

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**



**Αντικεραυνική προστασία ηλεκτρικά διασυνδεδεμένων  
ελλιμενισμένων πλοίων**

**Διπλωματική εργασία**

**Βαρβάρα Ρήγα**

Επιτροπή Διπλωματικής εργασίας:

Γεώργιος Πέππας, Επίκουρος Καθηγητής – Επιβλέπων Διπλωματικής

Κωνσταντίνος Γυφτάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής

Θωμάς Τσοβίλης, Αναπληρωτής Καθηγητής

Ιούλιος 2025

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την τεχνολογία του cold-ironing, η οποία αφορά την ηλεκτρική διασύνδεση πλοίων με το ηλεκτρικό δίκτυο της ξηράς, κατά τη διάρκεια της παραμονής τους στο λιμάνι. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει στα πλοία να απενεργοποιήσουν τις γεννήτριές τους, μειώνοντας τις εκπομπές των εκλυόμενων από τα καύσιμα ρύπων, και οδηγώντας, για το λόγο αυτό, στη συμμόρφωση με τους διεθνείς κανόνες και πρότυπα που αφορούν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις στη ναυτιλία. Ωστόσο, η εφαρμογή του cold-ironing δημιουργεί νέες τεχνικές προκλήσεις, καθώς ο τρόπος της διασύνδεσης του συστήματος πλοίου με το ηλεκτρικό δίκτυο της ξηράς, καθιστά ευάλωτη την εν λόγω τοπολογία σε κεραυνικά πλήγματα. Η σύνδεση του συστήματος του πλοίου, μέσω εναέριων γραμμών μεταφοράς και τοπικών υποσταθμών, τίθενται σε κίνδυνο από την παρουσία κεραυνού, καθώς οι υπερτάσεις που προκαλούνται από κεραυνικά πλήγματα, δύνανται να καταστρέψουν κρίσιμα κυκλωματικά στοιχεία της συνολικής τοπολογίας ενός τέτοιου συστήματος.

Επιπροσθέτως, μελετάται η αξία της αντικεραυνικής προστασίας και η τοποθέτηση κατάλληλων διατάξεων προστασίας έναντι των υπερτάσεων σε μία διάταξη cold-ironing. Για τον σκοπό αυτό, μοντελοποιήθηκαν βάσει του προτύπου IEC 62305-1, οι διαφορετικοί τύποι κεραυνικών πληγμάτων (αρνητικός κεραυνός με και χωρίς επακόλουθο πλήγμα, θετικός κεραυνός), οι οποίοι στη συνέχεια εφαρμόστηκαν στην cold-ironing τοπολογία, ώστε να προσδιοριστούν οι κρίσιμοι παράγοντες που επηρεάζουν την ασφάλεια του συστήματος. Τέλος, εφαρμόστηκαν τρία είδη διαφορετικών διατάξεων τοπολογίας για την προστασία του συστήματος, εκ των οποίων επιλέγεται η αποδοτικότερη.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, οι οποίες υλοποιήθηκαν με το λογισμικό ATP-EMTP, για σκοπούς ανάδειξης των τεχνικών προκλήσεων μιας διάταξης cold-ironing, όσον αφορά το κεραυνικό πλήγμα και τις υπερτάσεις όπου ενδέχεται να προκύψουν στην εκάστοτε περίπτωση, όπως επίσης και τις διαφορετικές διατάξεις προστασίας έναντι των υπερτάσεων. Βάσει της εκτίμησης της απόδοσης της εκάστοτε διάταξης, προστασίας κατά την εφαρμογή διαφορετικών κεραυνικών πληγμάτων, επιλέγεται η καλύτερη τοπολογία προστασίας για το εν λόγω σύστημα.

**Λέξεις-κλειδιά:** Διασύνδεση ακτής-πλοίου, ηλεκτρική διασύνδεση, περιβαλλοντική σύμβαση, μείωση εκπομπών, κεραυνός, σχεδιασμός αντικεραυνικής προστασίας, υπέρταση.

## ABSTRACT

The present thesis investigates the cold-ironing technology, which refers to the electrical interconnection of berthed ships with the onshore power grid. This arrangement allows vessels to shut down their onboard generators, reducing, this way, emissions from fuel combustion and ensuring compliance with international regulations and standards regarding environmental impact in maritime transport. However, the way a ship's electrical system ties into the shore grid leaves the overall topology susceptible to lightning strikes. Connections that run through overhead lines and local substations are exposed; the overvoltages produced by lightning can damage critical circuit components.

Furthermore, this thesis examines the importance of lightning protection and placement of suitable surge-protection devices in a cold ironing installation. Different lightning-stroke types, such as negative strokes (including subsequent strokes) and positive strokes, were modelled according to the IEC 62305-1 standard, and applied to the cold-ironing topology, in order to pinpoint the factors that affect the system's safety mostly. Three alternative protection configurations were then tested, selecting the most effective.

Finally, simulation results, which were carried out via the ATP-EMTP software, are presented. These simulations highlight the technical challenges of a cold-ironing configuration in the context of lightning strikes and the resulting overvoltages that may arise in each case, as well as the performance of different surge protection topologies. Based on the evaluation of each protection scheme under different lightning strike scenarios, the most efficient protection topology is being pointed out.

**Keywords:** Shore-to-ship power supply, electrical interconnection, environmental compliance, emission reduction, lightning strikes, lightning protection system design, transient overvoltage.



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα επιθυμούσα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη στον επιβλέποντα Καθηγητή μου, κύριο Γεώργιο Πέππα, όπως επίσης και τον υποψήφιο διδάκτορα Μιχαήλ Πιτσικάλη, για τη συνεχή τους υποστήριξη, καθοδήγηση και ενθάρρυνση, αλλά και τα εποικοδομητικά τους σχόλια και την αμέριστη διάθεσή τους να μοιραστούν γνώσεις και εμπειρίες.

Ακόμη, θα ήθελα να απευθύνω τις εγκάρδιες ευχαριστίες μου στην οικογένεια και τους φίλους μου, για την αδιάκοπη στήριξη και κατανόηση που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η εμπιστοσύνη τους στις δυνατότητές μου και η στήριξή τους στις δυσκολίες, τις οποίες κλήθηκα να αντιμετωπίσω σε αυτό το ταξίδι, έκανα τη διαφορά ανάμεσα στο απλά επαρκές και στο πραγματικά εφικτό.

Σε όλους εσάς, αφιερώνω την εργασία αυτή, καθώς χωρίς τη συμβολή, την εμπιστοσύνη και τη στήριξή σας, η ολοκλήρωσή της δε θα ήταν η ίδια.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>XVIII</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ .....</b>	<b>20</b>
2.1 Ορισμός cold-ironing .....	20
2.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις .....	20
2.3 Πρότυπα και οργανισμοί για την καταπολέμηση ρύπων στη ναυτιλία.....	21
2.4 Πλεονεκτήματα cold-ironing .....	22
2.5 Εγκαταστάσεις cold-ironing ανά τον κόσμο .....	23
2.1 Πρόγραμμα ATP-EMTP και ο Προ-επεξεργαστής ATPDraw .....	26
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΑΙ ΝΟΜΟΘΕΣΙΕΣ ΠΟΥ ΔΙΕΠΟΥΝ ΤΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΤΩΝ ΠΛΟΙΩΝ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΗΣ ΞΗΡΑΣ .....</b>	<b>29</b>
3.1 Εισαγωγή.....	29
3.2 Διεθνείς Οργανισμοί .....	29
3.3 Ευρωπαϊκή νομοθεσία.....	31
3.4 Διεθνή πρότυπα για τη διασύνδεση cold-ironing.....	32
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ COLD-IRONING.....</b>	<b>35</b>
4.1 Περιγραφή συστήματος .....	35
4.2 Η σύσταση της Ευρωπαϊκής Ένωσης .....	36
4.3 Επισκόπηση τεχνικών προδιαγραφών – Δίκτυο διανομής.....	37
4.4 Μετασχηματιστές ισχύος .....	38
4.5 Μετατροπείς Συχνότητας .....	40
4.6 Καλώδια και αγωγοί.....	47
4.7 Συγχρονισμός .....	50
4.8 Απαιτήσεις σε ισχύ.....	51
4.9 Κύκλωμα πλοίου .....	53
4.10 Εταιρείες που δραστηριοποιούνται στο cold-ironing .....	55
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΕΝΑΝΤΙ ΣΤΟΥΣ ΚΕΡΑΥΝΟΥΣ ΚΑΙ ΤΙΣ ΥΠΕΡΤΑΣΕΙΣ</b>	<b>57</b>
5.1 Εισαγωγή.....	57
5.2 Τύποι εκκενώσεων του κεραυνού .....	59

5.3 Τρόποι μεταφοράς φορτίου προς τη γη.....	61
5.4 Μέγιστο ρεύμα κεραυνού.....	62
5.5 Απεικονίσεις κυματομορφής ρεύματος πρώτου κεραυνικού πλήγματος.....	66
5.6 Ακραίες καταγεγραμμένες τιμές των παραμέτρων κεραυνού.....	68
5.7 Κυματομορφές προτύπου.....	70
5.8 Αξία αντικεραυνικής προστασίας .....	77
5.9 Στοιχεία προστασίας έναντι των υπερτάσεων.....	78
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ.....</b>	<b>89</b>
6.1 Λογισμικό προσομοίωσης – ATPDraw .....	89
6.2 Μόνιμη κατάσταση .....	89
6.3 Επίδραση γωνίας κεραυνικού πλήγματος σε διάταξη χωρίς προστασία .....	97
6.4 Επίδραση κεραυνικού πλήγματος σε διάταξη χωρίς προστασία – εφαρμογή όλων των πληγμάτων κατά IEC 62305-1 .....	117
6.5 Προστασία έναντι των υπερτάσεων – σύγκριση διατάξεων προστασίας .....	137
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>226</b>
7.1 Επισκόπηση διπλωματικής εργασίας.....	226
7.2 Σύνοψη συμπερασμάτων.....	227
7.3 Ιδέες για μελλοντική έρευνα .....	229
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>230</b>

## ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Λειτουργικό διάγραμμα του προγράμματος ATP/EMTP [8].	27
Εικόνα 2. Υποστηριζόμενες ρουτίνες του προγράμματος ATP [15].	27
Εικόνα 3. Το γραφικό περιβάλλον του ATPDraw [7].	28
Εικόνα 4. Σχέδιο τοπολογίας για τη διασύνδεση cold-ironing.	36
Εικόνα 5. Επισκόπηση της σύνδεσης shore-to-ship βάσει 2006/339/EC της ΕΕ [43].	36
Εικόνα 6. Συνδυασμός cold-ironing και συστήματος μικροδικτύου [44].	38
Εικόνα 7. Κυκλωματική αναπαράσταση μετασχηματιστή ξηράς με το πρόγραμμα ATPDraw.	39
Εικόνα 8. Κυκλωματική αναπαράσταση μετασχηματιστή πλοίου μέσω εργαλείου ATPDraw.	40
Εικόνα 9. Συχνότητα δικτύων ανά τον κόσμο [49].	41
Εικόνα 10. Κυκλωματική διάταξη τριφασικού ανορθωτή στο πρόγραμμα ATP-EMTP.	43
Εικόνα 11. Κυκλωματική διάταξη τριφασικού αντιστροφέα στο πρόγραμμα ATP-EMTP.	44
Εικόνα 12. Κυκλωματική διάταξη μετατροπέα συχνότητας στο πρόγραμμα ATP-EMTP.	47
Εικόνα 13. Πρώτη σελίδα του datasheet του καλωδίου.	48
Εικόνα 14. Δεύτερη σελίδα του datasheet του καλωδίου.	49
Εικόνα 15. Τριπολικό καλώδιο – απεικόνιση στον προεπεξεργαστή ATPDraw.	50
Εικόνα 16. Κυκλωματική αναπαράσταση φορτίου του πλοίου μέσω εργαλείου ATPDraw.	55
Εικόνα 17. Τύποι των ηλεκτρικών εκκενώσεων από το σύννεφο στο έδαφος.	60
Εικόνα 18. Αναπαράσταση των τριών ειδών μεταφοράς φορτίου προς τη γη, σε συνδυασμό με την κυματομορφή ρεύματος επί το έδαφος.	61
Εικόνα 19. Αθροιστικές Στατιστικές κατανομές των μέγιστων ρευμάτων, βάσει CIGRE και IEE [70].	65
Εικόνα 20. Απεικονίσεις των κυματομορφών ρεύματος επιστροφής πρώτων κεραυνικών πληγμάτων (Τριγωνική, Διπλό-εκθετική, CIGRE-concave, Double-peaked) [71].	67
Εικόνα 21. Απεικόνιση, σε κοινούς άξονες, κυματομορφών προτύπου IEC 62305-1 και μοντελοποιημένων πηγών μέσω εργαλείου ATPDraw – Σύγκριση πρώτου θετικού κεραυνικού πλήγματος, LPL-I.	72
Εικόνα 22. Απεικόνιση, σε κοινούς άξονες, κυματομορφών προτύπου IEC 62305-1 και μοντελοποιημένων πηγών μέσω εργαλείου ATPDraw – Σύγκριση πρώτου θετικού κεραυνικού πλήγματος, LPL-II.	72
Εικόνα 23. Απεικόνιση, σε κοινούς άξονες, κυματομορφών προτύπου IEC 62305-1 και μοντελοποιημένων πηγών μέσω εργαλείου ATPDraw – Σύγκριση πρώτου θετικού κεραυνικού πλήγματος, LPL-III.	73
Εικόνα 24. Απεικόνιση, σε κοινούς άξονες, κυματομορφών προτύπου IEC 62305-1 και μοντελοποιημένων πηγών μέσω εργαλείου ATPDraw – Σύγκριση πρώτου αρνητικού κεραυνικού πλήγματος, LPL-I.	73
Εικόνα 25. Απεικόνιση, σε κοινούς άξονες, κυματομορφών προτύπου IEC 62305-1 και μοντελοποιημένων πηγών μέσω εργαλείου ATPDraw – Σύγκριση πρώτου αρνητικού κεραυνικού πλήγματος, LPL-II.	74
Εικόνα 26. Απεικόνιση, σε κοινούς άξονες, κυματομορφών προτύπου IEC 62305-1 και μοντελοποιημένων πηγών μέσω εργαλείου ATPDraw – Σύγκριση πρώτου αρνητικού κεραυνικού πλήγματος, LPL-III.	74

Εικόνα 27. Απεικόνιση, σε κοινούς άξονες, κυματομορφών προτύπου IEC 62305-1 και μοντελοποιημένων πηγών μέσω εργαλείου ATPDraw – Σύγκριση επακόλουθων αρνητικών κεραυνικών πληγμάτων, LPL-I.....	75
Εικόνα 28. Απεικόνιση, σε κοινούς άξονες, κυματομορφών προτύπου IEC 62305-1 και μοντελοποιημένων πηγών μέσω εργαλείου ATPDraw – Σύγκριση επακόλουθων αρνητικών κεραυνικών πληγμάτων, LPL-II. ....	75
Εικόνα 29. Απεικόνιση, σε κοινούς άξονες, κυματομορφών προτύπου IEC 62305-1 και μοντελοποιημένων πηγών μέσω εργαλείου ATPDraw – Σύγκριση επακόλουθων αρνητικών κεραυνικών πληγμάτων, LPL-III. ....	76
Εικόνα 30. Τοπολογία πηγών ρεύματος κεραυνού στο εργαλείο ATPDraw.....	77
Εικόνα 31. Κυκλωματικό ισοδύναμο προσομοίωσης Pinceti, Giannettoni [67].....	84
Εικόνα 32. Αποτύπωση του κυκλωματικού ισοδυναμίου του προτεινόμενου μοντέλου, μέσω εργαλείου ATPDraw. ....	84
Εικόνα 33. Ρεύμα στην είσοδο του surge arrester, με ονομαστική τάση λειτουργίας στα 5 kV.....	85
Εικόνα 34. Συνολική τάση surge arrester, με ονομαστική τάση λειτουργίας στα 5kV.....	86
Εικόνα 35. Ρεύμα εισόδου και συνολική τάση surge arrester, σε κοινό διάγραμμα, με ονομαστική τάση λειτουργίας στα 5kV. ....	86
Εικόνα 36. Ρεύμα στην είσοδο του surge arrester, με ονομαστική τάση λειτουργίας στα 12.5kV.....	87
Εικόνα 37. Συνολική τάση surge arrester, με ονομαστική τάση λειτουργίας στα 12.5kV.....	87
Εικόνα 38. Ρεύμα εισόδου και συνολική τάση surge arrester, σε κοινό διάγραμμα, με ονομαστική τάση λειτουργίας στα 12.5kV. ....	88
Εικόνα 39. Τοπολογία κυκλώματος στη μόνιμη κατάσταση. ....	89
Εικόνα 40. Πολικές τάσεις δικτύου τροφοδοσίας των 20kV – είσοδος μετασχηματιστή ξηράς. ....	91
Εικόνα 41. Ρεύματα δικτύου τροφοδοσίας – είσοδος μετασχηματιστή ξηράς. ....	91
Εικόνα 42. Πολικές τάσεις εξόδου μετασχηματιστή ξηράς. ....	92
Εικόνα 43. Ρεύματα εξόδου μετασχηματιστή ξηράς. ....	92
Εικόνα 44. Τάση εξόδου ανορθωτή, μετά το φίλτρο.....	93
Εικόνα 45. Ρεύματα εξόδου ανορθωτή, μετά το φίλτρο, μετρούμενα στον θετικό και αρνητικό ακροδέκτη της εξόδου του. ....	93
Εικόνα 46. Πολικές τάσεις εξόδου αντιστροφέα, μετρούμενες μετά το φίλτρο. ....	94
Εικόνα 47. Ρεύματα εξόδου αντιστροφέα, μετρούμενα μετά το φίλτρο. ....	94
Εικόνα 48. Τάσεις εισόδου στον μετασχηματιστή πλοίου – έξοδος καλωδίου διασύνδεσης συστήματος τροφοδοσίας ξηράς. ....	95
Εικόνα 49. Ρεύματα εισόδου στον μετασχηματιστή πλοίου – έξοδος καλωδίου διασύνδεσης συστήματος τροφοδοσίας ξηράς. ....	95
Εικόνα 50. Τάσεις εξόδου μετασχηματιστή πλοίου – τάσεις τροφοδοσίας του φορτίου του πλοίου. ....	96
Εικόνα 51. Ρεύματα εξόδου μετασχηματιστή πλοίου – ρεύματα τροφοδοσίας του φορτίου του πλοίου... ..	96
Εικόνα 52. Σημείο κεραυνικού πλήγματος και σημεία μετρήσεων. ....	97
Εικόνα 53. Ρεύματα εισόδου μετασχηματιστή ξηράς, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – αρνητικό πλήγμα. ....	98
Εικόνα 54. Ρεύματα εισόδου μετασχηματιστή ξηράς με κοινή αρχή, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – αρνητικό πλήγμα.. ....	99
Εικόνα 55. Τάσεις εισόδου μετασχηματιστή ξηράς, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – αρνητικό πλήγμα. ....	99
Εικόνα 56. Ρεύματα εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – αρνητικό πλήγμα. ....	100

Εικόνα 57. Τάσεις εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – αρνητικό πλήγμα. ....	100
Εικόνα 58. Τάσεις εξόδου ανορθωτή, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – αρνητικό πλήγμα. ....	101
Εικόνα 59. Ρεύματα εξόδου ανορθωτή στον θετικό ακροδέκτη, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – αρνητικό πλήγμα. ....	101
Εικόνα 60. Ρεύματα εξόδου ανορθωτή στον αρνητικό ακροδέκτη, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – αρνητικό πλήγμα. ....	102
Εικόνα 61. Ρεύματα εισόδου καλωδίου σύνδεσης, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – αρνητικό πλήγμα. ....	102
Εικόνα 62. Τάσεις εισόδου καλωδίου σύνδεσης, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – αρνητικό πλήγμα. ....	103
Εικόνα 63. Ρεύματα εξόδου μετασχηματιστή πλοίου, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – αρνητικό πλήγμα. ....	103
Εικόνα 64. Τάσεις εξόδου μετασχηματιστή πλοίου, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – αρνητικό πλήγμα. ....	104
Εικόνα 65. Ρεύματα εισόδου μετασχηματιστή ξηράς, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – θετικό πλήγμα. ....	104
Εικόνα 66. Ρεύματα εισόδου μετασχηματιστή ξηράς με κοινή αρχή, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – θετικό πλήγμα. ....	105
Εικόνα 67. Τάσεις εισόδου μετασχηματιστή ξηράς, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – θετικό πλήγμα. ....	105
Εικόνα 68. Ρεύματα εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – θετικό πλήγμα. ....	106
Εικόνα 69. Τάσεις εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – θετικό πλήγμα. ....	106
Εικόνα 70. Τάσεις εξόδου ανορθωτή, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – θετικό πλήγμα. ....	107
Εικόνα 71. Ρεύματα εξόδου ανορθωτή στον θετικό ακροδέκτη, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – θετικό πλήγμα. ....	107
Εικόνα 72. Ρεύματα εξόδου ανορθωτή στον αρνητικό ακροδέκτη, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – θετικό πλήγμα. ....	108
Εικόνα 73. Ρεύματα εισόδου καλωδίου σύνδεσης, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – θετικό πλήγμα. ....	108
Εικόνα 74. Τάσεις εισόδου καλωδίου σύνδεσης, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – θετικό πλήγμα. ....	109
Εικόνα 75. Ρεύματα εξόδου μετασχηματιστή πλοίου, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – θετικό πλήγμα. ....	109
Εικόνα 76. Τάσεις εξόδου μετασχηματιστή πλοίου, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – θετικό πλήγμα. ....	110
Εικόνα 77. Ρεύματα εισόδου μετασχηματιστή ξηράς, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – επακόλουθο πλήγμα. ....	110
Εικόνα 78. Ρεύματα εισόδου μετασχηματιστή ξηράς με κοινή αρχή, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – επακόλουθο πλήγμα. ....	111
Εικόνα 79. . Τάσεις εισόδου μετασχηματιστή ξηράς, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – επακόλουθο πλήγμα. ....	111

Εικόνα 80. Ρεύματα εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – επακόλουθο πλήγμα. ....	112
Εικόνα 81. Τάσεις εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – επακόλουθο πλήγμα. ....	112
Εικόνα 82. Τάσεις εξόδου ανορθωτή, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – επακόλουθο πλήγμα. ....	113
Εικόνα 83. Ρεύματα εξόδου ανορθωτή στον θετικό ακροδέκτη, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – επακόλουθο πλήγμα. ....	113
Εικόνα 84. Ρεύματα εξόδου ανορθωτή στον αρνητικό ακροδέκτη, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – επακόλουθο πλήγμα. ....	114
Εικόνα 85. Ρεύματα εισόδου καλωδίου σύνδεσης, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – επακόλουθο πλήγμα. ....	114
Εικόνα 86. Τάσεις εισόδου καλωδίου σύνδεσης, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – επακόλουθο πλήγμα. ....	115
Εικόνα 87. Ρεύματα εξόδου μετασχηματιστή πλοίου, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – επακόλουθο πλήγμα. ....	115
Εικόνα 88. Τάσεις εξόδου μετασχηματιστή πλοίου, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – επακόλουθο πλήγμα. ....	116
Εικόνα 89. Σημεία κεραυνικών πληγμάτων και μετρήσεων. ....	117
Εικόνα 90. Πρώτη περίπτωση τρόπου τοποθέτησης στοιχείων προστασίας στη διάταξη. ....	138
Εικόνα 91. Δεύτερη περίπτωση τρόπου τοποθέτησης στοιχείων προστασίας στη διάταξη. ....	138
Εικόνα 92. Τρίτη περίπτωση τρόπου τοποθέτησης στοιχείου προστασίας στη διάταξη. ....	139
Εικόνα 93. Ρεύμα εισόδου μετασχηματιστή ξηράς, για την πρώτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I. ....	140
Εικόνα 94. Τάση εισόδου μετασχηματιστή ξηράς, για την πρώτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I. ....	140
Εικόνα 95. Ρεύμα εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, για την πρώτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I. ....	141
Εικόνα 96. Τάση εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, για την πρώτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I. ....	141
Εικόνα 97. Τάση εξόδου ανορθωτή, για την πρώτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I. ....	142
Εικόνα 98. Ρεύμα εξόδου ανορθωτή στον θετικό ακροδέκτη, για την πρώτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I. ....	142
Εικόνα 99. Ρεύμα εξόδου ανορθωτή στον αρνητικό ακροδέκτη, για την πρώτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I. ....	143
Εικόνα 100. Ρεύμα εισόδου καλωδίου, για την πρώτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I. ....	143
Εικόνα 101. Τάση εισόδου καλωδίου, για την πρώτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I. ....	144
Εικόνα 102. Ρεύμα εξόδου μετασχηματιστή πλοίου, για την πρώτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I. ....	144
Εικόνα 103. Τάση εξόδου μετασχηματιστή πλοίου, για την πρώτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I. ....	145
Εικόνα 104. Ρεύμα εισόδου μετασχηματιστή ξηράς, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I. ....	146





