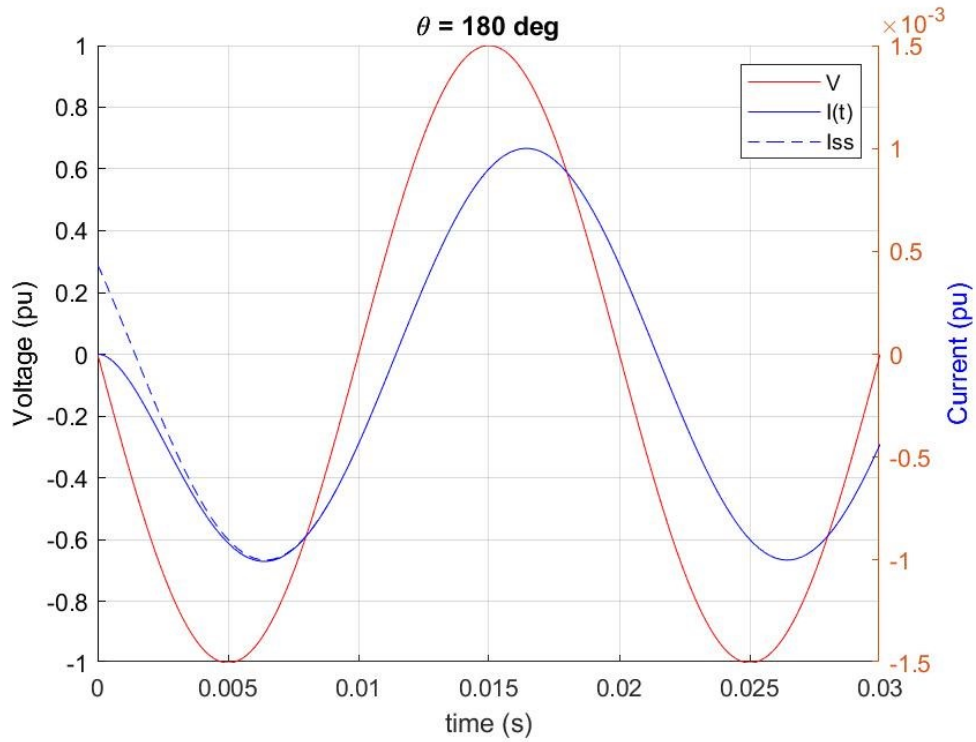
Η επίλυση της (7.6) υλοποιείται μέσω του λογισμικού MATLAB θεωρώντας διαφορετικούς χρόνους στους οποίους κλείνει ο διακόπτης. Οι χρόνοι αυτοί είναι: οι δύο μηδενισμοί τάσης της πηγής ($\vartheta = 0^\circ, 180^\circ$), το μέγιστο ($\vartheta = 90^\circ$) και το ελάχιστο ($\vartheta = 270^\circ$). Οι αντίστοιχες κυματομορφές τάσης και ρεύματος παρουσιάζονται στα Σχήματα 7.1, 7.2, 7.3 και 7.4.



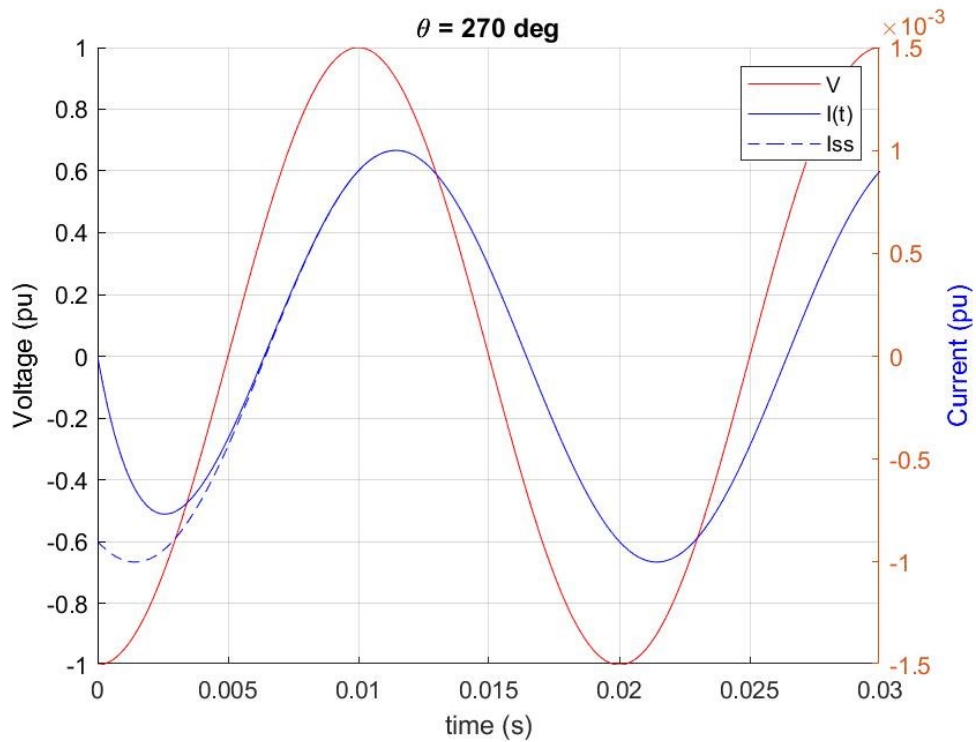
Σχήμα 7.1: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για $\theta=0^\circ$.



Σχήμα 7.2: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για $\theta=90^\circ$.



Σχήμα 7.3: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για $\theta=180^\circ$.



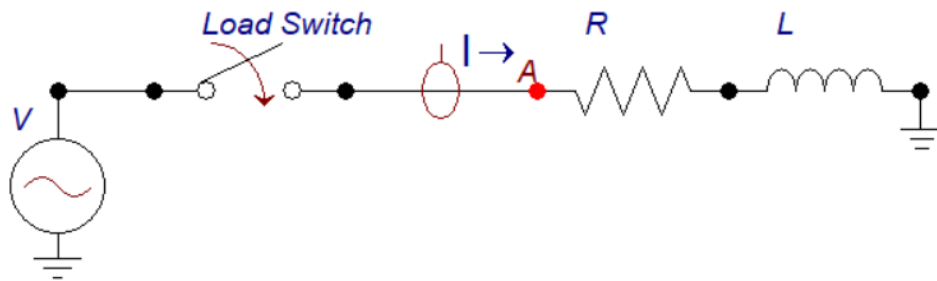
Σχήμα 7.4: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για $\theta=270^\circ$.

7.2.2 Προσομοιώσεις με το λογισμικό ATP-EMTP

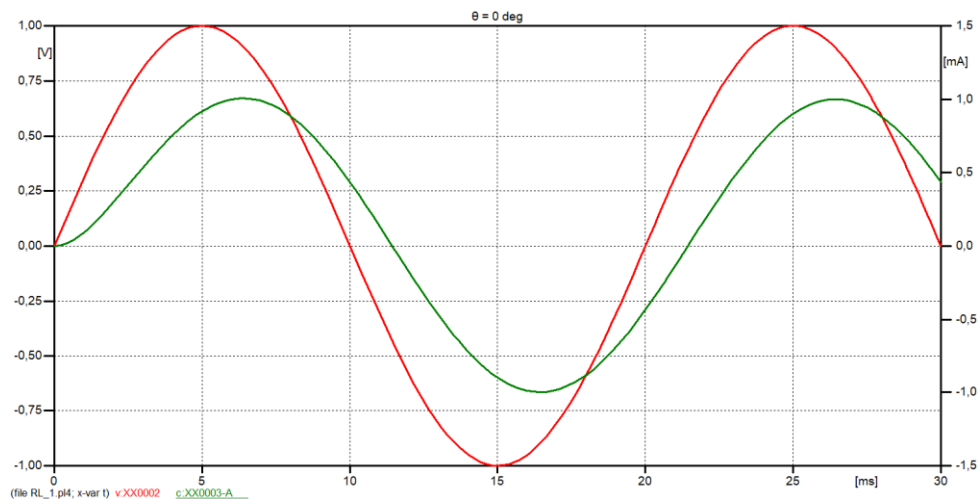
Επίσης, με τη βοήθεια του λογισμικού ATP-EMTP, υλοποιήθηκε το κύκλωμα του Σχήματος 6.2, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.5. Για μία πηγή AC τάσης στο λογισμικό ATP-EMTP ισχύει ότι:

$$V = V_p \cdot \cos(\omega \cdot t + \vartheta) \quad (7.7)$$

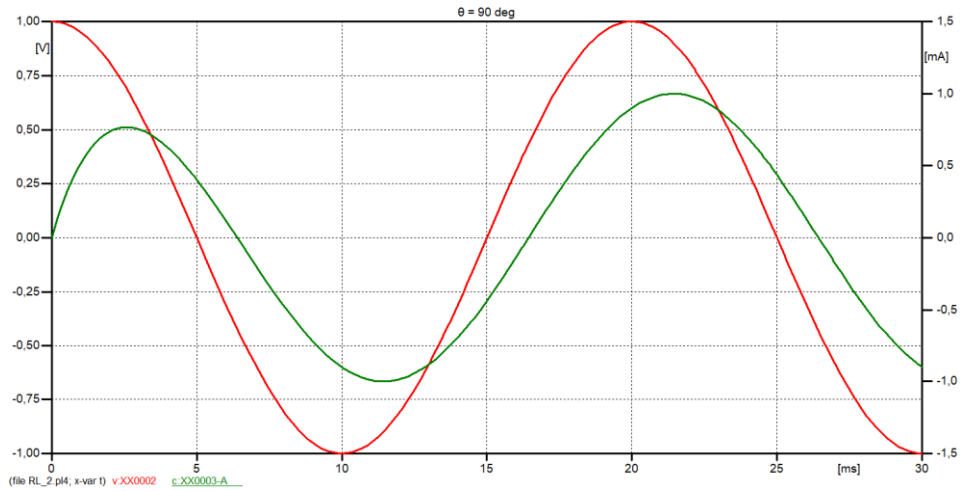
Οπότε, για να εκφραστεί η (7.7) ως προς το $\sin()$ αρκεί να τεθεί $\vartheta \rightarrow \vartheta - 90^\circ$. Άρα η πηγή γίνεται $V = V_p \cdot \cos(\omega \cdot t + \vartheta - 90^\circ) = V_p \cdot \sin(\omega \cdot t + \vartheta)$. Οι κυματομορφές για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις όπως και πριν παρουσιάζονται στα Σχήματα 7.6 – 7.9.



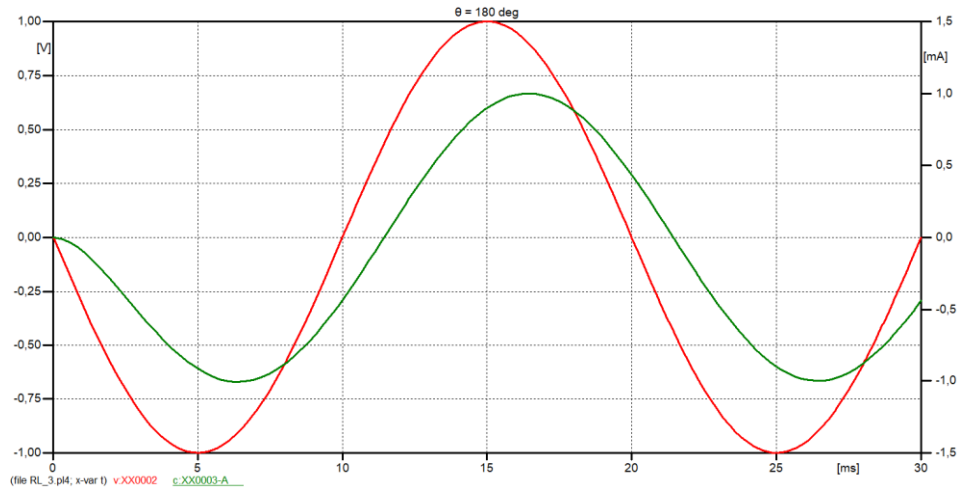
Σχήμα 7.5: κύκλωμα RL στο λογισμικό ATP-EMTP.



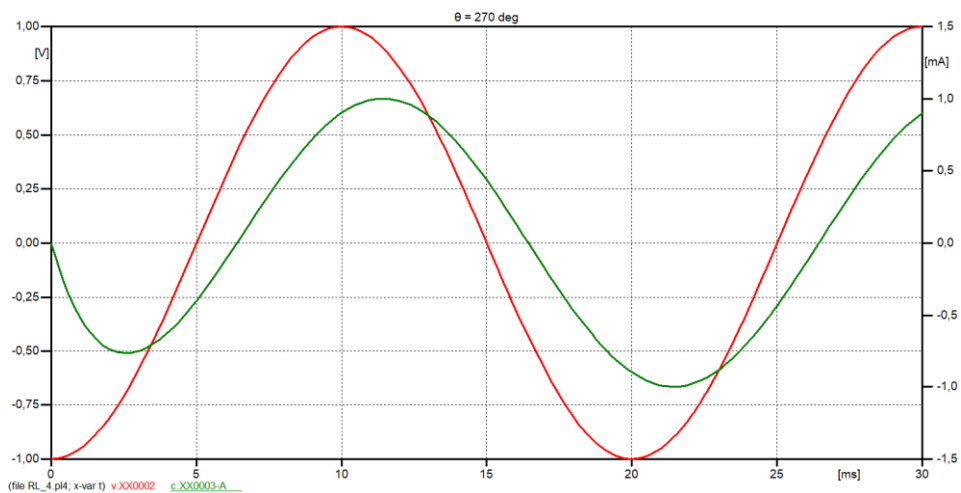
Σχήμα 7.6: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για $\vartheta=0^\circ$.



Σχήμα 7.7: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης σε σχέση με τον χρόνο για $\theta=90^\circ$.



Σχήμα 7.8: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για $\theta=180^\circ$.



Σχήμα 7.9: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για $\theta=270^\circ$.

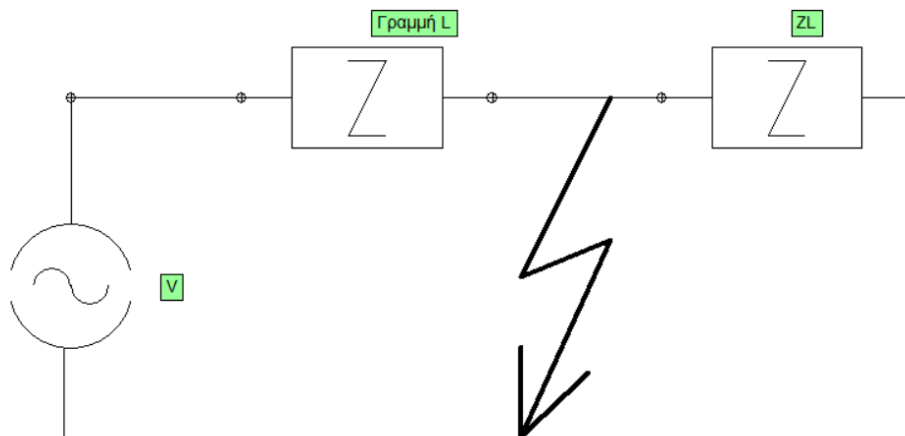
Οι κυματομορφές των Σχημάτων 7.6 έως 7.9 ταυτίζονται με τις κυματομορφές των Σχημάτων 7.1 έως 7.4 για τις αντίστοιχες γωνίες ϑ .

7.3 Ρεύμα βραχυκυκλώσεως

Ένα φορτίο Z_L , όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.10, τροφοδοτείται, μέσω μιας γραμμής L , από μία πηγή πλάτους $1pu$ και φασικής γωνίας ϑ . Στο κύκλωμα επιτρέπεται στον διακόπτη να κλείσει οποιαδήποτε στιγμή της περιόδου της τάσης (θεωρώντας έτσι αντίστοιχα τη χρονική στιγμή $t=0$). Με τον τρόπο αυτό προσομοιώνεται μια περίπτωση σφάλματος. Σημειώνεται ότι η πηγή θεωρείται μηδενικής εσωτερικής αντίστασης. Τα δεδομένα των διαφόρων στοιχείων του κυκλώματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-2 [9].

Πίνακας 7-2: Δεδομένα κυκλώματος

Στοιχείο	Δεδομένα
Φορτίο Z_L	$Z = 1000\Omega$, $\cos\varphi = 0,95$
Γραμμή L	$l = 10\text{km}$, $R_l' = 0,215\Omega/\text{km}$, $L' = 1,06\text{mH}/\text{km}$
Πηγή τάσης V	$V = \sin(\omega \cdot t + \vartheta)$



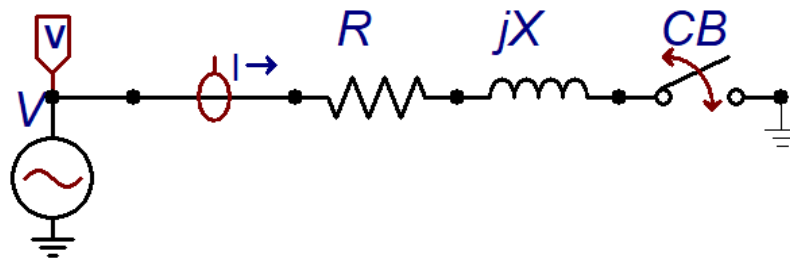
Σχήμα 7.10: Κύκλωμα με φορτίο Z_L τροφοδοτούμενο από πηγή τάσης V μέσω γραμμής L .

Με τη βοήθεια του λογισμικού ATP-EMTP, υλοποιήθηκε το κύκλωμα του Σχήματος 7.10, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.11. Για την AC πηγή τάσης στο λογισμικό ATP-EMTP ισχύει ότι και στο Κεφάλαιο 7.2.2, δηλαδή:

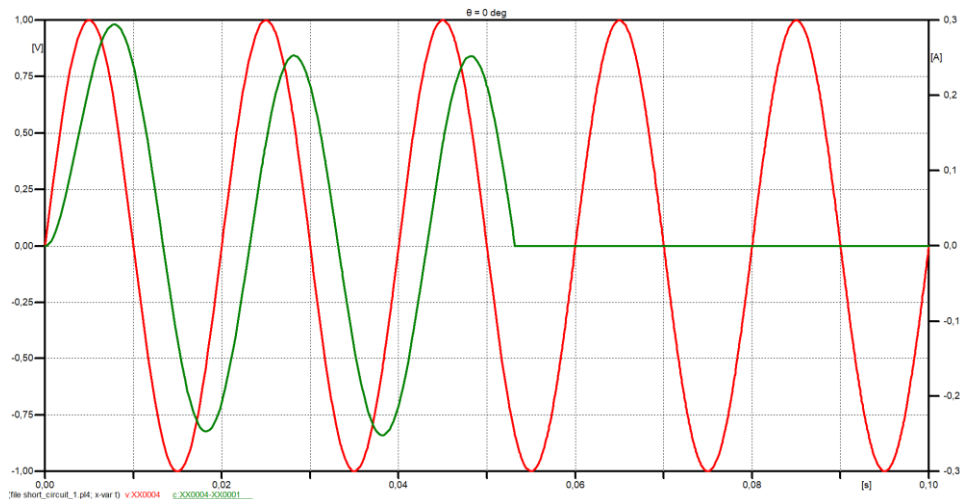
$$V = V_p \cdot \cos(\omega \cdot t + \vartheta - 90^\circ) = V_p \cdot \sin(\omega \cdot t + \vartheta) \quad (7.8)$$

Η ανάλυση πραγματοποιείται για τέσσερις διαφορετικούς χρόνους κλεισίματος του διακόπτη. Οι χρόνοι αυτοί είναι: οι δύο μηδενισμοί τάσης της πηγής ($\vartheta = 0^\circ, 180^\circ$), το μέγιστο ($\vartheta = 90^\circ$) και το ελάχιστο ($\vartheta = 270^\circ$).

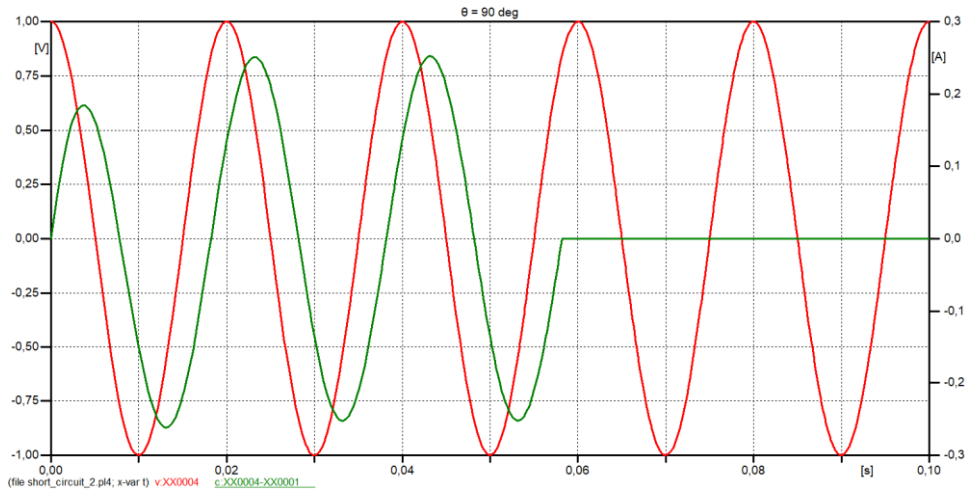
Για να προσομοιωθεί ένα βραχυκύκλωμα όπως αυτό του Σχήματος 7.10 στο λογισμικό ATP-EMTP απαλείφονται τα στοιχεία που δεν επηρεάζουν το ρεύμα βραχυκυκλώσεως όπως το φορτίο Z_L και εισάγεται ένας διακόπτης ο οποίος κλείνει τη στιγμή που θεωρείται το βραχυκύκλωμα (στο συγκεκριμένο παράδειγμα τη στιγμή $t=0s$) και ανοίγει όταν περάσουν 2-3 περίοδοι ώστε να διακοπεί το ρεύμα. Οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος παρουσιάζονται στα Σχήματα 7.12, 7.13, 7.14 και 7.15, αντίστοιχα.



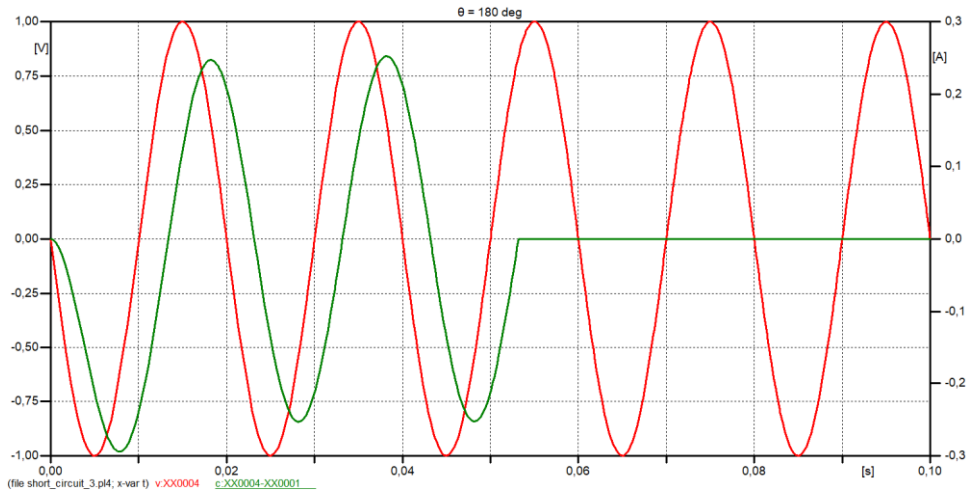
Σχήμα 7.11: Κύκλωμα RL στο λογισμικό ATP-EMTP.



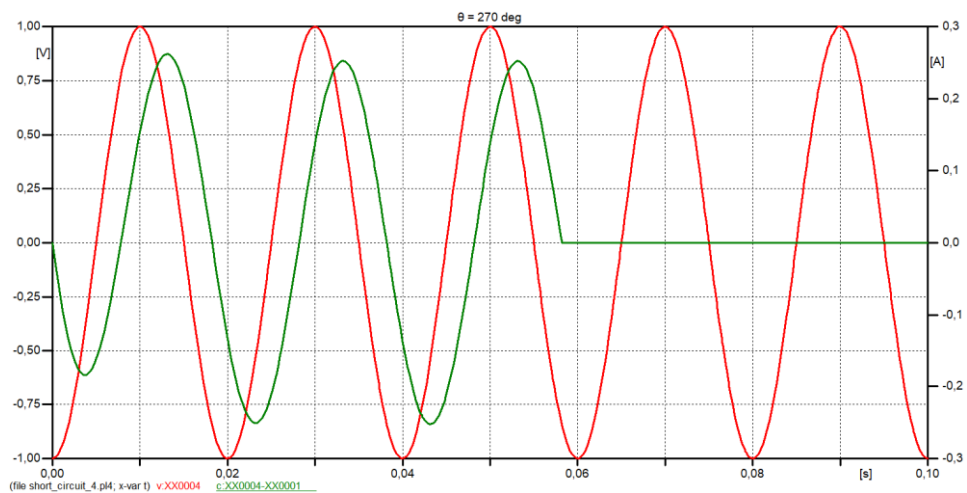
Σχήμα 7.12: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για $\vartheta=0^\circ$.