Εικόνα 128. Ρεύμα εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για θετικό κεραυνό LPL-I.....	167
Εικόνα 129. Τάση εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για θετικό κεραυνό LPL-I.....	167
Εικόνα 130. Τάση εξόδου ανορθωτή, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για θετικό κεραυνό LPL-I.....	168
Εικόνα 131. Ρεύμα εξόδου ανορθωτή στον θετικό ακροδέκτη, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για θετικό κεραυνό LPL-I.....	168
Εικόνα 132. Ρεύμα εξόδου ανορθωτή στον αρνητικό ακροδέκτη, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για θετικό κεραυνό LPL-I.....	169
Εικόνα 133. Ρεύμα εισόδου καλωδίου, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για θετικό κεραυνό LPL-I.....	169
Εικόνα 134. Τάση εισόδου καλωδίου, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για θετικό κεραυνό LPL-I.....	170
Εικόνα 135. Ρεύμα εξόδου μετασχηματιστή πλοίου, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για θετικό κεραυνό LPL-I.....	170
Εικόνα 136. Τάση εξόδου μετασχηματιστή πλοίου, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για θετικό κεραυνό LPL-I.....	171
Εικόνα 137. Ρεύμα εισόδου μετασχηματιστή ξηράς, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό επακόλουθο κεραυνό LPL-I.....	172
Εικόνα 138. Τάση εισόδου μετασχηματιστή ξηράς, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό επακόλουθο κεραυνό LPL-I.....	172
Εικόνα 139. Ρεύμα εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό επακόλουθο κεραυνό LPL-I.....	173
Εικόνα 140. Τάση εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό επακόλουθο κεραυνό LPL-I.....	173
Εικόνα 141. Τάση εξόδου ανορθωτή, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό επακόλουθο κεραυνό LPL-I.....	174
Εικόνα 142. Ρεύμα εξόδου ανορθωτή στον θετικό ακροδέκτη, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό επακόλουθο κεραυνό LPL-I.....	174
Εικόνα 143. Ρεύμα εξόδου ανορθωτή στον αρνητικό ακροδέκτη, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό επακόλουθο κεραυνό LPL-I.....	175
Εικόνα 144. Ρεύμα εισόδου καλωδίου, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό επακόλουθο κεραυνό LPL-I.....	175
Εικόνα 145. Τάση εισόδου καλωδίου, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό επακόλουθο κεραυνό LPL-I.....	176
Εικόνα 146. Ρεύμα εξόδου μετασχηματιστή πλοίου, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό επακόλουθο κεραυνό LPL-I.....	176
Εικόνα 147. Τάση εισόδου μετασχηματιστή πλοίου, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό επακόλουθο κεραυνό LPL-I.....	177
Εικόνα 148. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ρεύματος στη φάση Α της γραμμής μεταφοράς του συστήματος ακτής, πριν τη σύνδεση surge arrester, συμπεριλαμβάνοντας και τα τρία είδη κεραυνικού πλήγματος (αρνητικού, θετικού και επακόλουθου). ....	178
Εικόνα 149. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ρεύματος εισόδου surge arrester μετασχηματιστή ξηράς, στη φάση Α, για τα τρία είδη κεραυνικού πλήγματος (αρνητικού, θετικού και επακόλουθου).....	179
Εικόνα 150. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ρεύματος εξόδου surge arrester μετασχηματιστή ξηράς, στη φάση Α, για τα τρία είδη κεραυνικού πλήγματος (αρνητικού, θετικού και επακόλουθου).....	179

Εικόνα 151. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ρεύματος εισόδου στη φάση Α της γραμμής μεταφοράς του μετασχηματιστή πλοίου, πριν τη σύνδεση surge arrester, συμπεριλαμβάνοντας και τα τρία είδη κεραυνικού πλήγματος (αρνητικού, θετικού και επακόλουθου). .....	180
Εικόνα 152. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ρεύματος εισόδου surge arrester μετασχηματιστή πλοίου, στη φάση Α, για τα τρία είδη κεραυνικού πλήγματος (αρνητικού, θετικού και επακόλουθου). .....	180
Εικόνα 153. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ρεύματος εξόδου surge arrester μετασχηματιστή πλοίου, στη φάση Α, για τα τρία είδη κεραυνικού πλήγματος (αρνητικού, θετικού και επακόλουθου). .....	181
Εικόνα 154. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ρεύματος εισόδου στη φάση Β της γραμμής μεταφοράς του μετασχηματιστή πλοίου, πριν τη σύνδεση surge arrester, συμπεριλαμβάνοντας και τα τρία είδη κεραυνικού πλήγματος (αρνητικού, θετικού και επακόλουθου). .....	181
Εικόνα 155. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ρεύματος εισόδου surge arrester μετασχηματιστή πλοίου, στη φάση Β, για τα τρία είδη κεραυνικού πλήγματος (αρνητικού, θετικού και επακόλουθου). .....	182
Εικόνα 156. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ρεύματος εξόδου surge arrester μετασχηματιστή πλοίου, στη φάση Β, για τα τρία είδη κεραυνικού πλήγματος (αρνητικού, θετικού και επακόλουθου). .....	182
Εικόνα 157. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ρεύματος εισόδου στη φάση Γ της γραμμής μεταφοράς του μετασχηματιστή πλοίου, πριν τη σύνδεση surge arrester, συμπεριλαμβάνοντας και τα τρία είδη κεραυνικού πλήγματος (αρνητικού, θετικού και επακόλουθου). .....	183
Εικόνα 158. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ρεύματος εισόδου surge arrester μετασχηματιστή πλοίου, στη φάση Γ, για τα τρία είδη κεραυνικού πλήγματος (αρνητικού, θετικού και επακόλουθου). .....	183
Εικόνα 159. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ρεύματος εξόδου surge arrester μετασχηματιστή πλοίου, στη φάση Γ, για τα τρία είδη κεραυνικού πλήγματος (αρνητικού, θετικού και επακόλουθου). .....	184

## ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Λίστα με τα λιμάνια και εγκαταστάσεις cold-ironing [11].....	24
Πίνακας 2. Περιγραφή της σύστασης 2006/339/EC.....	37
Πίνακας 3. Απαιτήσεις σε ενεργό ισχύ για διαφορετικούς τύπους πλοίων.....	51
Πίνακας 4. Απαιτήσεις τάσης για διαφορετικούς τύπους πλοίων.....	52
Πίνακας 5. Απαιτήσεις συχνότητας για διαφορετικούς τύπους πλοίων.....	52
Πίνακας 6. Υπολογισμένες κατανομές ρεύματος, βάσει εξισώσεων IEEE. ....	65
Πίνακας 7. Μέγιστα μετρούμενα ρεύματα κεραυνού. ....	69
Πίνακας 8. Μέγιστοι μετρούμενοι χρόνοι μετώπου. ....	69
Πίνακας 9. Μέγιστοι μετρούμενοι χρόνοι ημίσεος εύρους.....	69
Πίνακας 10. Μέγιστες μετρούμενες απότομες κλίσεις ρεύματος. ....	69
Πίνακας 11. Μέγιστοι μετρούμενοι χρόνοι συνολικής διάρκειας κεραυνών.....	70
Πίνακας 12. Μέγιστα μετρούμενα φορτία κεραυνού. ....	70
Πίνακας 13. Μέγιστες τιμές ολοκληρώματος του τετραγώνου του ρεύματος ως προς τον χρόνο. ....	70
Πίνακας 14. Παράμετροι κεραυνού, για διαφορετικά LPL [66].....	71
Πίνακας 15. Πίνακας ονομαστικών δεδομένων των στοιχείων προστασίας, από το φυλλάδιο στοιχείων της ABB [69]. ....	80
Πίνακας 16. Χαρακτηριστικές τιμές p.u. για τα μη γραμμικά στοιχεία των surge arrester [67]. ....	81
Πίνακας 17. Υπολογισμένες τιμές μη γραμμικών στοιχείων surge arrester, ονομαστική τιμή 5kV. ....	82
Πίνακας 18. Υπολογισμένες τιμές μη γραμμικών στοιχείων surge arrester, ονομαστικής τιμής 12.5kV... 83	
Πίνακας 19. Μέγιστες ενεργές τιμές των μεγεθών τάσης και ρεύματος των διαγραμμάτων μόνιμης κατάστασης.....	97
Πίνακας 20. Επεξήγηση σημείων μετρήσεων της εικόνας 53. ....	98
Πίνακας 21. Απόλυτες τιμές των μέγιστων ρευμάτων και τάσεων στις διάφορες γωνίες του εφαρμοζόμενου κεραυνικού πλήγματος.....	116
Πίνακας 22. Σημεία μέτρησης διάταξης χωρίς προστασία. ....	118
Πίνακας 23. Μετρήσεις μέγιστων τιμών πολικών τάσεων και ρευμάτων, στη χωρίς προστασία διάταξη, πληγμένη από κεραυνό αρνητικό στην είσοδο της φάσης A του μετασχηματιστή ξηράς, LPL-I. ....	119
Πίνακας 24. Μετρήσεις μέγιστων τιμών πολικών τάσεων και ρευμάτων, στη χωρίς προστασία διάταξη, πληγμένη από κεραυνό θετικό στην είσοδο της φάσης A του μετασχηματιστή ξηράς, LPL-I.....	120
Πίνακας 25. Μετρήσεις μέγιστων τιμών πολικών τάσεων και ρευμάτων, στη χωρίς προστασία διάταξη, πληγμένη από αρνητικό επακόλουθο κεραυνό στην είσοδο της φάσης A του μετασχηματιστή ξηράς, LPL-I. ....	122
Πίνακας 26. Μετρήσεις μέγιστων τιμών πολικών τάσεων και ρευμάτων, στη χωρίς προστασία διάταξη, πληγμένη από κεραυνό αρνητικό στην είσοδο της φάσης A του μετασχηματιστή ξηράς, LPL-II. ....	123
Πίνακας 27. Μετρήσεις μέγιστων τιμών πολικών τάσεων και ρευμάτων, στη χωρίς προστασία διάταξη, πληγμένη από κεραυνό θετικό στην είσοδο της φάσης A του μετασχηματιστή ξηράς, LPL-II.....	125
Πίνακας 28. Μετρήσεις μέγιστων τιμών πολικών τάσεων και ρευμάτων, στη χωρίς προστασία διάταξη, πληγμένη από αρνητικό επακόλουθο κεραυνό στην είσοδο της φάσης A του μετασχηματιστή ξηράς, LPL-II.....	127
Πίνακας 29. Μετρήσεις μέγιστων τιμών πολικών τάσεων και ρευμάτων, στη χωρίς προστασία διάταξη, πληγμένη από κεραυνό αρνητικό στην είσοδο της φάσης A του μετασχηματιστή ξηράς, LPL-III.....	128