Σχήμα 7.13: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για $\theta=90^\circ$.



Σχήμα 7.14: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για $\theta=180^\circ$.



Σχήμα 7.15: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης για $\theta=270^\circ$.

7.4 Κύκλωμα RLC

Ένα κύκλωμα RLC, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.3, τροφοδοτείται από μία πηγή πλάτους 1ru. Ο διακόπτης κλείνει όταν η τάση της πηγής αποκτήσει στιγμιαία την μέγιστη της τιμή (θεωρείται ως χρονική στιγμή $t = 0$). Η πηγή θεωρείται μηδενικής εσωτερικής αντίστασης. Τα δεδομένα των διαφόρων στοιχείων του κυκλώματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-3 [9]. Σημειώνεται ότι θεωρούνται τρεις καταστάσεις, δηλ. υποαπόσβεση, κρίσιμη απόσβεση και υπεραπόσβεση.

Πίνακας 7-3: Δεδομένα κυκλώματος

Στοιχείο	Δεδομένα
Αντίσταση R	$R = 150\Omega$ (υποαπόσβεση), $632,455\Omega$ (κρίσιμη απόσβεση), 1000Ω (υπεραπόσβεση)
Χωρητικότητα C	$C = 2,5\mu\text{F}$
Αυτεπαγωγή L	$L = 250\text{mH}$
Πηγή τάσης V	$V = 1$

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζεται οι κυματομορφές ρεύματος και τάσης για διάφορες περιπτώσεις.

7.4.1 Επίλυση με υπολογισμούς

Αρχικά, γίνεται υπολογισμός των μεγεθών των στοιχείων του δικτύου για κάθε αντίσταση ξεχωριστά.

$R=150\Omega$ (υποαπόσβεση):

$$\alpha = \frac{R}{2 \cdot L} = 300 \quad (7.9)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} = 1264,91\text{rad/s} \quad (7.10)$$

$$\nu = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} = 1228,82\text{rad/s} \quad (7.11)$$

Με βάση τα παραπάνω, οι πόλοι της (7.12) σύμφωνα με την (7.13) είναι:

$$s_{1,2} = -\alpha \pm j\nu = 300 \pm j1228,82 \quad (7.12)$$

$R=632,455\Omega$ (κρίσιμη απόσβεση):

$$\alpha = \frac{R}{2 \cdot L} = 1264,91 \quad (7.13)$$

Η φυσική συχνότητα του συστήματος απουσία απόσβεσης ω_0 παραμένει ίδια.

$$\nu = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} = 0 \quad (7.14)$$

Αντίστοιχα, με βάση τα παραπάνω οι πόλοι της (7.12) σύμφωνα με την (7.13) είναι:

$$s_{1,2} = -\alpha \pm j\nu = -1264,91 \quad (7.15)$$

$R=1200\Omega$ (υπεραπόσβεση):

$$\alpha = \frac{R}{2 \cdot L} = 2400 \quad (7.16)$$

Η φυσική συχνότητα του συστήματος απουσία απόσβεσης ω_0 παραμένει ίδια.

$$\nu = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} = j2039,61 \text{rad/s} \quad (7.17)$$

Επίσης, οι πόλοι της (7.12) σύμφωνα με την (7.13) είναι:

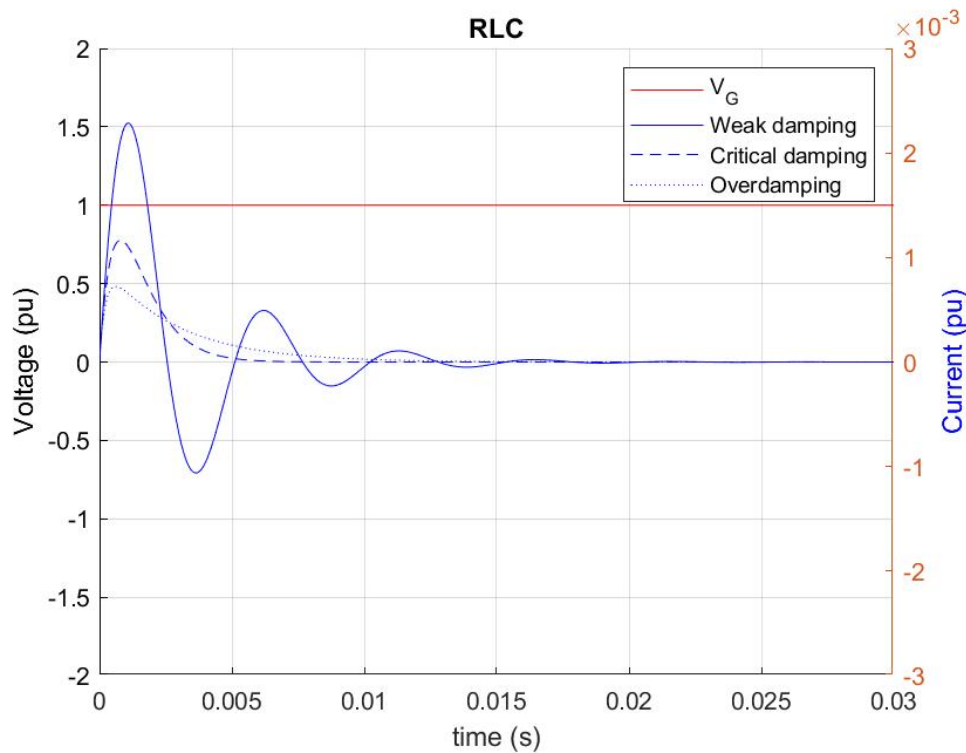
$$s_{1,2} = -\alpha \pm j\nu = -4439,61 \text{ και } -360,39 \quad (7.18)$$

Υπολογισμός του ρεύματος:

Το ρεύμα, και για τις τρεις περιπτώσεις απόσβεσης, υπολογίζεται από την (7.15), δηλαδή:

$$I(t) = \frac{U_G}{L} \cdot \frac{1}{s_1 - s_2} \cdot (e^{s_1 t} - e^{s_2 t}) = \frac{(e^{s_1 t} - e^{s_2 t})}{L \cdot (s_1 - s_2)} \quad (7.19)$$

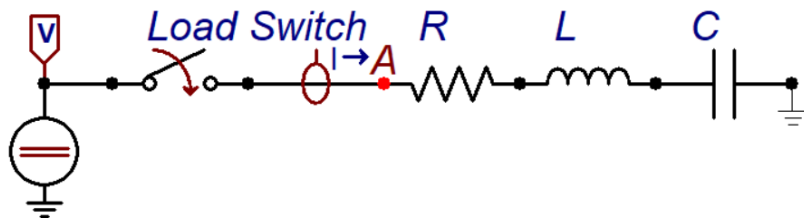
Όπου $U_G = 1\text{pu}$ είναι η τιμή της τάσης τη στιγμή που κλείνει ο διακόπτης και μένει σταθερή. Η επίλυση της (7.19) υλοποιείται μέσω του λογισμικού MATLAB. Η τιμή της πηγής τάσης και η κυματομορφή του ρεύματος σε σχέση με τον χρόνο για τις διάφορες περιπτώσεις φαίνονται στο Σχήμα 7.16.



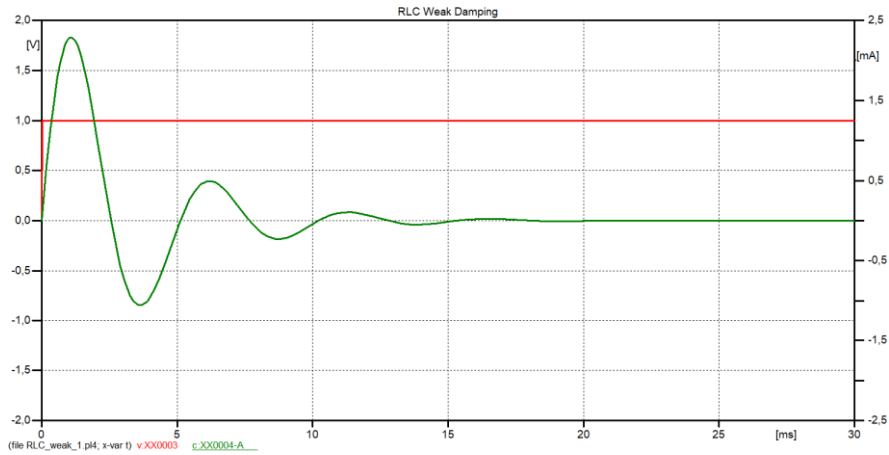
Σχήμα 7.16: Κυματομορφές πηγής τάσης και ρεύματος κυκλώματος.

7.4.2 Προσομοιώσεις με το λογισμικό ATP-EMTP

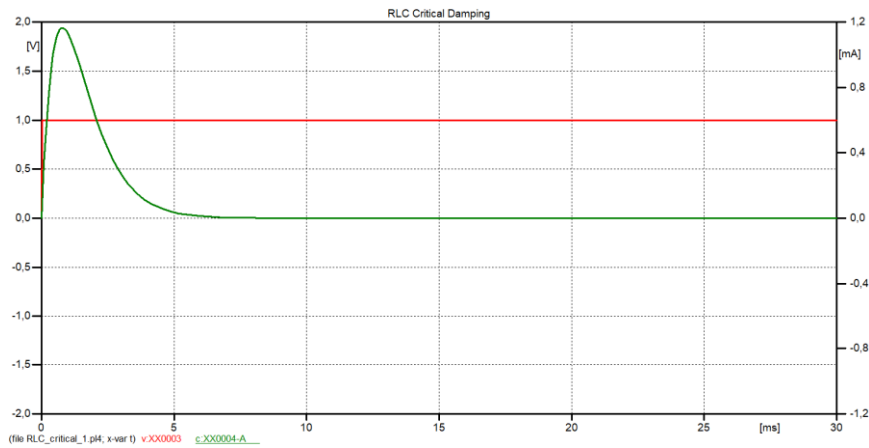
Επίσης, με τη βοήθεια του λογισμικού ATP-EMTP, υλοποιήθηκε το κύκλωμα του Σχήματος 6.3, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.17. Για την AC πηγή τάσης του Σχήματος 6.3 την στιγμή $t=0$ ισχύει ότι $V_G = 1$ pu. Συνεπώς, η AC πηγή τάσης δύναται να αντικατασταθεί με μία αντίστοιχη DC, πλάτους 1 pu. Οι κυματομορφές του ρεύματος και η τιμή της πηγής τάσης παρουσιάζονται στα Σχήματα 7.18, 7.19 και 7.20, αντίστοιχα.



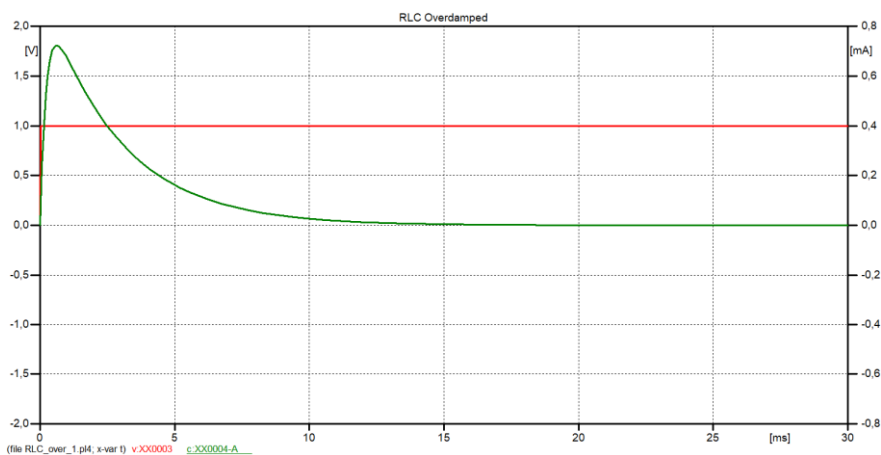
Σχήμα 7.17: Κύκλωμα RLC στο λογισμικό ATP-EMTP.



Σχήμα 7.18: Κυματομορφές πηγής τάσης και ρεύματος κυκλώματος για $R=150 \Omega$ (υποαπόσβεση).



Σχήμα 7.19 Κυματομορφές πηγής τάσης και ρεύματος κυκλώματος για $R=632,455 \Omega$ (κρίσιμη απόσβεση).



Σχήμα 7.20: Κυματομορφές πηγής τάσης και ρεύματος κυκλώματος για $R=1200 \Omega$ (υπεραπόσβεση).

Οι κυματομορφές των ρευμάτων των Σχημάτων 7.18, 7.19 και 7.20 ταυτίζονται με τις κυματομορφές του Σχήματος 7.16 για τις αντίστοιχες αντιστάσεις R .

7.5 Κύκλωμα LC (συστοιχίες πυκνωτών)

Ένα κύκλωμα LC, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.4, τροφοδοτείται από μία πηγή πλάτους 1pu. Ο διακόπτης κλείνει όταν η τάση της πηγής αποκτήσει στιγμιαία τη μέγιστη της τιμή (θεωρείται ως χρονική στιγμή $t = 0$). Η πηγή θεωρείται μηδενικής εσωτερικής αντίστασης. Τα δεδομένα των διαφόρων στοιχείων του κυκλώματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-4 [9].

Πίνακας 7-4: Δεδομένα κυκλώματος

Στοιχείο	Δεδομένα
Χωρητικότητα C	$C = 27,14\mu\text{F}$
Αυτεπαγωγή L	$L = 9,9\text{mH}$
Πηγή τάσης V	$V_s = \cos(\omega \cdot t + \vartheta)$

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζεται οι κυματομορφές ρεύματος και τάσης για διάφορες περιπτώσεις.

7.5.1 Επίλυση με υπολογισμούς

Αρχικά, υπολογίζονται τα μεγέθη των στοιχείων του δικτύου.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} = 1929,2 \text{ rad/s} \quad (7.20)$$

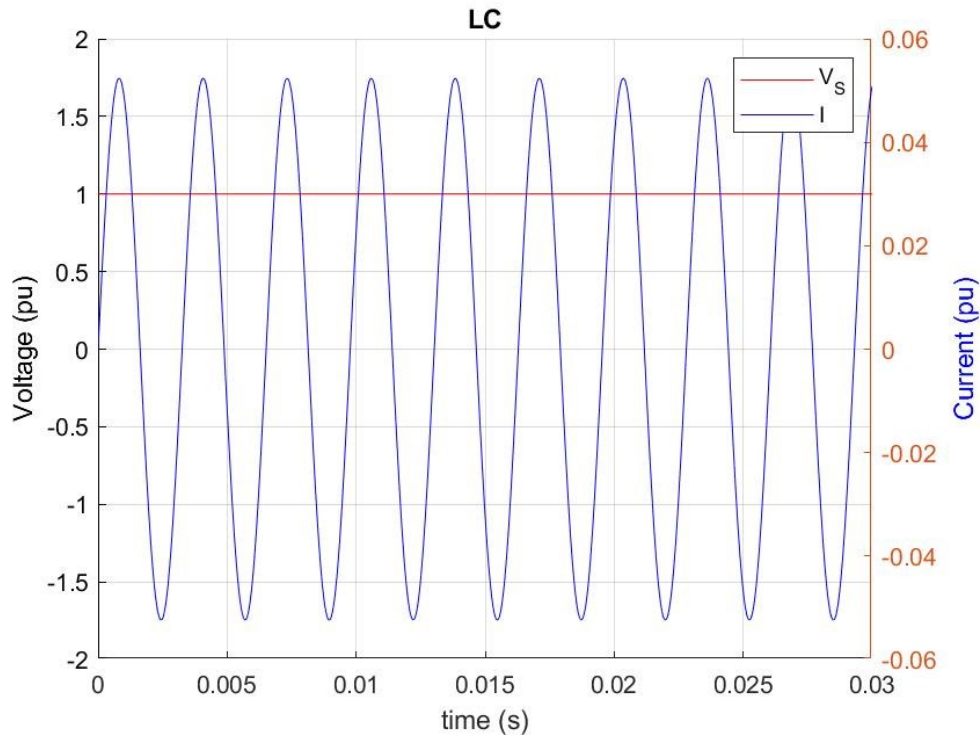
$$Z_0 = \sqrt{L/C} = 19,0991 \Omega \quad (7.21)$$

Υπολογισμός του ρεύματος:

Το ρεύμα υπολογίζεται από την (6.20), θεωρώντας πλάτος $V_s(0) / Z_0$. $V_s(0) = 1\text{pu}$ είναι η τιμή της τάσης την στιγμή που κλείνει ο διακόπτης και παραμένει σταθερή.

$$I(t) = \frac{V_s(0)}{Z_0} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) = \frac{V_s(0)}{19,0991} \cdot \sin(1929,2 \cdot t) \quad (7.22)$$

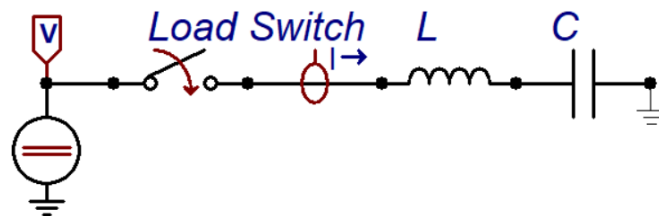
Η επίλυση της (7.22) υλοποιείται μέσω του λογισμικού MATLAB. Η τιμή της πηγής τάσης και η κυματομορφή του ρεύματος σε σχέση με τον χρόνο φαίνονται στο Σχήμα 7.21.



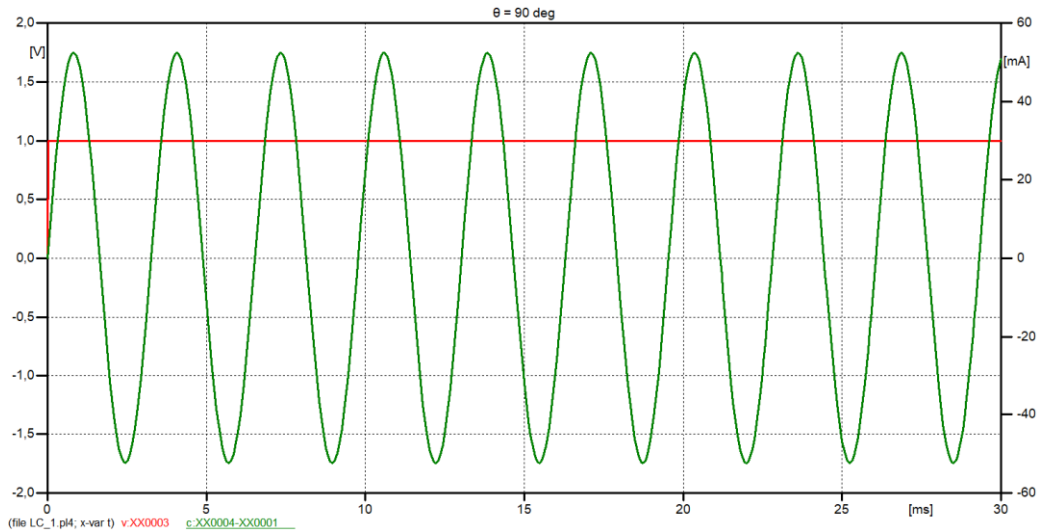
Σχήμα 7.21: Κυματομορφές πηγής τάσης και ρεύματος κυκλώματος.

7.5.2 Προσομοιώσεις με το λογισμικό ATP-EMTP

Επίσης, με τη βοήθεια του λογισμικού ATP-EMTP, υλοποιήθηκε το κύκλωμα του Σχήματος 6.4, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.22. Για την AC πηγή τάσης του Σχήματος 6.4 την στιγμή $t=0$ ισχύει ότι $V_s(0)=1\text{pu}$. Συνεπώς, η AC πηγή τάσης δύναται να αντικατασταθεί με μία αντίστοιχη DC, πλάτους 1pu. Οι κυματομορφές του ρεύματος και της πηγής τάσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.23.



Σχήμα 7.22: Κύκλωμα LC στο λογισμικό ATP-EMTP.



Σχήμα 7.23: Κυματομορφές πηγής τάσης και ρεύματος κυκλώματος.

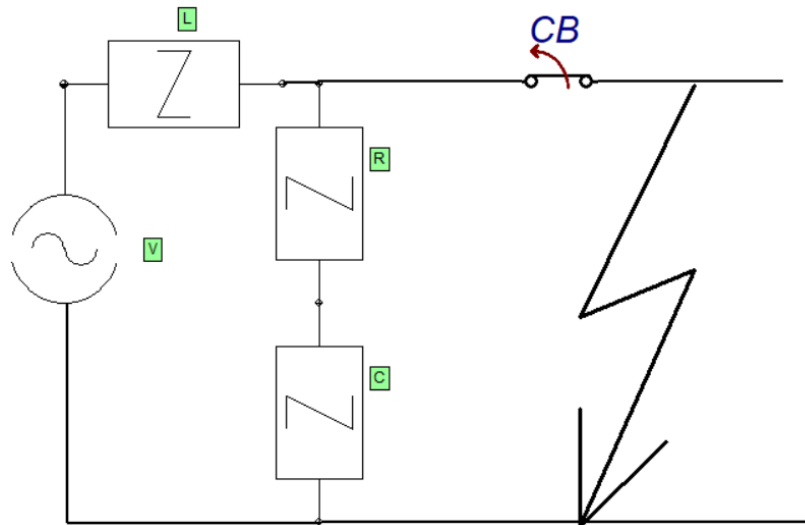
Η κυματομορφή του ρεύματος του Σχήματος 7.23 ταυτίζεται με την αντίστοιχη του Σχήματος 7.21.

7.6 Διακοπή ρεύματος βραχυκυκλώματος

Σε ένα κύκλωμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.24, το οποίο τροφοδοτείται από μία πηγή πλάτους 1ru , μέσω μίας γραμμής L , συμβαίνει βραχυκύκλωμα. Τη στιγμή $t = 0$ ανοίγει ο διακόπτης ώστε να απαλειφθεί το ρεύμα βραχυκυκλώσεως. Τα δεδομένα των διαφόρων στοιχείων του κυκλώματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-5 [9].

Πίνακας 7-5: Δεδομένα κυκλώματος

Στοιχείο	Δεδομένα
Χωρητικότητα C	$C = 0,1 \mu\text{F}$
Αυτεπαγωγή L	$L = 200 \text{ mH}$
Αντίσταση R	$R = 100\Omega$
Πηγή τάσης V_s	$V_s = \sin(\omega \cdot t)$



Σχήμα 7.24: Αναπαράσταση διακοπής μονοφασικού βραχυκυκλώματος.

Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζεται το διάγραμμα τάσης-χρόνου.