Πίνακας 30. Μετρήσεις μέγιστων τιμών πολικών τάσεων και ρευμάτων, στη χωρίς προστασία διάταξη, πληγμένη από κεραυνό θετικό στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς, LPL-III. ....	130
Πίνακας 31. Μετρήσεις μέγιστων τιμών πολικών τάσεων και ρευμάτων, στη χωρίς προστασία διάταξη, πληγμένη από αρνητικό επακόλουθο κεραυνό στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς, LPL-III. ....	132
Πίνακας 32. Μετρήσεις μέγιστων τιμών πολικών τάσεων και ρευμάτων, στη χωρίς προστασία διάταξη, πληγμένη από κεραυνό αρνητικό στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς, LPL-I.....	134
Πίνακας 33. Μέγιστες τιμές ρευμάτων και πολικών τάσεων, για περίπτωση κεραυνικού πλήγματος αρνητικού κεραυνού LPL-I, στην είσοδο του μετασχηματιστή ξηράς, για τις τρεις περιπτώσεις προστασίας έναντι των υπερτάσεων και την περίπτωση χωρίς προστασία. ....	158
Πίνακας 34. Μέγιστες τιμές ρευμάτων και πολικών τάσεων, για περίπτωση κεραυνικού πλήγματος αρνητικού κεραυνού LPL-I, στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς, για τις τρεις περιπτώσεις προστασίας έναντι των υπερτάσεων και την περίπτωση χωρίς προστασία.....	161
Πίνακας 35. Αρνητικό κεραυνικό πλήγμα LPL-I, στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.....	185
Πίνακας 36. Αρνητικό κεραυνικό πλήγμα LPL-II, στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.....	187
Πίνακας 37. Αρνητικό κεραυνικό πλήγμα LPL-III, στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.....	189
Πίνακας 38. Θετικό κεραυνικό πλήγμα LPL-I, στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.....	191
Πίνακας 39. Θετικό κεραυνικό πλήγμα LPL-II, στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.....	194
Πίνακας 40. Θετικό κεραυνικό πλήγμα LPL-III, στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.....	196
Πίνακας 41. Αρνητικό επακόλουθο κεραυνικό πλήγμα LPL-I, στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης. ....	198
Πίνακας 42. Αρνητικό επακόλουθο κεραυνικό πλήγμα LPL-II, στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης. ....	200
Πίνακας 43. Αρνητικό επακόλουθο κεραυνικό πλήγμα LPL-III, στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης. ....	203
Πίνακας 44. Αρνητικό κεραυνικό πλήγμα LPL-I, στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.....	205
Πίνακας 45. Αρνητικό κεραυνικό πλήγμα LPL-II, στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.....	207
Πίνακας 46. Αρνητικό κεραυνικό πλήγμα LPL-III, στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.....	210
Πίνακας 47. Θετικό κεραυνικό πλήγμα LPL-I, στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.....	212
Πίνακας 48. Θετικό κεραυνικό πλήγμα LPL-II, στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.....	214
Πίνακας 49. Θετικό κεραυνικό πλήγμα LPL-III, στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.....	216
Πίνακας 50. Αρνητικό επακόλουθο κεραυνικό πλήγμα LPL-I, στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.....	219
Πίνακας 51. Αρνητικό επακόλουθο κεραυνικό πλήγμα LPL-II, στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.....	221

Πίνακας 52. Αρνητικό επακόλουθο κεραυνικό πλήγμα LPL-III, στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.....	223
--	-----

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία, μελετά την τεχνολογία cold-ironing, η οποία αφορά την ηλεκτρική τροφοδότηση των πλοίων από το δίκτυο της ξηράς, όσο παραμένουν σε θέσεις πρόσδεσης εντός των λιμένων, καθώς αναδεικνύεται ως μία από τις βέλτιστες λύσεις καταπολέμησης της μόλυνσης από τα εκλυόμενα από τις εκπομπές των πλοίων αέρια και ρυπογόνα οξειδία. Η πρακτική του cold-ironing, εισάγει ως ζήτημα την τρωτότητα της διασύνδεσης αυτής στα κεραυνικά πλήγματα και τις υπερτάσεις, όπου ενδέχεται να προκύψουν στο σύστημα. Επομένως, στόχοι διερεύνησης της εργασίας αποτελούν η εις βάθος μελέτη των βασικών παραγόντων που καθιστούν μία διάταξη cold-ironing ευάλωτη σε κεραυνικά χτυπήματα, η ανάπτυξη προσομοιωτικού μοντέλου της εν λόγω διάταξης, ικανού να αναπαράγει τόσο τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας όσο και τις καταπονήσεις εξαιτίας των κεραυνών, αλλά και η πρόταση και αξιολόγηση των λύσεων προστασίας της.

Ειδικότερα, τα κεφάλαια που διαρθρώνουν την εργασία είναι τα εξής:

**Κεφάλαιο 1:** Εισαγωγή

**Κεφάλαιο 2:** Το κεφάλαιο αυτό εισάγει τις βασικές έννοιες της τεχνολογίας cold-ironing, τις περιβαλλοντικές προκλήσεις και τα κύρια πλεονεκτήματά της.

**Κεφάλαιο 3:** Στο κεφάλαιο αυτό, χαρτογραφείται το διεθνές και ευρωπαϊκό κανονιστικό πλαίσιο που διέπει τη διασύνδεση πλοίων με το δίκτυο της ξηράς.

**Κεφάλαιο 4:** Στο κεφάλαιο αυτό, πραγματοποιείται η αναλυτική περιγραφή της υπό μελέτης τοπολογίας, και η διαδικασία μοντελοποίησης στο λογισμικό ATP-EMTP.

**Κεφάλαιο 5:** Το κεφάλαιο αυτό, εμβαθύνει σε θεωρητικά και τεχνικά ζητήματα προστασίας έναντι των κεραυνών και υπερτάσεων, παρουσιάζοντας τα διατιθέμενα μέσα προστασίας.

**Κεφάλαιο 6:** Στο κεφάλαιο αυτό, παρατίθενται και αναλύονται εκτενώς τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, ενώ ακόμη συγκρίνονται οι εναλλακτικές διατάξεις προστασίας έναντι των υπερτάσεων, με σκοπό την εύρεση της πιο βέλτιστης.

**Κεφάλαιο 7:** Το κεφάλαιο αυτό, συνοψίζει τα ευρήματα και αξιολογεί τη συνεισφορά της εργασίας, προτείνοντας κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

**Κεφάλαιο 8:** Βιβλιογραφία της Διπλωματικής εργασίας

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

### 2.1 Ορισμός cold-ironing

Ο όρος cold-ironing, προέρχεται από την εποχή όπου τα πλοία, τα οποία ήταν εξοπλισμένα με γεννήτριες ατμού, ελλιμενίζονταν για ανάγκες επισκευής. Κατά τη διάρκεια αυτών των επισκευών, τόσο οι σωλήνες όσο και ο χάλυβας του λέβητα της ατμογεννήτριας, βρίσκονταν σε χαμηλή θερμοκρασία, οπότε και προέκυψε η ονομασία του cold-ironing [1]. Παρόλα αυτά, σήμερα, η χρήση του όρου cold-ironing χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη μέθοδο κατά την οποία τα πλοία, όταν ελλιμενίζονται, συνδέονται στο δίκτυο τροφοδοσίας ισχύος της ξηράς, ενώ παράλληλα οι βασικές και εφεδρικές μηχανές του πλοίου τίθενται εκτός λειτουργίας, εφαρμόζοντας μία ειδική διαδικασία, η οποία και θα αναλυθεί εκτενώς στο Κεφάλαιο 4.7. Συνώνυμα του όρου cold-ironing αποτελούν οι ονομασίες shore connection, shore-to-ship power (SSP) και alternative maritime power (AMP) [1].

### 2.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Είναι γεγονός ότι τόσο ο άνθρωπος όσο και το περιβάλλον, κοντά και γύρω από παράκτιες περιοχές, όπου βρίσκονται εμπορικά και μη λιμάνια, εκτίθενται σε αυξημένη ατμοσφαιρική ρύπανση, η οποία οφείλεται στην έκλυση τοξικών σωματιδίων και διοξειδίου του θείου ( $\text{SO}_2$ ), εξαιτίας των ναυτιλιακών καυσίμων, τα οποία συνήθως έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε θείο. Συγκεκριμένα, όσο τα πλοία ελλιμενίζονται, για να ικανοποιηθούν οι διάφορες ενεργειακές ανάγκες εντός του πλοίου, οι κύριες και βοηθητικές μηχανές παραμένουν εν ενεργεία, καταναλώνοντας βαρέα καύσιμα (Heavy Fuel Oil – HFO), γεγονός το οποίο έχει ως αντίκτυπο την απελευθέρωση θεικών οξειδίων και οξείδια του αζώτου, διοξειδίου του άνθρακα και σωματιδίων τύπου  $\text{PM}_{2.5}$  και  $\text{PM}_{10}$  [2].

Το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ) και τα οξείδια του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ), τα οποία όταν αντιδρούν με το νερό, το οξυγόνο και άλλα χημικά στοιχεία που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα, σχηματίζουν θειικά και νιτρικά οξέα, τα οποία αποτελούν βασικά συστατικά της όξινης βροχής, η οποία



αποτελεί απειλή για το οικοσύστημα, είναι τοξική για τον ανθρώπινο οργανισμό, αλλά και υπεύθυνη για τη διάβρωση μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς [3].

Τα σωματίδια τύπου  $PM_{2.5}$  και  $PM_{10}$ , που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα, επιδεινώνουν την ποιότητα του αέρα, και μάλιστα φαίνεται ότι σε συγκεντρώσεις που ξεπερνούν τα  $9\mu g/m^3$  και  $150\mu g/m^3$ , έχουν συνδεθεί με πρόωρους θανάτους εξαιτίας καρδιακών αιτιών και σοβαρών λοιμώξεων του αναπνευστικού συστήματος, αλλά και με ελαφρύτερα χρόνια νοσήματα όπως το άσθμα και η χρόνια βρογχίτιδα. Αυτές οι ασθένειες συναντώνται ιδιαίτερα σε πληθυσμούς που κατοικούν σε παράκτιες περιοχές και βρίσκονται εκτεθειμένοι σε αυτά τα αιωρούμενα σωματίδια [4].

Τέλος, η αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα συνδέεται άμεσα με την κλιματική αλλαγή και συγκεκριμένα το φαινόμενο του θερμοκηπίου και της μη φυσιολογικής αύξησης της θερμοκρασίας της επιφάνειας της γης, ενώ όταν εισπνέεται από τον άνθρωπο σε μεγάλες ποσότητες μπορεί να οδηγήσει σε σωρεία προβλημάτων υγείας που σχετίζονται με το νευρικό και κάρδιο-αναπνευστικό σύστημα [5]. Όλες αυτές οι δηλητηριώδεις εκπομπές, υποβαθμίζουν σημαντικά το βιοτικό επίπεδο των κατοίκων που ζουν και εργάζονται γύρω από ένα τέτοιο περιβάλλον, ενώ ακόμη δημιουργούν ιδιαίτερη ανησυχία όσον αφορά την κλιματική αλλαγή και την καταστροφή του οικοσυστήματος.

### 2.3 Πρότυπα και οργανισμοί για την καταπολέμηση ρύπων στη ναυτιλία

Για τους παραπάνω λόγους, η ατμοσφαιρική ρύπανση από τα καύσιμα των πλοίων, έχει αποτελέσει θέμα παγκοσμίου ενδιαφέροντος, ειδικότερα τις τελευταίες δεκαετίες, γιατί οι εκπομπές των καυσαερίων από τα πλοία συμβάλλουν στο 18-30% της συνολικής μόλυνσης από οξείδια του αζώτου και 9% της μόλυνσης από θειικά οξείδια [5].

Υπό την αιγίδα του Διεθνούς Οργανισμού Ναυσιπλοΐας, το παράρτημα VI (Annex VI) της Διεθνούς Σύμβασης για την Πρόληψη της Ρύπανσης από τα Πλοία – MARPOL, στοχεύει στην ελάττωση των  $NO_x$ ,  $SO_x$  και σωματιδιακών εκπομπών προερχόμενων από τα θαλάσσια σκάφη, με μερικούς από τους κανονισμούς να αφορούν τις εκπομπές  $NO_x$  (Κανονισμός 13),  $SO_x$  και αιωρούμενων σωματιδίων PM (Κανονισμός 14), καθώς και των έλεγχου της ποσότητας και της ποιότητας του θείου στα καύσιμα (Κανονισμός 18) [6].