7.6.1 Επίλυση με υπολογισμούς

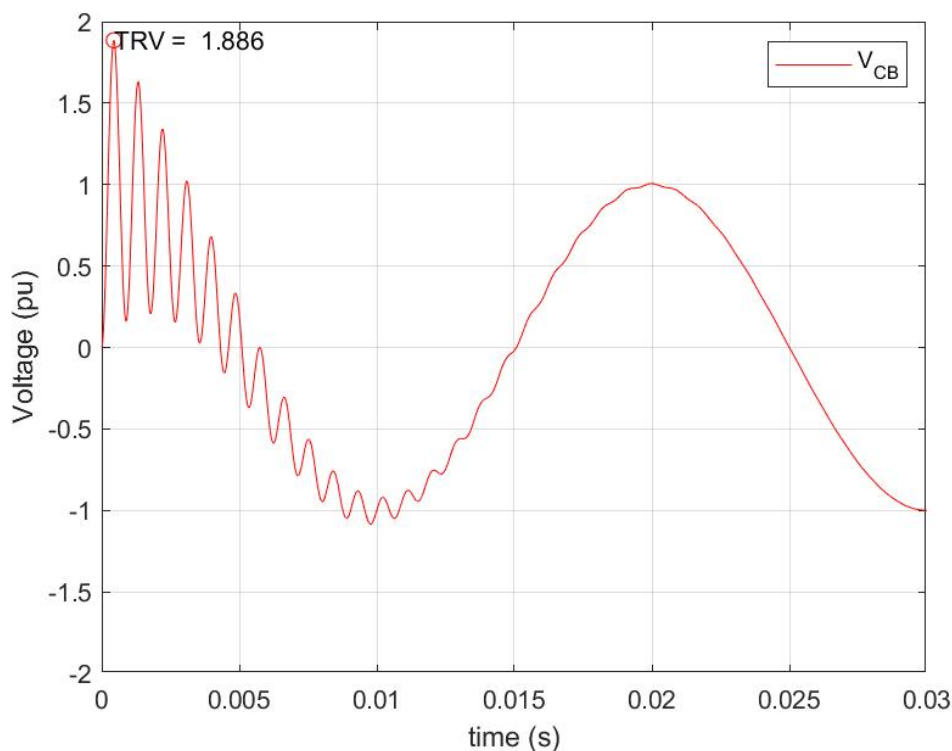
Υπολογισμός του ρεύματος:

Η τάση υπολογίζεται από την (7.23). Ο πρώτος όρος εκφράζει τη μόνιμη κατάσταση και ο δεύτερος περιγράφει τη μεταβατική κατάσταση:

$$U_{CB}(t) = U_0 \cdot \left(\cos(\omega \cdot t) - e^{-\frac{R}{2L}t} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \right) \Leftrightarrow \quad (7.23)$$

$$\Leftrightarrow U_{CB}(t) = \cos(314,2 \cdot t) - e^{-250 \cdot t} \cdot \cos(7071,1 \cdot t)$$

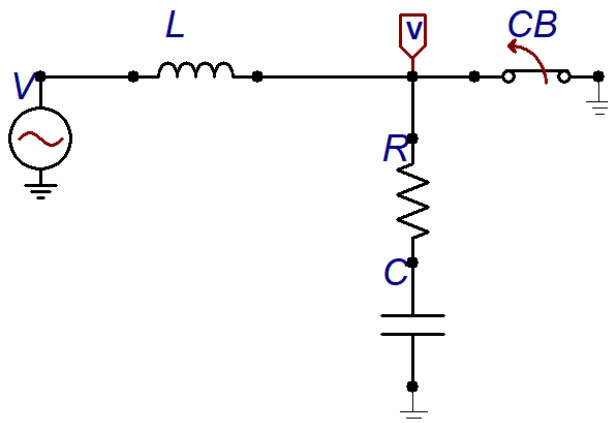
Η επίλυση της (7.23) υλοποιείται μέσω του λογισμικού MATLAB. Η κυματομορφή του ρεύματος σε σχέση με τον χρόνο παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.25, όπου φαίνεται ότι η τάση transient recovery voltage (TRV) φτάνει έως και το 188,59% της τάσης της πηγής.



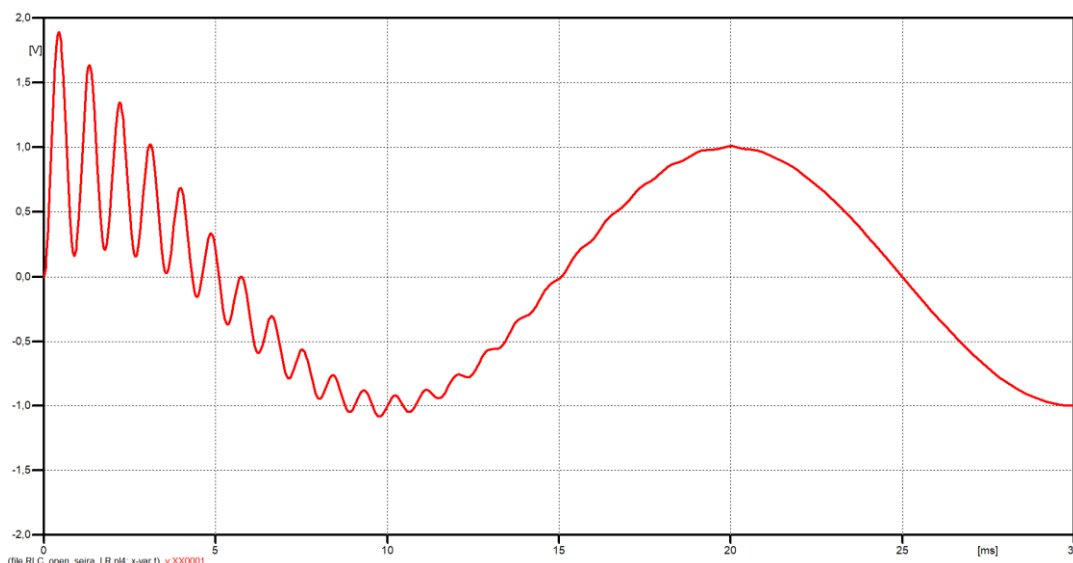
Σχήμα 7.25: Κυματομορφή τάσης κατά μήκος του διακόπτη.

7.6.2 Προσομοιώσεις με το λογισμικό ATP-EMTP

Επίσης, με τη βοήθεια του λογισμικού ATP-EMTP, υλοποιήθηκε το κύκλωμα του Σχήματος 7.24, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.26. Το βραχυκύκλωμα προσομοιώνεται θεωρώντας τον διακόπτη αρχικά κλειστό, ενώ στη συνέχεια ανοίγει τη στιγμή $t=0$ ώστε να απαλειφθεί το ρεύμα βραχυκυκλώσεως. Στην πηγή χρησιμοποιήθηκε φασική γωνία $\theta=360^\circ$ ώστε να ανοίξει ο διακόπτης την στιγμή $t=0$. Οι κυματομορφές των Σχημάτων 7.26 και 7.27, όπως ήταν αναμενόμενο ταυτίζονται.



Σχήμα 7.26: Κύκλωμα διακοπής μονοφασικού βραχυκυκλώματος στο λογισμικό ATP-EMTP.



Σχήμα 7.27: Κυματομορφή τάσης κατά μήκος του διακόπτη.

7.7 Διακοπή ρεύματος τριπολικού βραχυκυκλώματος με σύνδεση γης

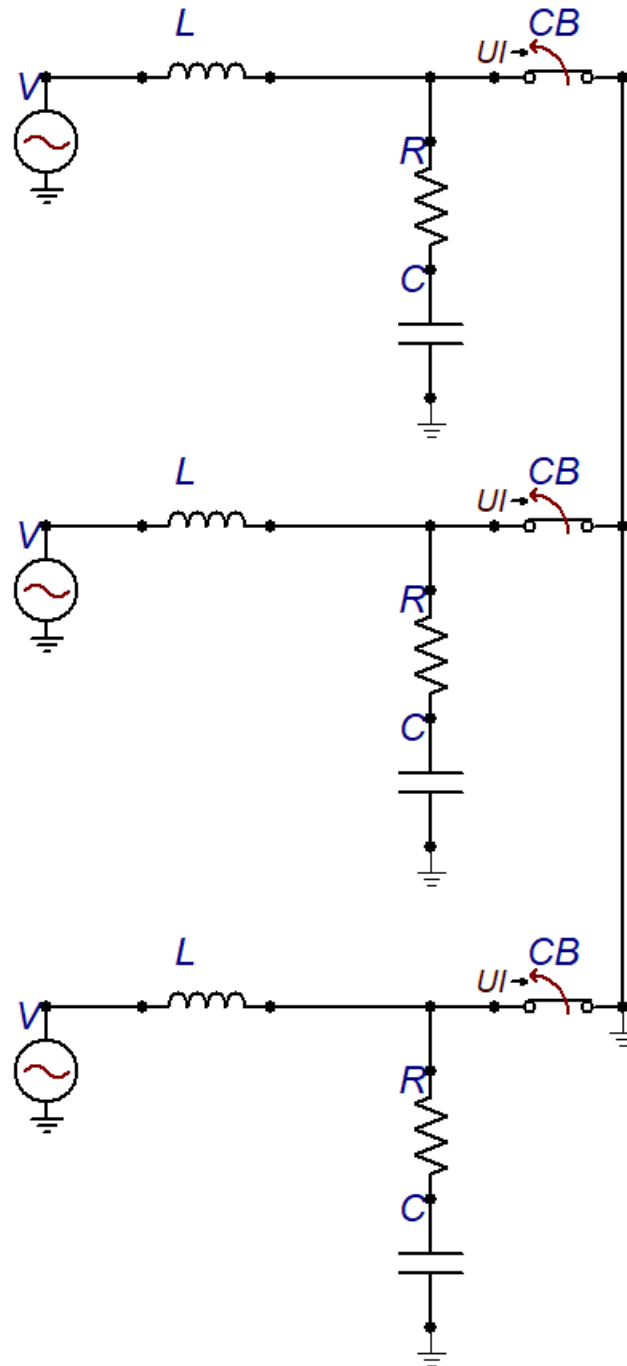
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.28 μελετάται στο ATP-EMTP ένα τριπολικό βραχυκύκλωμα με επαφή γης. Το εξεταζόμενο κύκλωμα σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση είναι ένα τριφασικό συμμετρικό σύστημα με γειωμένο ουδέτερο, το οποίο τροφοδοτείται από τρεις πηγές φασικού πλάτους 1pu, μέσω τριών όμοιων γραμμών L . Τα δεδομένα των στοιχείων του κυκλώματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-6 [9].

Πίνακας 7-6: Δεδομένα κυκλώματος

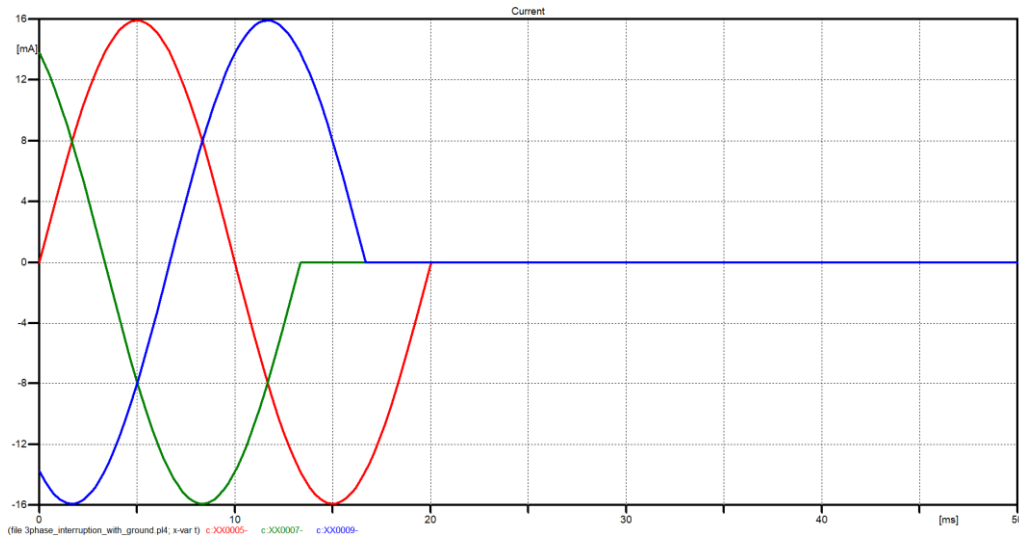
Στοιχείο	Δεδομένα
Χωρητικότητα C	$C = 0,1\mu\text{F}$
Αυτεπαγωγή L	$L = 200\text{mH}$
Αντίσταση R	$R = 100\Omega$
Πηγή τάσης V_s	$V_s = \sqrt{3}\text{pu}$ (πολική τάση)

Το βραχυκύκλωμα προσομοιώνεται θεωρώντας τους διακόπτες αρχικά κλειστούς, ενώ στη συνέχεια ανοίγει ο πρώτος διακόπτης τη στιγμή $t = 13,33\text{ms}$ και έπειτα οι άλλοι δύο όταν μηδενιστεί στιγμιαία το ρεύμα γραμμής που διέρχεται από αυτούς, ώστε να απαλειφθεί το ρεύμα βραχυκυκλώσεως.

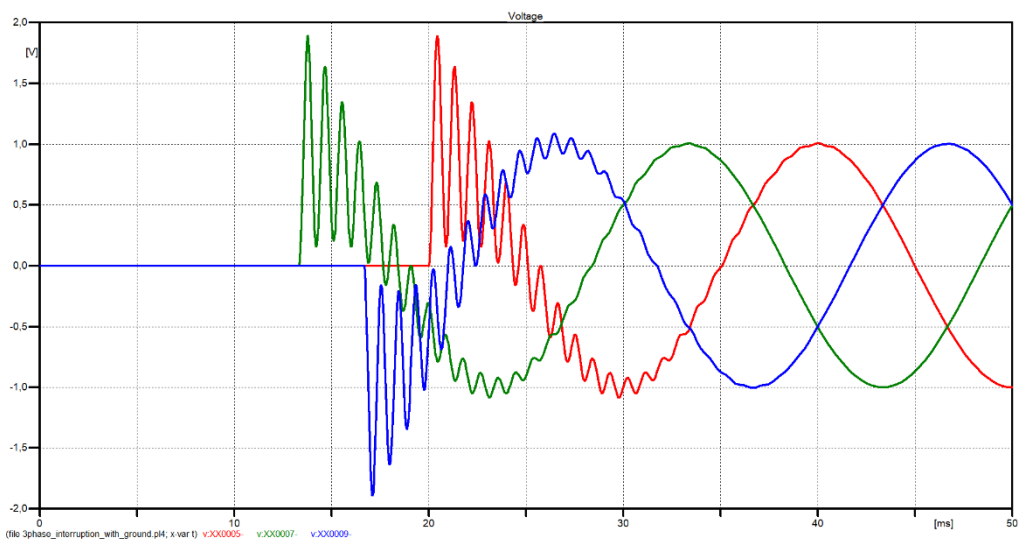
Στο Σχήμα 7.29 παρουσιάζεται η κυματομορφή ρεύματος στον διακόπτη, ενώ στο Σχήμα 7.30 η τάση κατά μήκος κάθε φάσης του τριπολικού διακόπτη. Φαίνεται ότι οι τάσεις κατά μήκος των διακοπών αρχίζουν να ταλαντώνονται την στιγμή όπου ανοίγουν οι αντίστοιχοι διακόπτες.



Σχήμα 7.28: Κύκλωμα διακοπής τριπολικού βραχυκυκλώματος με επαφή γης στο λογισμικό ATP-EMTP.



Σχήμα 7.29: Κυματομορφές ρευμάτων διακοπών.



Σχήμα 7.30: Κυματομορφές φασικών τάσεων κατά μήκος διακοπών.

7.8 Διακοπή ρεύματος τριπολικού βραχυκυκλώματος χωρίς επαφή γης

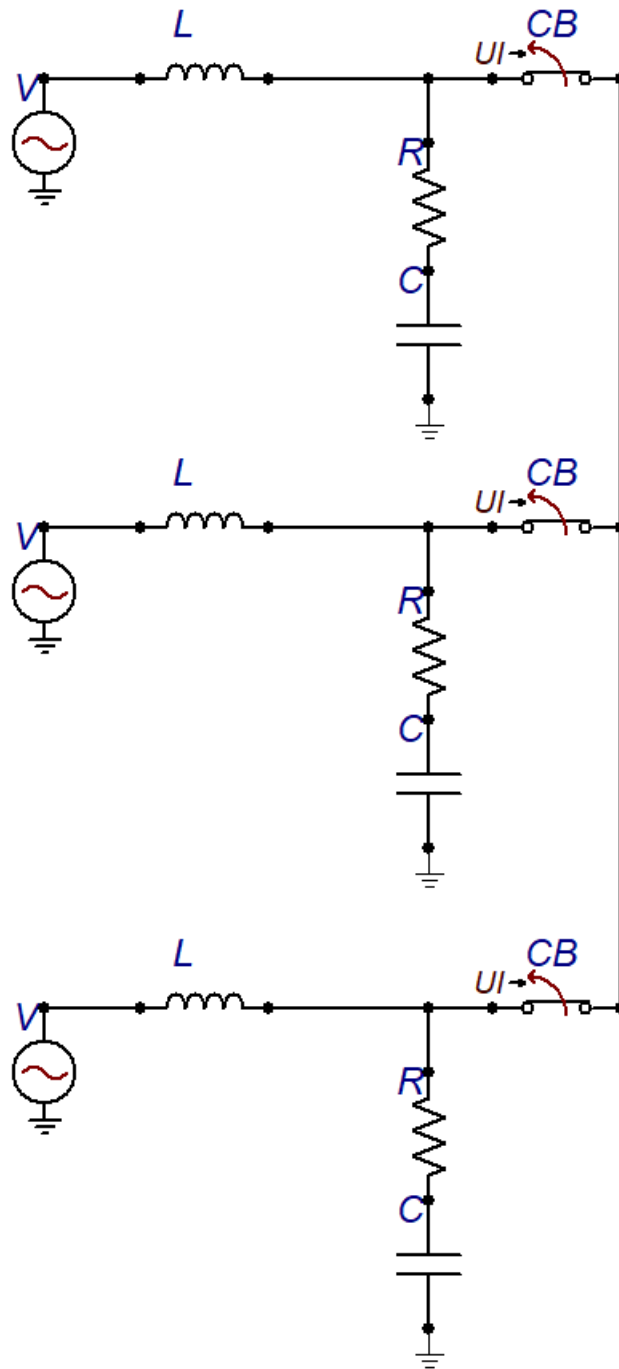
Στο Σχήμα 7.31 μελετάται αντίστοιχα στο ATP-EMTP ένα τριπολικό βραχυκύκλωμα χωρίς επαφή γης. Το εξεταζόμενο κύκλωμα σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση είναι ένα τριφασικό συμμετρικό σύστημα με γειωμένο ουδέτερο, το οποίο τροφοδοτείται από τρεις πηγές φασικού πλάτους 1pu, μέσω τριών όμοιων γραμμών L . Τα δεδομένα των στοιχείων του κυκλώματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-7 [9].

Το βραχυκύκλωμα προσομοιώνεται θεωρώντας τους διακόπτες αρχικά κλειστούς, ενώ στη συνέχεια ανοίγει ο πρώτος διακόπτης τη στιγμή $t = 13,33\text{ms}$ και έπειτα οι άλλοι δύο όταν μηδενιστεί στιγμιαία το φασικό ρεύμα που διέρχεται από αυτούς, ώστε να απαλειφθεί το ρεύμα βραχυκυκλώσεως.

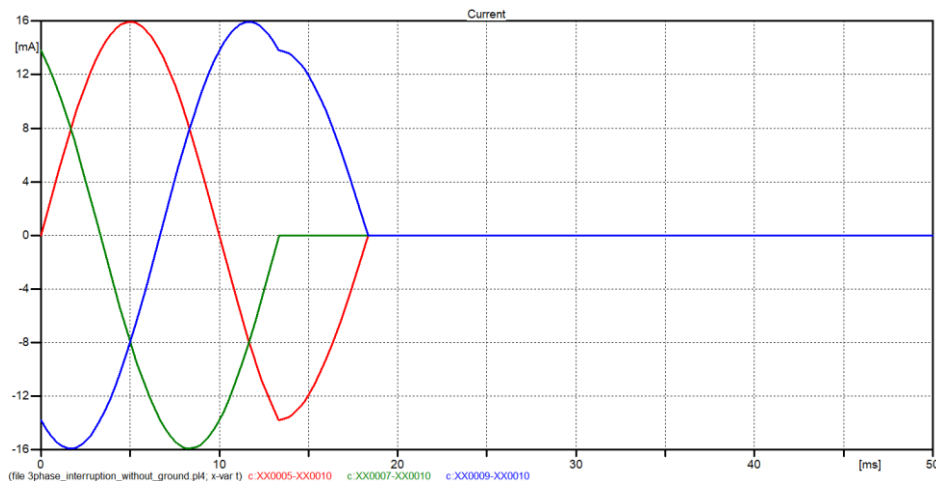
Όπως αναμενόταν σύμφωνα με το Κεφάλαιο 6.6.3 μετά το άνοιγμα του πρώτου διακόπτη το άθροισμα των ρευμάτων είναι σε κάθε στιγμή μηδενικό, εξ αιτίας της απουσίας σύνδεσης γης στο κύκλωμα. Συνεπώς, τα ρεύματα των φάσεων που δεν έχουν διακοπεί ακόμη, μηδενίζονται στιγμιαία ταυτόχρονα, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 7.32. Εκείνη τη στιγμή αρχίζουν να ταλαντώνονται και οι τάσεις των διακόπτων των δύο αυτών φάσεων.

Πίνακας 7-7: Δεδομένα κυκλώματος

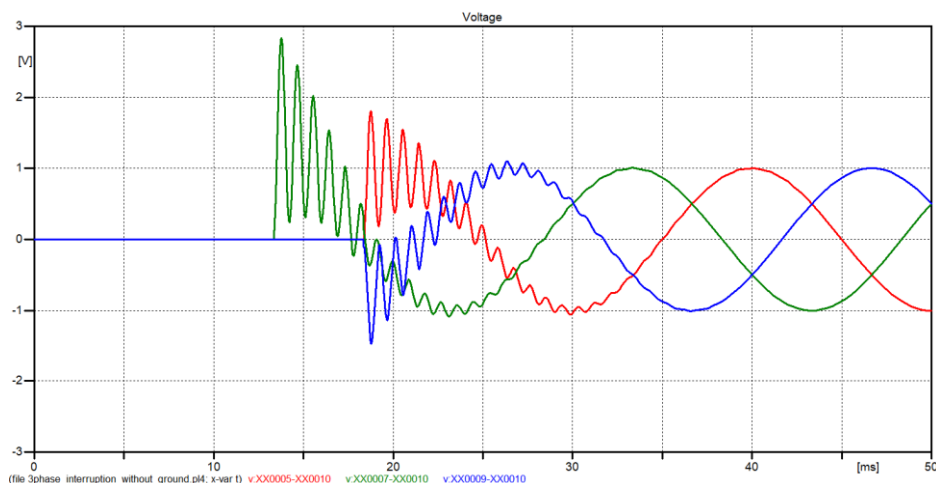
Στοιχείο	Δεδομένα
Χωρητικότητα C	$C = 0,1\mu\text{F}$
Αυτεπαγωγή L	$L = 200\text{mH}$
Αντίσταση R	$R = 100\Omega$
Πηγή τάσης V_s	$V_s = \sqrt{3}u$ (πολική τάση)



Σχήμα 7.31: Κύκλωμα διακοπής τριπολικού βραχυκυκλώματος χωρίς επαφή γης στο λογισμικό ATP-EMTP.



Σχήμα 7.32: Κυματομορφή φασικών ρευμάτων διακοπών.



Σχήμα 7.33: Κυματομορφή φασικών τάσεων κατά μήκος διακοπών.

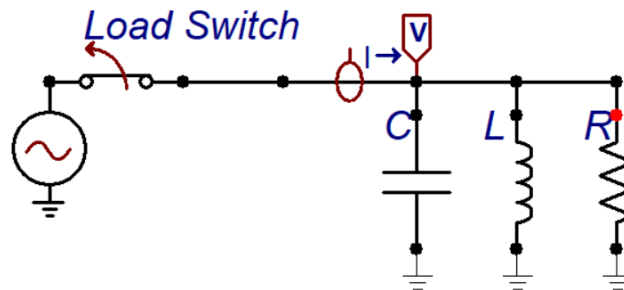
7.9 Αποσύνδεση φορτίου

Ένα φορτίο RLC σε παράλληλη συνδεσμολογία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.9, τροφοδοτείται από μία πηγή πλάτους 1pu. Ο διακόπτης ανοίγει στον πρώτο μηδενισμό του ρεύματος ώστε να αποσυνδέσει το φορτίο από την πηγή. Τα δεδομένα των διαφόρων στοιχείων του κυκλώματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-8 [9].

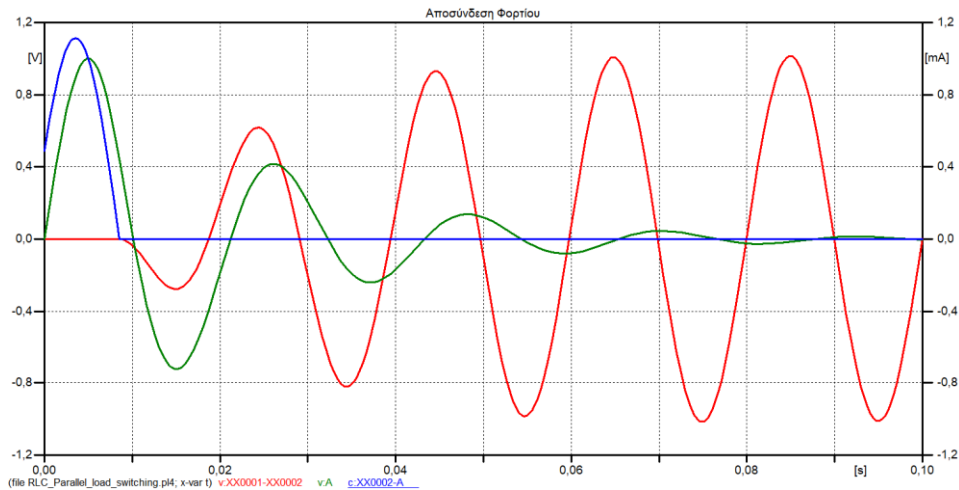
Με τη βοήθεια του λογισμικού ATP-EMTP, υλοποιήθηκε το κύκλωμα του Σχήματος 6.9, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.34. Οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.35.