Επιπλέον, το Annex VI εισήγαγε την έννοια των Ειδικών Ζωνών Ελέγχου Εκπομπών (ECAs), όπου ισχύουν πιο αυστηρά πρότυπα για τις εκπομπές SO<sub>x</sub> και NO<sub>x</sub>. Όσον αφορά τις εκπομπές NO<sub>x</sub>, εφαρμόζονται τρία επίπεδα συμμόρφωσης (Tier I, II, III), με το τελευταίο να απαιτεί μείωση αυτών των εκπομπών έως και 80%, σε σχέση με το Tier I. Παράλληλα, πρέπει να ισχύει για πλοία που λειτουργούν εντός ECAs μετά την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2016 [7]. Ακόμη, από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2020, τέθηκε σε εφαρμογή το παγκόσμιο όριο 0.5% θείου στα ναυτιλιακά καύσιμα, σύμφωνα με τον Κανονισμό 14 του Annex VI [8]. Το μέτρο αυτό αποσκοπεί στον περιορισμό της έκλυσης SO<sub>x</sub>, προστατεύοντας, έτσι, το περιβάλλον και κατ' επέκταση τη δημόσια υγεία.

## 2.4 Πλεονεκτήματα cold-ironing

Η τεχνολογία cold-ironing, αποτελεί μία από τις πλέον αποτελεσματικές, βιώσιμες και τεχνικά ώριμες λύσεις για την παροχή ενέργειας σε ελλιμενισμένα πλοία, μέσω της σύνδεσής τους με το ηλεκτρικό δίκτυο της ξηράς. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την πλήρη απενεργοποίηση των κύριων και βοηθητικών μηχανών του πλοίου κατά τη διάρκεια παραμονής του στο λιμάνι, συμβάλλοντας με αυτό τον τρόπο καθοριστικά στην περιβαλλοντική προστασία, την εξοικονόμηση πόρων και την αειφόρο λειτουργία των λιμένων. Η μέθοδος cold-ironing αποτελεί μία σύγχρονη και ιδιαίτερα αποτελεσματική λύση, για την αντιμετώπιση της περιβαλλοντικής μόλυνσης εξαιτίας των ρυπογόνων καυσαερίων των πλοίων, ενώ ταυτόχρονα συνεπικουρεί στη συμμόρφωση με τους κανόνες που έχουν θεσπιστεί από φορείς και οργανισμούς, οι οποίοι έχουν, ως ένα από τα κύρια μελήματά τους, την ελάττωση των τοξικών εκπομπών αερίων [9].

Επομένως, ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της εφαρμογής του cold-ironing, είναι η δραστική μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, εφόσον τα πλοία από τη στιγμή που συνδέονται με το δίκτυο ισχύος της ξηράς, παύουν να χρησιμοποιούν τις μηχανές τους. Συνεπώς, η χρήση αυτής της τεχνολογίας οδηγεί στον σχεδόν μηδενισμό των δηλητηριωδών εκπομπών αερίων κατά τον ελλιμενισμό, πόσο μάλλον όταν η ενέργεια της ξηράς παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Έτσι, η ποιότητα του αέρα στις παράκτιες περιοχές βελτιώνεται σημαντικά, καταπολεμώντας την προκαλούμενη από τους ρύπους βλάβη στη δημόσια υγεία και το περιβάλλον.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα πλοία, εκτός από την ατμοσφαιρική μόλυνση, είναι συχνά πηγές ηχορύπανσης, λόγω της αδιάκοπης λειτουργίας των μηχανών τους, επηρεάζοντας άμεσα τους εργαζόμενους στα λιμάνια και τους κατοίκους των παρακείμενων περιοχών. Με την τροφοδοσία

των πλοίων από το δίκτυο της ξηράς, μειώνονται αισθητά τα επίπεδα ηχορύπανσης, δημιουργώντας έτσι ένα πιο βιώσιμο και ήσυχο περιβάλλον, για τους ανθρώπους που ζουν και εργάζονται στην ευρύτερη περιοχή.

Ακόμη, αν και το κόστος εγκατάστασης υποδομών cold-ironing θεωρείται υψηλό, τα οικονομικά οφέλη σε βάθος χρόνου είναι αδιαμφισβήτητα σημαντικά. Συγκεκριμένα, οι λιμένες οι οποίοι επενδύουν σε τέτοια συστήματα, γίνονται πιο ανταγωνιστικοί και ελκυστικοί σε ναυτιλιακές εταιρείες οι οποίες επιδιώκουν την περιβαλλοντική συμμόρφωση που ορίζουν οι διεθνείς οργανισμοί. Μακροπρόθεσμα, το κόστος από τη συντήρηση των μηχανών δύναται να μειωθεί σημαντικά, αφού κατά τον ελλιμενισμό δεν τίθενται σε λειτουργία, μειώνοντας τις ώρες λειτουργίας τους, ενώ ταυτόχρονα σημειώνεται και μείωση στην κατανάλωση καυσίμων. Από τεχνικής πλευράς, η τεχνολογία cold-ironing, δεν απαιτεί περίπλοκο εξοπλισμό, ενώ η διαδικασία διασύνδεσης πλοίου με το δίκτυο ισχύος της ξηράς, διαρκεί μόλις 30-60 λεπτά. Τέλος, ήδη πολλά νέα πλοία κατασκευάζονται με προεγκατεστημένα συστήματα για να υποστηρίξουν το cold-ironing, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι και τα παλαιότερα πλωτά δεν δύνανται να αναβαθμιστούν, πράγμα το οποίο μπορεί να γίνει με σχετικά χαμηλό κόστος [10].

Εν κατακλείδι, η τεχνολογία του AMP, υπερτερεί σε σχέση με άλλες τεχνικές τροφοδοσίας πλοίων, διότι είναι μία δοκιμασμένη τεχνολογία και οικονομικά αποδοτική σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα, ενώ δεν παύει να είναι και τεχνικά εφικτή και σε έργα μεγάλης κλίμακας. Η εμπειρία του Πολεμικού Ναυτικού των Η.Π.Α. που χρησιμοποιεί τη μέθοδο αυτή εδώ και δεκαετίες για πλοία εν όρμω, είναι ένα δείγμα της λειτουργικότητας και της βιωσιμότητας αυτής της τεχνολογίας. Σήμερα, το cold-ironing θεωρείται βασική επιλογή για τον έλεγχο των εκπομπών (Emission Control Option – ECO), για τα σύγχρονα λιμάνια που επιδιώκουν την ουσιαστική μείωση του περιβαλλοντικού τους αποτυπώματος [10].

## 2.5 Εγκαταστάσεις cold-ironing ανά τον κόσμο

Η εφαρμογή του cold-ironing, εντοπίζεται σε πολλά λιμάνια παγκοσμίως, με την πλειοψηφία αυτών να βρίσκονται στις χώρες της Βόρειας Ευρώπης και των Ανατολικών ακτών των Ηνωμένων Πολιτειών, γεγονός που συμβαίνει εξαιτίας της αυστηρής εγχώριας νομοθεσίας, αλλά και την περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση τόσο των εταιρειών όσο και των πολιτών αυτών των χωρών. Σε πολλές από αυτές τις περιπτώσεις, τα έργα των εγκαταστάσεων χρηματοδοτούνται από κρατικούς

και ευρωπαϊκούς φορείς, επειδή αποσκοπούν στην άνθιση της εθνικής οικονομικής ανάπτυξης και κατ' επέκταση την αύξηση του βιοτικού επιπέδου της εκάστοτε χώρας.

Πίνακας 1. Λίστα με τα λιμάνια και εγκαταστάσεις cold-ironing [11]

Έτος εισαγωγής	Λιμάνι	Χώρα	Χωρητικότητα (MW)	Συχνότητα (Hz)	Τάση (kV)	Τύπος πλοίου χρήσει OPS
2015	Αμβούργο	Γερμανία	12	50/60	6.6/11	Κρουαζιερόπλοια
2013	Τρέλλεμποργκ	Σουηδία	3.5 – 4.6	50	11	RoPax
2012	Υστάδ	Σουηδία	6.25	50/60	11	RoPax
2012	Ρότερνταμ	Ολλανδία	2.7	60	11	RoPax
2011	Πρίγκιπας Ρούπερτ	Καναδάς	7.5	60	6.6	Φορτηγά
2011	Όσλο	Νορβηγία	4.5	50	11	Κρουαζιερόπλοια
2011	Λόνγκ Μπιτς	Η.Π.Α.	16	60	6.6/11	Μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων
2010	Κάρλσκρουνα	Σουηδία	2.5	50	11	RoPax
2010	Σαν Φρανσίσκο	Η.Π.Α.	16	60	6.6/11	Κρουαζιερόπλοια
2010	Σαν Ντιάγκο	Η.Π.Α.	16	60	6.6/11	Κρουαζιερόπλοια
2009	Βανκούβερ	Καναδάς	16	60	6.6/11	RoPax
2008	Λύμπεκ	Γερμανία	2.2	50	6	RoPax
2008	Αμβέρσα	Βέλγιο	0.8	50/60	6.6	Μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων
2008	Όουλου	Φινλανδία	1.2	50	6.6	RoPax
2006	Κότκα	Φινλανδία	1.0	50	6.6	RoPax
2006	Κέμι	Φινλανδία	1.0	50	6.6	RoPax
2005-2006	Σιάτλ	Η.Π.Α.	12.8	60	6.6/11	Κρουαζιερόπλοια
2004	Πιτέο	Σουηδία	1.0	50	6	RoRo
2004	Λος Άντζελες	Η.Π.Α.	7.5 – 60	60	6.6/11	Μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, Κρουαζιερόπλοια

2001	Τζούνιο	Η.Π.Α.	7 – 9	60	6.6/11	Κρουαζιερόπλοια
2000	Ζεμπρούγκ	Βέλγιο	1.25	50	6.6	RoRo
2000-2010	Γκέτεμποργκ	Σουηδία	1.25 – 2.5	50/60	6.6/11	RoRo, RoPax

Στην Ευρώπη, υπήρχαν δύο έργα τα οποία δραστηριοποιούνταν στην ηλεκτροδότηση των λιμανιών. Το ELEMED (Electrification of the Eastern Mediterranean area), ήταν ένα ευρωπαϊκό έργο το οποίο ήταν εν ενεργεία από τον Απρίλιο του 2016 έως τον Μάρτιο του 2018, και είχε ως στόχο την προώθηση της ηλεκτροδότησης των πλοίων και των λιμανιών στην Ανατολική Μεσόγειο, μέσω της τεχνολογίας cold-ironing και της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας ως εναλλακτικής πρόωσης [12].

Το έργο αυτό, αποσκοπούσε στην αξιολόγηση και την προετοιμασία της υλοποίησης υποδομών cold-ironing σε δύο ελληνικά λιμάνια (Πειραιάς, Κυλλήνη), ένα λιμάνι της Κύπρου (Λεμεσού) και ένα λιμάνι της Σλοβενίας (Κόπερ). Στα πλαίσια αυτού, πραγματοποιήθηκε πιλοτική εγκατάσταση cold-ironing στο λιμάνι της Κυλλήνης, καθιστώντας το, το πρώτο λιμάνι στην Ανατολική Μεσόγειο με λειτουργική υποδομή ηλεκτροδότησης πλοίων από την ξηρά.

Επιπρόσθετα, το EALING (European flagship Action for cold ironing in ports) ήταν ένα ακόμη ευρωπαϊκό έργο, το οποίο ξεκίνησε τον Ιούνιο του 2020 και ολοκληρώθηκε τον Δεκέμβριο του 2023, με συνολική διάρκεια 42 μηνών. Στόχος του ήταν η επιτάχυνση της υιοθέτησης υποδομών Onshore Power Supply – OPS, γνωστών και ως cold-ironing, σε τουλάχιστον 16 λιμάνια της ΕΕ, προκειμένου να ελαττωθούν οι εκπομπές ρύπων από τα πλοία κατά τον ελλιμενισμό τους [13]. Το EALING αποσκοπούσε στη δημιουργία ενός εναρμονισμένου και λειτουργικού πλαισίου, για την ηλεκτροδότηση των πλοίων στα λιμάνια της ΕΕ, πραγματοποιώντας τεχνικές μελέτες για σχεδιασμό υποδομών OPS και αναλύσεις ενεργειακών απαιτήσεων και σχεδίων «καθαρής» ενέργειας, σε συνδυασμό με οικονομικές αξιολογήσεις και προτάσεων για την εναρμόνιση του νομικού πλαισίου σε ευρωπαϊκό επίπεδο [14].