Πίνακας 7-8: Δεδομένα κυκλώματος

Στοιχείο	Δεδομένα
Χωρητικότητα C	$C = 10\mu\text{F}$
Αυτεπαγωγή L	$L = 1,2\text{H}$
Αντίσταση R	$R = 1000\Omega$
Πηγή τάσης V_s	$V_s = \sin(\omega \cdot t)$



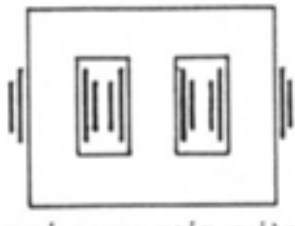


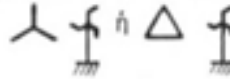

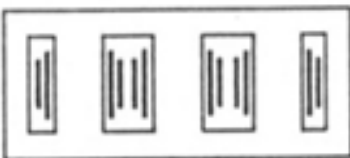


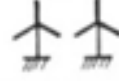
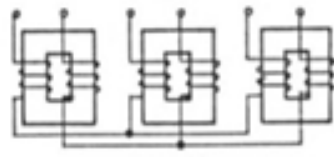
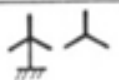

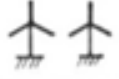

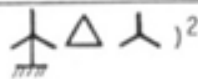
Σχήμα 7.34: Κύκλωμα αποσύνδεσης παράλληλου φορτίου RLC στο λογισμικό ATP-EMTP.



Σχήμα 7.35: Κυματομορφές ρεύματος (μπλε χρώμα), τάσης του πυκνωτή (κόκκινο χρώμα) και του διακόπτη (κόκκινο χρώμα).

8 Παράρτημα

8.1 Ομοπολική σύνθετη αντίσταση μετασχηματιστών

τύπος πυρήνα	ζεύξη	$\frac{X_0}{X_1}$	$\frac{R_0}{R_1}$
 πυρήνας με τρία σκέλη		$=0,8)^1$	1
		$=5)^1$	1
		$=0,10$	$=0,4$
		1	1
 πυρήνας με πέντε σκέλη		1	1
		$=100$	1
		1	1
 τρεις μονοφασικοί μετασχηματιστές που απαρτίζουν τριφασικό μετασχηματιστή.) ³		$=100$	1
		1	1
		1	1
πυρήνας με τρία σκέλη		$=2,4$	1
πυρήνας με πέντε σκέλη		$=3$	1

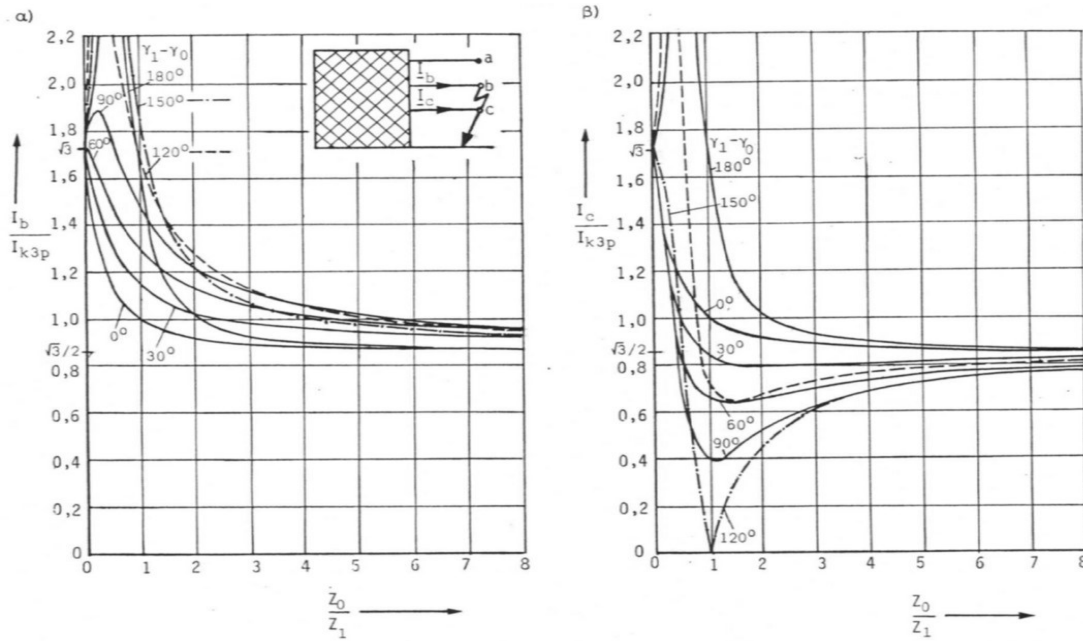
Σχήμα 8.1: Ομοπολική αντίσταση μετασχηματιστών.

8.2 Διερευνήσεις βραχυκυκλωμάτων

8.2.1 Διπολικό βραχυκύκλωμα με επαφή γης

Χρησιμοποιώντας την (2.21) στο Σχήμα 8.2 παρουσιάζονται οι μεταβολές των ρευμάτων των φάσεων b και c (κανονικοποιημένου ως προς το I_{k3p}) κατά το διπολικό βραχυκύκλωμα με επαφή γης σε συνάρτηση με τον λόγο $|\bar{Z}_0|/|\bar{Z}_1|$, θεωρώντας $\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2$. Στο Σχήμα απεικονίζονται διάφορες περιπτώσεις διαφοράς γωνιών $\angle \bar{Z}_1 - \angle \bar{Z}_0$. Από την ανάλυση του Σχήματος προκύπτουν τα εξής:

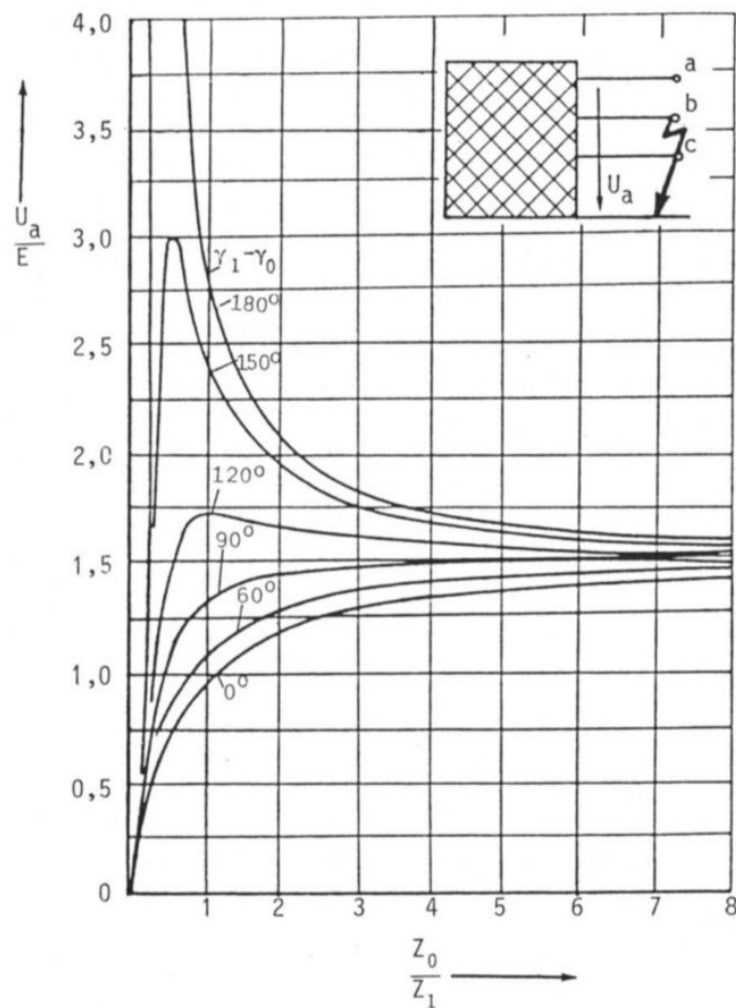
- Για $|\bar{Z}_0|/|\bar{Z}_1| \rightarrow \infty$: οι όλες οι καμπύλες έχουν ασύμπτωτο αντίστοιχα $I_b/I_{k3p} = \sqrt{3}/2$ και $I_c/I_{k3p} = \sqrt{3}/2$ για τις φάσεις b και c, αντίστοιχα. Πρόκειται δηλ. για την τιμή του διπολικού βραχυκυκλώματος χωρίς επαφή γης, η οποία μπορεί να εκληφθεί θεωρώντας άπειρη τιμή ομοπολικής συνιστώσας και επομένως μηδενικό ρεύμα επιστροφής μέσω της γης.
- Για μικρές τιμές $|\bar{Z}_0|$ και μεγάλες τιμές $\angle \bar{Z}_1 - \angle \bar{Z}_0$: παρατηρούνται σημαντικές αλλαγές στα μεγέθη $I_b/I_{k3p} = \sqrt{3}/2$ και $I_c/I_{k3p} = \sqrt{3}/2$.
- $|\bar{I}_b| \rightarrow \infty$, $|\bar{I}_c| \rightarrow \infty$ για $\angle \bar{Z}_1 - \angle \bar{Z}_0 = 180^\circ$. Συνήθως η διαφορά $\angle \bar{Z}_1 - \angle \bar{Z}_0$ είναι μικρή, καθώς τόσο η ορθή όσο και η ομοπολική συνιστώσα έχουν επαγωγικό χαρακτήρα. Όταν όμως η ομοπολική συνιστώσα έχει χωρητικό χαρακτήρα είναι δυνατές τιμές $\angle \bar{Z}_1 - \angle \bar{Z}_0 > 90^\circ$. Αυτό μπορεί να υλοποιηθεί στην περίπτωση μη γειωμένων ουδέτερων κόμβων η γειωμένου κόμβου μέσω πηνίου παράλληλου συντονισμού (πηνίο Petersen) με μη πλήρη αντιστάθμιση της χωρητικότητας της γραμμής. Το πηνίο Petersen είναι μια συνηθισμένη πρακτική γείωσης σε πολλά δίκτυα μεταφοράς.
- Κατά βάση ισχύει ότι $|\bar{I}_b| \neq |\bar{I}_c|$. Τα δύο ρεύματα αποκτούν το αυτό μέτρο μόνο όταν $\angle \bar{Z}_1 = \angle \bar{Z}_0$.
- Το διπολικό βραχ. χωρίς ή με επαφή γης προκαλεί μικρότερη μηχανική καταπόνηση από το τριπολικό καθώς συνήθως ισχύει $|\bar{Z}_0| \gg |\bar{Z}_1|$ και επομένως $I_b, I_c < I_{k3p}$. Στις σπάνιες περιπτώσεις μελέτης βραχυκυκλωμάτων στο δευτερεύον μετασηματιστών διανομής σε συνδεσμολογία Yz ή Dz ισχύει $|\bar{Z}_0| < |\bar{Z}_1|$.



Σχήμα 8.2: Μεταβολή ρεύματος διπολικού βραχυκυκλώματος με επαφή γης σε συνάρτηση με τον λόγο $|\bar{Z}_0|/|\bar{Z}_1|$.

Επίσης, στο Σχήμα 8.3 παρουσιάζεται η μεταβολή της τάσης του υγιούς αγωγού της φάσης *a* ανηγμένη στη φασική τάση *E* σε συνάρτηση με τον λόγο $|\bar{Z}_0|/|\bar{Z}_1|$, θεωρώντας $\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2$. Η αναλυτική σχέση δίνεται στην (2.25). Από το Σχήμα προκύπτει:

- Ο λόγος $|\bar{U}_a|/|\bar{E}|$ δεν μεταβάλλεται για $\angle \bar{Z}_1 - \angle \bar{Z}_0 < 0^\circ$
- Για $|\bar{Z}_0|/|\bar{Z}_1| \rightarrow \infty$ είναι σε όλες τις περιπτώσεις $|\bar{U}_a|/|\bar{E}| = 1.5$. Δηλ. παρατηρείται υπέρταση στον υγιή αγωγό της φάσης *a*.
- $|\bar{U}_a|/|\bar{E}| \rightarrow \infty$ για τις ίδιες συνθήκες που απειρίζονται και τα ρεύματα των φάσεων *b* και *c*. Ωστόσο, ενώ στην περίπτωση των ρευμάτων με επαφή γης για $|\bar{Z}_0|/|\bar{Z}_1| \rightarrow \infty$ προκύπτουν τα ρεύματα του βραχυκυκλώματος χωρίς επαφή γης, δεν συμβαίνει το ίδιο για την $|\bar{U}_a|$. Φυσικά αυτό σημαίνει ότι η αγώγιμη σύνδεση με τη γη δεν προκαλεί για $|\bar{Z}_0|/|\bar{Z}_1| \rightarrow \infty$ ροή ομοπολικού ρεύματος· προκαλεί όμως μεταφορά ομοπολικής τάσης.

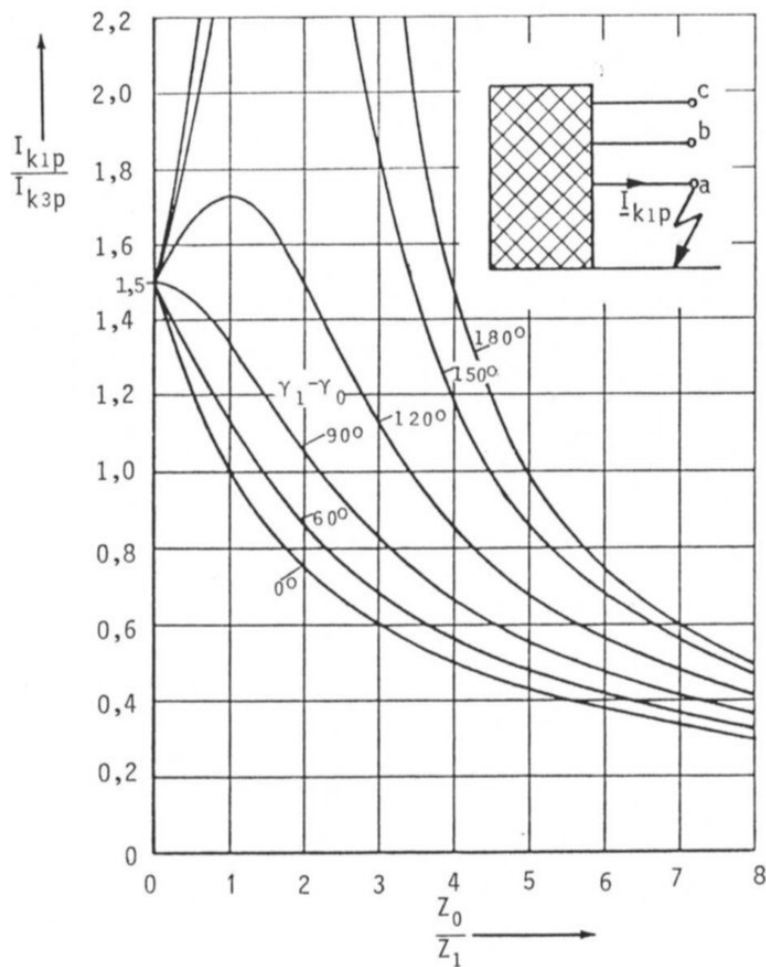


Σχήμα 8.3: Μεταβολή ρεύματος διπολικού βραχυκυκλώματος με επαφή γης σε συνάρτηση με τον λόγο $|\bar{Z}_0|/|\bar{Z}_1|$.

8.2.2 Μονοπολικό βραχυκύκλωμα

Σχεδιάζοντας την (2.39) στο Σχήμα 8.4 για διάφορες τιμές της $\angle \bar{Z}_1 - \angle \bar{Z}_0$ προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα όσον αφορά τη μεταβολή του ρεύματος του μονοπολικού βραχυκυκλώματος:

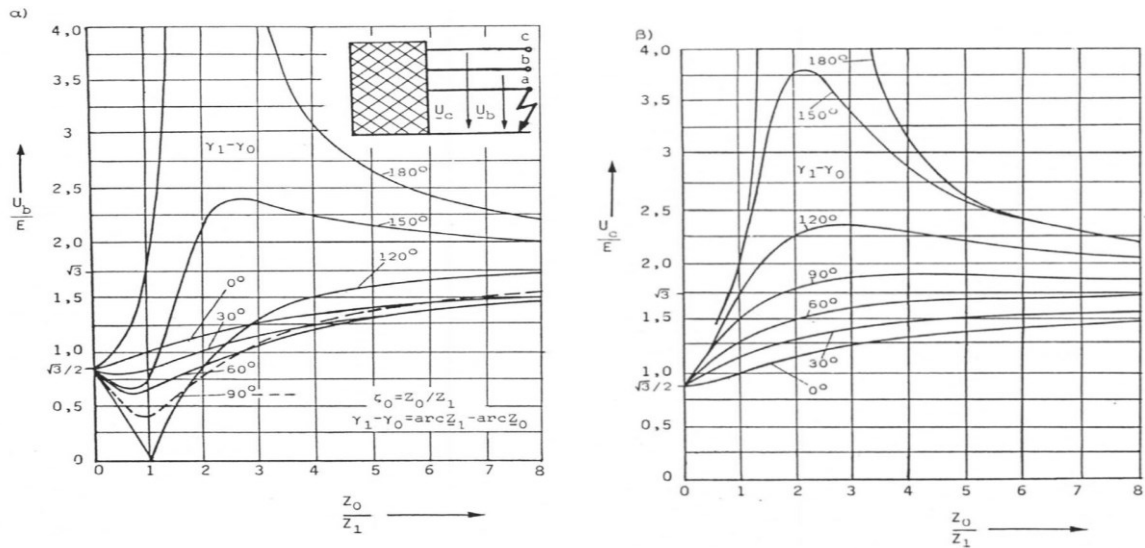
- για $|\bar{Z}_0|/|\bar{Z}_1| \rightarrow \infty$ ισχύει: $I_{k1p}/I_{k3p} \rightarrow 0$, καθώς η περίπτωση πρακτικά αντιστοιχεί σε περίπτωση διακοπή αγωγού (ανοιχτό κύκλωμα),
- για $|\bar{Z}_0|/|\bar{Z}_1| \rightarrow 0$ για όλες τις περιπτώσεις ισχύει: $I_{k1p}/I_{k3p} \rightarrow 1.5$, καθώς το ρεύμα βραχυκυκλώματος δεν συναντά αντίσταση κατά την επιστροφή του από τη γη,
- $I_{1kp} \rightarrow \infty$, για $|\bar{Z}_0|/|\bar{Z}_1| = 2$ και για $\angle \bar{Z}_1 - \angle \bar{Z}_0 = 180^\circ$ (όπως και για το διπολικό βραχυκύκλωμα, αλλά η συνθήκη αυτή συναντάται σε ειδικές περιπτώσεις).



Σχήμα 8.4: Μεταβολή ρεύματος μονοπολικού βραχυκυκλώματος σε συνάρτηση με τον λόγο $|\bar{Z}_0|/|\bar{Z}_1|$.

Στο Σχήμα 8.5 σχεδιάζεται η μεταβολή της τάσης των υγιών αγωγών των φάσεων b και c ανηγμένες στη φασική τάση E σε συνάρτηση με τον λόγο $|\bar{Z}_0|/|\bar{Z}_1|$, θεωρώντας $\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2$. Η αναλυτική σχέση δίνεται στην (2.25). Από το Σχήμα προκύπτει:

- Για $|\bar{Z}_0|/|\bar{Z}_1| \rightarrow \infty$ οι υγιείς φάσεις αποκτούν τάση $\sqrt{3}|E|$. Δηλ. παρατηρείται υπέρταση στους υγιείς αγωγούς,
- Για $|\bar{Z}_0|/|\bar{Z}_1| \rightarrow 0$ οι υγιείς φάσεις αποκτούν τάση $\sqrt{3}/2|E|$,
- Για τις ίδιες συνθήκες που απειρίζεται το ρεύμα του σφάλματος γίνονται άπειρες και οι τάσεις στους υγιείς αγωγούς ($|\bar{Z}_0|/|\bar{Z}_1| = 2$ και $\angle \bar{Z}_1 - \angle \bar{Z}_0 = 180^\circ$),
- για $\angle \bar{Z}_1 - \angle \bar{Z}_0 > 90^\circ$ είναι δυνατές λειτουργικές υπερτάσεις μεγαλύτερης του $\sqrt{3}|E|$.



Σχήμα 8.5: Μεταβολή ρεύματος διπολικού βραχυκυκλώματος με επαφή γης σε συνάρτηση με τον λόγο $|\bar{z}_0|/|\bar{z}_1|$.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση φαίνεται ότι η τιμή της αντίστασης του σφάλματος, η οποία μπορεί να ρυθμιστεί μέσω της τιμής της γείωσης του συστήματος μπορεί οδηγεί σε διαφορετικές περιπτώσεις όσον αφορά το μέτρο του ρεύματος σφάλματος και της τάσης των υγιών αγωγών. Συγκεκριμένα ορίζονται:

- **Στερεά γειωμένα δίκτυα:** τα δίκτυα που γειώνονται άμεσα, δηλαδή μέσω πολύ μικρής αντίστασης (δίκτυα ΧΤ). Στα δίκτυα ΧΤ χρησιμοποιείται μικρή αντίσταση γείωσης, γιατί τα ρεύματα είναι ήδη μικρά λόγω της μεγάλης αντίστασης από τις γεννήτριες. Θέλουμε επομένως να παρέχουμε απλά μια δίοδο προς τη γη.
- **Αποτελεσματικά γειωμένα δίκτυα:** τα δίκτυα που γειώνονται μέσω αντίστασης κατάλληλης τιμής (μέτρου) και κατάλληλου είδους (γωνία), ώστε το ρεύμα μονοπολικού βραχυκυκλώματος να παραμένει μικρότερο του ρεύματος του τριπολικού βραχυκυκλώματος και οι ανυψώσεις των τάσεων των υγιών φάσεων να είναι μηδενικές ή ελάχιστες. Πρακτικά το κριτήριο του ρεύματος θέτει το κάτω όριο και το κριτήριο της τάσης το άνω όριο επιλογής της αντίστασης γείωσης. Τα ελληνικά δίκτυα μεταφοράς είναι αποτελεσματικά γειωμένα.

9 Βιβλιογραφία

- [1] Β. Κ. Παπαδιάς, Ταχεία Μεταβατικά Φαινόμενα στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Παπασωτηρίου, 1997.
- [2] Π. Ντοκόπουλος and Δ. Λαμπρίδης, Μεταβατικά Φαινόμενα στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ζήτη, 1998.
- [3] Ν. Α. Βοβός and Γ. Β. Γιαννακόπουλος, Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ζήτη, 2019.
- [4] IEC, International Standard Short-circuit currents in three-phase a.c. systems, 2016.
- [5] J. Grainger and J. W. D. Stevenson, Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Fountas, 2014.
- [6] Δ. Κ. Τσανάκας, Συμμετρικές Συνιστώσες και Ανάλυση Σφαλμάτων στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας.
- [7] B. METZ-NOBLAT, F. DUMAS and C. POULAIN, Cahier technique no. 158 Calculation of short-circuit currents.
- [8] G. Balzer, *Short-Circuit Calculation With Fullsize Converters According To IEC 60909*, Darmstadt: Darmstadt University of Technology, 2016.
- [9] G. Andersson and C. M. Franck, *Electric Power Systems 227-0122-00*, – Power Systems and High Voltage Laboratories ETH Zurich, September 2012.
- [10] X. Y. J. D. X. L. Y. G. Z. L. J. P. K. W. Yun Geng, "Experimental Investigation of the Prestrike Characteristics of a Double-Break Vacuum Circuit Breaker under DC Voltages".*Energies*.
- [11] N. Jenkins, J. Ekanayake and G. Strbac, *Distributed Generation*, London: The Institute of Engineering and Technology, 2010.
- [12] 'Fundref', <http://www.crossref.org/fundref/>, 4 December 2014.

- [13] U. D. Annakkage, N. K. C. Nair, Y. Liang, A. M. Gole, V. Dinavahi, B. Gustavsen, T. Noda, H. Ghasemi, A. Monti, M. Matar, R. Iravani and J. A. Martinez, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 27, no. 1, pp. 411-420, Jan. 2012.
- [14] Θ. Παπαδόπουλος, *Δομή και Λειτουργία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας*.
- [15] [Online]. Available: <https://www.slideshare.net/bawaparam/laplace-table-32774643>.