Τα 16 συμμετέχοντα στο έργο λιμάνια, προέρχονται από 9 ευρωπαϊκές χώρες, μεταξύ των οποίων είναι:

- Ελλάδα: Πειραιάς και Ραφήνα
- Ισπανία: Βαλένθια, Βαρκελώνη, Ουέλβα και Χιχόν

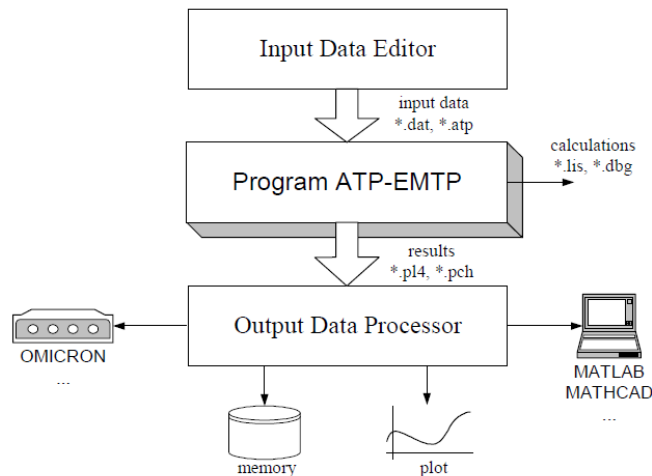
- Ιταλία: Βενετία και Τσίογκια, Ανκόνα, Τεργέστη και Μονφαλκόνε
- Πορτογαλία: Λέιξος και Αζόρες
- Βουλγαρία: Βάρνα και Μπουργκάς
- Ρουμανία: Κωνσταντζα
- Σλοβενία: Κόπερ
- Ιρλανδία: Κόρκ

## 2.1 Πρόγραμμα ATP-EMTP και ο Προ-επεξεργαστής ATPDraw

Το πρόγραμμα ATP-EMTP (Alternative Transients Program – Electromagnetic Transients Program) είναι πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα και είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα προγράμματα που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας σε μόνιμη κατάσταση και ηλεκτρομαγνητικά μεταβατικά φαινόμενα. Συγκεκριμένα το πρόγραμμα χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων όπως [15], [16], [17]:

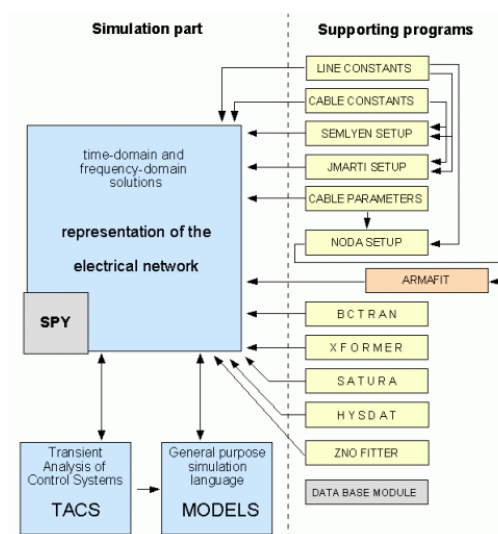
- Προσομοίωση μόνιμης κατάστασης
- Διακοπτικά μεταβατικά φαινόμενα και υπερτάσεις.
- Διαταραχές μικρής διάρκειας.
- Υπολογισμούς υπερεντάσεων.
- Ανάλυση απόδοσης προστασίας.
- Έλεγχος ηλεκτρικών μηχανών.

Το πρόγραμμα λαμβάνει δεδομένα εισόδου από τον χρήστη, τα οποία είναι κατάλληλα επεξεργασμένα και έτσι επιλύει το εκάστοτε πρόβλημα με τη χρήση κατάλληλων αριθμητικών μεθόδων. Για την επίλυση των προβλημάτων έναν μεταφραστή (compiler) με τον οποίο μπορεί να μετατρέψει τα αρχεία εισόδου σε αρχεία εξόδου και αποτελεσμάτων. Το ATP-EMTP είναι ένα ισχυρό εργαλείο για την ανάλυση μεταβατικών φαινομένων, τα οποία είναι δύσκολο να μελετηθούν με απλές μαθηματικές σχέσεις [15], [17]. Στην Εικόνα 1 απεικονίζεται ένα λειτουργικό διάγραμμα του ATP-EMTP.

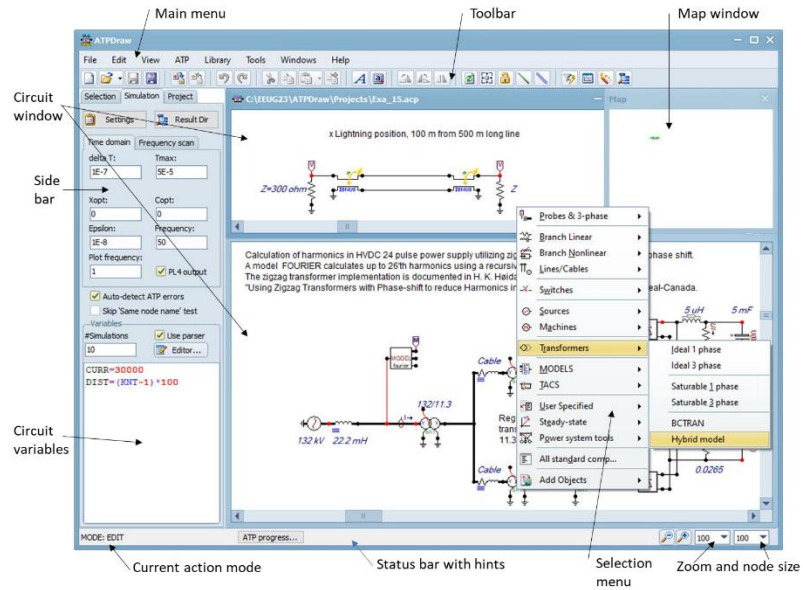


Εικόνα 1. Λειτουργικό διάγραμμα του προγράμματος ATP/EMTP [8].

Το ATPDraw είναι ένας γραφικός προ-επεξεργαστής ο οποίος είναι σχεδιασμένος να λειτουργεί με το ποντίκι του υπολογιστή (mouse – driven graphical pre-processor). Ο γραφικός προ-επεξεργαστής δημιουργεί τα αρχεία εισόδου του ATP-EMTP. Στο πρόγραμμα μπορεί ο χρήστης να κατασκευάσει ένα ψηφιακό μοντέλο του κυκλώματος που επιθυμεί να προσομοιώσει επιλέγοντας προκαθορισμένα στοιχεία (components) από μία εκτενή συλλογή που διατίθεται. Η βασική αρχή στην οποία στηρίζεται η λειτουργία του συνδυασμού ATP-EMTP και ATPDraw είναι το «ό,τι βλέπεις είναι αυτό που θα πάρεις» (“what you see is what you get”) [15], [16], [17]. Στην Εικόνα 3 φαίνονται αναλυτικά όλες οι υποστηριζόμενες ρουτίνες του προγράμματος ATP-EMTP και στην Εικόνα 3 φαίνεται το γραφικό περιβάλλον του προγράμματος ATPDraw.



Εικόνα 2. Υποστηριζόμενες ρουτίνες του προγράμματος ATP [15].



Εικόνα 3. Το γραφικό περιβάλλον του ATPDraw [7].



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΑΙ ΝΟΜΟΘΕΣΙΕΣ ΠΟΥ ΔΙΕΠΟΥΝ ΤΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΤΩΝ ΠΛΟΙΩΝ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΗΣ ΞΗΡΑΣ**

### **3.1 Εισαγωγή**

Η εφαρμογή της διασύνδεσης των πλοίων με το δίκτυο ισχύος της ξηράς, πρέπει να συμμορφώνεται με το νομοθετικό πλαίσιο, το οποίο ορίζεται από διεθνείς και εγχώριους οργανισμούς. Επιπρόσθετα η εγκατάσταση θα πρέπει να ακολουθεί τα σχετικά τεχνικά πρότυπα, τα οποία θέτουν τις ηλεκτρικές απαιτήσεις και τα απαραίτητα μέτρα ασφαλείας.

### **3.2 Διεθνείς Οργανισμοί**

Ένας από τους πιο σημαντικούς οργανισμούς σε διεθνές επίπεδο, είναι ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO), ο οποίος ιδρύθηκε το 1948 από μία διεθνή σύμβαση των Ηνωμένων Εθνών και ήταν αρχικά γνωστός με το όνομα Διακυβερνητικός Ναυτιλιακός Συμβουλευτικός Οργανισμός (IMCO) [18]. Ο IMO πραγματεύεται τη συνεργασία μεταξύ των κυβερνήσεων όσον αφορά κανονισμούς και πρακτικές που αφορούν τεχνικά θέματα της διεθνούς ναυτιλίας, τα οποία επηρεάζουν το διεθνές εμπόριο. Σκοπός του είναι η διευκόλυνση της γενικής εφαρμογής των ανώτατων προτύπων τα οποία σχετίζονται με την ασφάλεια στη θάλασσα, την αποτελεσματικότητα της ναυσιπλοΐας, όπως επίσης την πρόληψη και τον έλεγχο της θαλάσσιας ρύπανσης από τα πλοία [19]. Τέλος, ο IMO είναι εξουσιοδοτημένος να ασχολείται με διοικητικά και νομικά θέματα, τα οποία είναι άμεσα συσχετιζόμενα με τους σκοπούς που προαναφέρθηκαν.

Ακόμη, μέσω της Διεθνούς Διάσκεψης για τη Θαλάσσια Ρύπανση, η οποία συγκλήθηκε από τον IMO τον Νοέμβριο του 1973, εγκρίθηκε η διεθνής σύμβαση για την πρόληψη της ρύπανσης από τα πλοία, γνωστή και ως σύμβαση MARPOL [20]. Οι κανονισμοί της σύμβασης MARPOL, καλύπτουν το ευρύ φάσμα των πηγών ρύπανσης που προέρχεται από τα πλοία, και περιέχονται στα παραρτήματά της (Annexes), όντας έξι στον αριθμό [21].

Παρόλα αυτά, η Επιτροπή Προστασίας του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MEPC), από την ίδρυσή της το 1974, έχει επανεξετάσει ορισμένες διατάξεις της σύμβασης MARPOL, διότι διαπιστώθηκε ότι απαιτούσαν περαιτέρω αποσαφήνιση, ενώ κάποιες άλλες δημιουργούσαν δυσκολίες ως προς την εφαρμογή τους. Σε κάποιες περιπτώσεις, η MEPC αναγνώρισε ότι υπήρχε η ανάγκη τροποποίησης των υφιστάμενων κανονισμών ή ακόμη και την εισαγωγή νέων, με σκοπό τη μείωση της λειτουργικής και τυχαίας ρύπανσης από τα πλοία. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να προκύψουν ενοποιημένες ερμηνείες και τροποποιήσεις στη σύμβαση MARPOL.

Το παράρτημα VI (Annex VI) της σύμβασης MARPOL, το οποίο τέθηκε σε ισχύ το 2005, περιλαμβάνει κανονισμούς, τροποποιήσεις και οδηγίες που επικεντρώνονται στους ρύπους των πλοίων, οι οποίοι έχουν αντίκτυπο στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον, με σκοπό την πρόληψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Συγκεκριμένα, οριοθέτησε τις εκπομπές SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, PM που πηγαίνουν από τα καύσιμα των μηχανών των πλοίων. Το παράρτημα VI της MARPOL, έχει επικυρωθεί από 108 κράτη-μέλη, τα οποία αντιπροσωπεύουν περίπου το 97.3% της παγκόσμιας χωρητικότητας εμπορικού στόλου [22]. Κάθε κράτος-μέλος που έχει επικυρώσει τη σύμβαση, φέρει την πρωταρχική ευθύνη [23] για την εφαρμογή και επιβολή των κανονισμών του παραρτήματος VI στα πλοία που φέρουν τη σημαία του κράτους-μέλους. Δηλαδή, το κράτος-μέλος πρέπει να πιστοποιεί τα πλοία του, να εκδίδει τα απαραίτητα πιστοποιητικά [24] όπως το International Air Pollution Prevention Certificate, να διενεργεί επιθεωρήσεις και να διασφαλίζει ότι τα όρια των εκπομπών SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, PM τηρούνται. Η υποχρέωση αυτή δεν περιορίζεται στα χωρικά ύδατα της συγκεκριμένης χώρας, αλλά ισχύει οπουδήποτε δραστηριοποιείται το πλοίο [25]. Εάν ένα πλοίο παραβιάσει τους κανόνες, το κράτος-μέλος είναι υπεύθυνο να λάβει μέτρα, όπως να επιβάλλει κυρώσεις ή ανάκληση πιστοποιητικών, και να συνεργαστεί με τα παράκτια κράτη (Port State Control) [26] τα οποία μπορούν να υποχρεώσουν το εκάστοτε πλοίο να δεχτεί συμπληρωματικούς ελέγχους.

Εν έτη 2010, τέθηκε σε ισχύ μία τροποποίηση του Annex VI που επέβαλε αυστηρότερα όρια, θεσπίζοντας περιοχές ελέγχου εκπομπών (ECA) στη Βόρεια και Βαλτική θάλασσα, την περιοχή της Βόρειας Αμερικής, όπως επίσης των Ηνωμένων Πολιτειών και της Καραϊβικής. Σκοπός αυτής της μεταρρύθμισης ήταν η σταδιακή μείωση του ορίου του θείου από 3.50% (2012) σε 0.50% (1 Ιαν. 2020) και στο 0.10% μέσα στις περιοχές ECA (1 Ιαν. 2015). Τέλος, το αναθεωρημένο

παράρτημα επέβαλε περιορισμούς και στα όρια NO<sub>x</sub>, ανάλογα με το έτος κατασκευής τους, διαχωρίζοντάς τα σε τρεις κατηγορίες: Tier I – II – III . [27]

Επιπρόσθετα, κατά την 66<sup>η</sup> σύνοδο της Επιτροπής Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MEPC) του IMO, η οποία πραγματοποιήθηκε τον Μάρτιο του 2014, υιοθετήθηκαν στο παράρτημα VI της MARPOL ο Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης Σχεδίασης (EEDI) και το Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου (SEEMP) . Ο EEDI αφορά τα νέα πλοία (ναυπήγησης μετά το 2013) [28], ενώ το SEEMP είναι υποχρεωτικό όχι μόνο για όλα τα πλοία, αλλά και για τις εταιρείες που τα διαχειρίζονται [29].

Το cold-ironing έχει υπάρξει θέμα συζήτησης σε πολλές συνεδριάσεις της MEPC [30], ιδίως στην 54<sup>η</sup> και 55<sup>η</sup>, όπου η επιτροπή έθεσε κατευθυντήριες γραμμές για την τυποποίησή του (standardization). Τέλος, η επί μέρους επιτροπή συστημάτων και εξοπλισμού πλοίων (SSE), έχει εξετάσει την ανάπτυξη πρόσθετων οδηγιών για την εφαρμογή του cold-ironing στα πλοία [31].

### 3.3 Ευρωπαϊκή νομοθεσία

Παρόλο που όλα τα κράτη-μέλη οφείλουν να τηρούν τα πρότυπα των κανονισμών του IMO [32], κάθε χώρα έχει το δικαίωμα να επιβάλλει επιπλέον αυστηρότερα μέτρα [33]. Η Ευρωπαϊκή Ένωση, ασκεί περιβαλλοντική πολιτική, θέτοντας στόχους οι οποίοι επηρεάζουν και τον κλάδο της ναυτιλίας.

Συγκεκριμένα, το 2005 εκδόθηκε η Οδηγία 2005/33/EK, η οποία τροποποίησε την Οδηγία 1999/32/EK, και καθόρισε ζώνες ελέγχου εκπομπών (ECA) στη Μάγχη, τη Βόρεια Θάλασσα και τη Βαλτική. Στις περιοχές αυτές, θεσπίστηκε ανώτατο όριο θείου 1.5%, ενώ τα πλοία που βρίσκονταν αγκυροβολημένα ή σε οποιονδήποτε λιμένα της ΕΕ, υποχρεούνταν να χρησιμοποιούν καύσιμο με περιεκτικότητα 0.1% θείου, ένας κανονισμός όπου ήταν αυστηρότερος από τις τότε απαιτήσεις της MARPOL [34].

Επιπρόσθετα, η Οδηγία 2012/33/ΕΕ επέβαλε ακόμη αυστηρότερους περιορισμούς όσον αφορά την περιεκτικότητα καυσίμων σε θείο, ενώ αναδείχθηκε για πρώτη φορά το ζήτημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στα λιμάνια, διατυπώνοντας τη σύσταση: « Τα κράτη-μέλη οφείλουν να ενθαρρύνουν τη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας από την ξηρά, δεδομένου ότι η ηλεκτροδότηση των πλοίων στις μέρες μας παρέχεται από τις βοηθητικές μηχανές τους» [11], [35].

Οι συζητήσεις γύρω από το cold-ironing, έλαβαν περαιτέρω εξέλιξη κατά την έγκριση της Οδηγίας 2014/94/ΕΕ, η οποία απέβλεπε στην ανάπτυξη υποδομών εναλλακτικών καυσίμων. Μεταξύ άλλων, η οδηγία αναφέρει ότι τα κράτη-μέλη πρέπει να εξασφαλίζουν ότι εντός του εθνικού τους πλαισίου πολιτικής, θα αξιολογείται η ανάγκη παροχής ηλεκτρικής ενέργειας των πλοίων, σε εσωτερικά και μη λιμάνια, από το δίκτυο της ξηράς. Προτεραιότητα εγκατάστασης αυτού του τρόπου παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, οφείλουν να έχουν οι λιμένες του Διευρωπαϊκού Δικτύου Μεταφορών (TEN-T Core Network), καθώς και σε άλλους λιμένες έως τις 31 Δεκεμβρίου 2025, με εξαίρεση τις περιπτώσεις όπου το κόστος είναι δυσανάλογο συγκριτικά με τα οφέλη, αναφερόμενοι τόσο στα περιβαλλοντικά όσο και στα οικονομικά οφέλη [36].

Επιπλέον, η ΕΕ εξέδωσε τον Κανονισμό 2015/757 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου σχετικά με την παρακολούθηση, την υποβολή εκθέσεων και την επαλήθευση (MRV) των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από τις θαλάσσιες μετακινήσεις και μεταφορές. Συνοπτικά, οποιοδήποτε πλωτό άνω των 5,000 GT το οποίο δραστηριοποιείται σε λιμάνια της ΕΕ, οφείλει να διαθέτει σύστημα παρακολούθησης, αναφοράς και επαλήθευσης των αερίων που εκλύει, αποβλέποντας, με αυτόν τον τρόπο, στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στον τομέα της ναυτιλίας [37].

Τέλος, το σύστημα εκπομπών που προέρχονται από το εμπόριο της ΕΕ (EU emissions trading system – EU ETS), αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο της ευρωπαϊκής πολιτικής, για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, διαδραματίζοντας σπουδαίο ρόλο στην ελάττωση των εκπομπών που επιδεινώνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου, με οικονομικά αποδοτικό τρόπο [38].

### 3.4 Διεθνή πρότυπα για τη διασύνδεση cold-ironing

Διάφοροι οργανισμοί που ασχολούνται με την τυποποίηση των κανονισμών, εργάζονται από το 2006 [39] για την ανάπτυξη προτύπων σχετικά με την εφαρμογή της ηλεκτροδότησης των πλοίων από το δίκτυο τροφοδοσίας ισχύος της ξηράς. Οι μεγαλύτεροι τρεις διεθνείς οργανισμοί τυποποίησης είναι οι IEC, ISO και IEEE. Αρχικά, καθένας από αυτούς εργάζεται ανεξάρτητα από τους υπόλοιπους στη διαδικασία δημιουργίας και εφαρμογής των προτύπων, εντούτοις οι τρεις οργανισμοί έχουν συνενώσει τις προσπάθειές τους, για να εκδώσουν δύο κοινά πρότυπα, το IEC/ISO/IEEE 80005-1, το οποίο αφορά συστήματα cold-ironing σύνδεσης υψηλής τάσης, και το

IEC/IEEE 80005-2:2016, το οποίο ορίζει τα πρωτόκολλα και τα μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ πλοίου-ξηράς, σε συστήματα υψηλής (HVSC) και χαμηλής τάσης (LVSC) [40].

Το πρότυπο IEC/ISO/IEEE 80005-1, δημοσιεύθηκε τον Αύγουστο του 2012, αλλά ανανεώθηκε τον Μάρτιο του 2019 στα πρότυπα IEC/IEEE 80005-1:2019 και IEC/IEEE 80005-2:2016. Το IEC/IEEE 80005-1:2019 εξακολουθεί να επικεντρώνεται στην περιγραφή των συστημάτων HVSC, με την εφαρμογή της τεχνολογίας cold-ironing, για τις ανάγκες τροφοδοσίας των πλωτών. Εφαρμόζεται στον σχεδιασμό, την εγκατάσταση και τις δοκιμές των HVSC συστημάτων, καλύπτοντας τα εξής σημεία:

- Συστήματα διανομής υψηλής τάσης στην ξηρά,
- Εξοπλισμό της διασύνδεσης ξηράς-πλοίου,
- Μετασχηματιστές,
- Ημιαγωγικούς ή/και περιστρεφόμενους μετατροπείς συχνότητας,
- Συστήματα διανομής επί του πλοίου,
- Συστήματα ελέγχου, παρακολούθησης και διαχείρισης ισχύος.

Το πρότυπο IEC/IEEE 80005-2:2016, είναι το δεύτερο τμήμα της κατηγορίας προτύπων 80005, καλύπτοντας τα εξής [41]:

- Φυσικό μέσο μετάδοσης και διεπαφή
  - Για παράδειγμα, οπτικές ίνες ή Cat -6 Ethernet point-to-point
- Πρωτόκολλα και μορφοποίηση των δεδομένων
  - Όπως: Modbus-TCP/IP
- Απαιτήσεις κυβερνοασφάλειας και εφεδρείας
  - Διακριτά VLANs, authentication
- Διαδικασίες ζεύξης και απόζευξης
  - Έλεγχος απωλειών επικοινωνίας και ασφαλές shut-down
- Ειδικές προβλέψεις – Annex A

- Αφορά πρόσθετα σήματα και διαδικασίες για κρουαζιερόπλοια
- Επαλήθευση και δοκιμές – Clause 10
  - Δοκιμές αποκατάστασης σφαλμάτων και επιβεβαίωση χρόνων απόκρισης μηνυμάτων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ COLD- IRONING

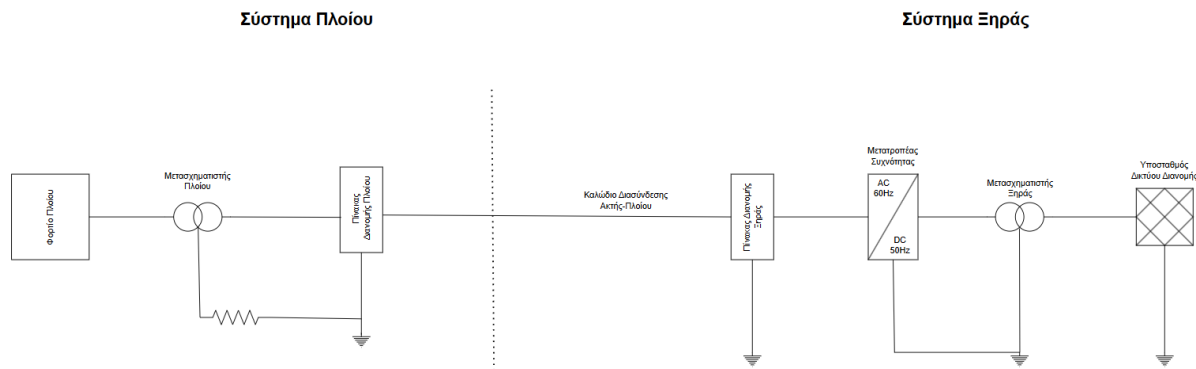
### 4.1 Περιγραφή συστήματος

Μία εγκατάσταση cold-ironing, μπορεί να διακριθεί σε δύο επιμέρους μέρη. Το πρώτο, είναι η διασύνδεση της ξηράς, όπου συναντάται η πηγή τροφοδοσίας, δηλαδή το δίκτυο το οποίο συνδέεται με έναν μετασχηματιστή υποβιβασμού τάσης, εντός υποσταθμού. Ο μετασχηματιστής υποβιβάζει την μέση τάση (20 kV) του δικτύου σε χαμηλότερο επίπεδο τάσης (~5 kV). Ο μετασχηματιστής υποβιβασμού, συνδέεται με μετατροπέα συχνότητας, μετατρέποντας τα 50 Hz του δικτύου τροφοδοσίας στα 60 Hz, με σκοπό την εξασφάλιση συμβατότητας με τη συχνότητα λειτουργίας του πλοίου. Ακόμη, ο μετατροπέας συχνότητας, συνδέεται με τον κύριο πίνακα διανομής της στεριάς (Berthside Switchboard), ο οποίος λαμβάνει την ισχύ του δικτύου και τη μεταδίδει στον κύριο πίνακα διανομής του πλοίου (Shipside Switchboard), μέσω μακρών καλωδίων σύνδεσης, τα οποία συνήθως υπερβαίνουν τα 100m, ακολουθώντας πρωτίστως τις αρχές του Cable Management System (CMS).

Το δεύτερο μέρος της εγκατάστασης, αφορά τη σύνδεση του πλοίου με τον υποσταθμό της ξηράς. Επομένως, αφού πραγματοποιηθεί η σύνδεση μεταξύ του καλωδίου τροφοδοσίας της στεριάς και του κύριου πίνακα διανομής του πλοίου, παρεμβάλλεται, μεταξύ του φορτίου του πλοίου και του πίνακα διανομής, ένας μετασχηματιστής ανύψωσης ή υποβιβασμού τάσης. Η τάση ανυψώνεται ή υποβιβάζεται ανάλογα τον τύπο και το μέγεθος του πλοίου, ώστε να ικανοποιηθούν οι ανάγκες του φορτίου του.

Κατά τη λειτουργία του cold-ironing, η τοπολογία γείωσης του πλοίου βασίζεται είτε στη χρήση συστήματος γείωσης υψηλής αντίστασης (High Resistance Grounding – HRG), είτε σε σύστημα Isolated Terrain (IT). Στη μέθοδο HRG, η τοποθέτηση της αντίστασης γείωσης, εφόσον υφίσταται μετασχηματιστής εντός του πλοίου, γίνεται στον ουδέτερο αγωγό του μετασχηματιστή,

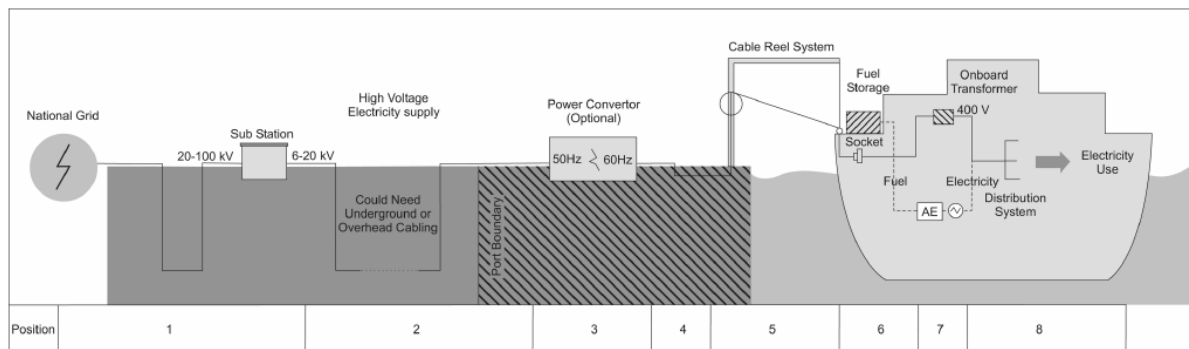
έχοντας ως σκοπό τον περιορισμό του ρεύματος σφάλματος φάσης-γης [42]. Στην Εικόνα 4 απεικονίζεται η τοπολογία ενός cold-ironing συστήματος.



Εικόνα 4. Σχέδιο τοπολογίας για τη διασύνδεση cold-ironing.

## 4.2 Η σύσταση της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Η Ευρωπαϊκή Ένωση, στη σύσταση 2006/339/EC, παρουσίασε μία τυπική διάταξη σχετικά με την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο της ξηράς προς το πλοίο, αποσαφηνίζοντας ότι ανάλογα τον τύπο του πλωτού η διάταξη αυτή μεταβάλλεται [43]. Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται η επισκόπηση της σύνδεσης shore-to-ship βάσει του 2006-339-EC της Ε.Ε. [43].



Εικόνα 5. Επισκόπηση της σύνδεσης shore-to-ship βάσει 2006/339/EC της ΕΕ [43].

Η περιγραφή της σύστασης 2006/339/EC, σύμφωνα με το σχέδιο στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.



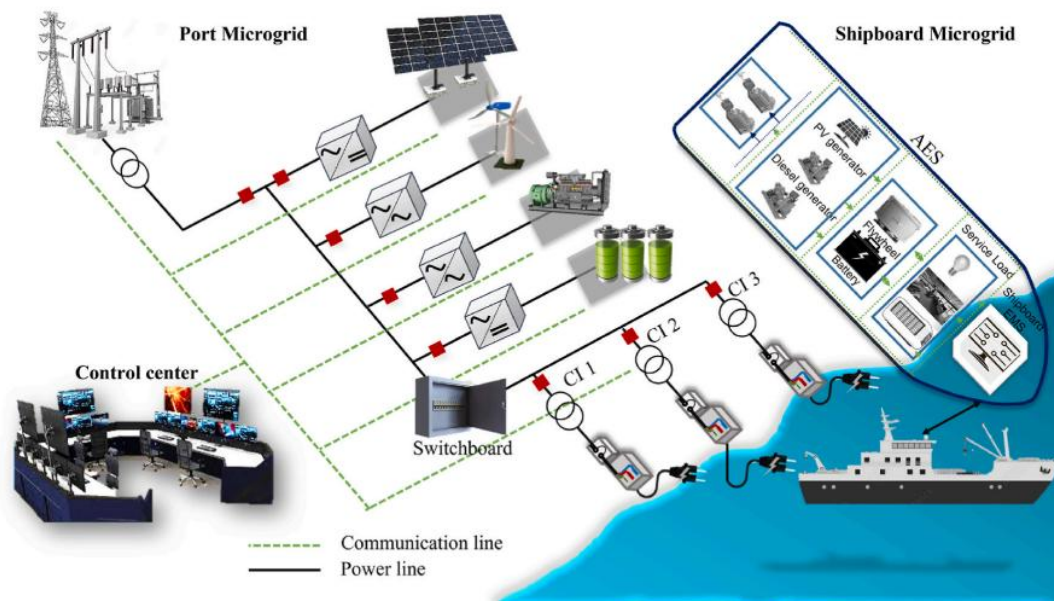
Πίνακας 2. Περιγραφή της σύστασης 2006/339/EC.

Θέση	Περιγραφή
1	Σύνδεση τοπικού υποσταθμού στο εθνικό δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας 20-100kV, όπου από εκεί μετατρέπεται σε 6-20kV.
2	Καλώδια για τη μεταφορά ισχύος των 6-20kV, από τον τοπικό υποσταθμό στις αποβάθρες.
3	Μετατροπή ισχύος, όπου κρίνεται απαραίτητο.
4	Καλώδια για τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας στο λιμάνι, τα οποία δύνανται να τοποθετηθούν υπόγεια, εντός υπαρχόντων ή καινούριων αγωγών.
5	Σύστημα περιέλιξης καλωδίων για την ανύψωσή τους στο πλοίο, με σκοπό την αποφυγή της χειροκίνητης διαχείρισης των καλωδίων υψηλής τάσης.
6	Υποδοχή στο πλοίο για το καλώδιο σύνδεσης.
7	Μετασχηματιστής εν πλω, για τον υποβιβασμό της υψηλής τάσης σε χαμηλή (400V).
8	Η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στα φορτία του πλοίου, ενώ οι γεννήτριές του παραμένουν ανενεργές.

### 4.3 Επισκόπηση τεχνικών προδιαγραφών – Δίκτυο διανομής

Η ηλεκτρική ισχύς που απαιτείται, για να ικανοποιηθούν οι ανάγκες των πλοίων κατά τον ελλιμενισμό, παρέχεται από διάφορες πηγές. Πέρα από την προφανή, δηλαδή την παροχή ενέργειας από το εθνικό δίκτυο της χώρας και τοπικών υποσταθμών, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η παραγωγή και παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από τοπικά μικροδίκτυα (microgrids), τα οποία, επιστρατεύοντας τις τοπικές ΑΠΕ, αξιοποιούν την πράσινη ενέργεια. Με αυτό τον τρόπο τροφοδοσίας, το cold-ironing καθίσταται ως μία ωφέλιμη τεχνική, η οποία αποσκοπεί στη μείωση

του περιβαλλοντικού αποτυπώματος [44]. Η Εικόνα 6 παρουσιάζει μία τέτοια τοπολογία ένταξης και μικροδικτύων με ΑΠΕ.



Εικόνα 6. Συνδυασμός cold-ironing και συστήματος μικροδικτύου [44].

Για τη προσομοίωση του δικτύου, θεωρήθηκε ότι είναι ακλόνητο. Προκειμένου να προσομοιωθεί ως τέτοιο, χρησιμοποιήθηκε μία τριφασική πηγή τάσης, μία αντίσταση  $1\Omega$  και αυτεπαγωγή  $20\text{ mH}$ .

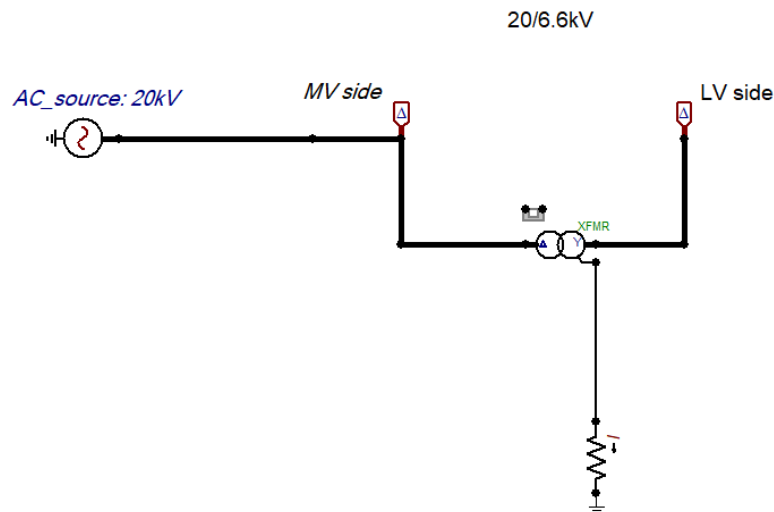
#### 4.4 Μετασχηματιστές ισχύος

Για τη σύνδεση ενός ελλιμενισμένου πλοίου στο δίκτυο της ξηράς απαιτείται ένας μεμονωμένος μετασχηματιστής του υποσταθμού ξηράς (dedicated substation transformer), του οποίου το δευτερεύον κύκλωμα θα πρέπει να υποβιβάζει την τάση είτε στα  $6.6\text{ kV}$  ή στα  $11\text{ kV}$ . Ο όρος μεμονωμένος μετασχηματιστής υποσταθμού, αναφέρεται στο ότι ένα και μόνο πλοίο συνδέεται σε έναν και μόνο μετασχηματιστή, ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις γαλβανικής απομόνωσης του ισχύοντος προτύπου [45]. Μία τέτοια διάταξη, θωρακίζει το ηλεκτρικό σύστημα του πλοίου από απρόσκοπτα σφάλματα στο σύστημα της ξηράς, ιδίως όταν το δίκτυο της ξηράς τροφοδοτεί και άλλες εγκαταστάσεις εντός του λιμένα.

Επίσης, ενδέχεται να προκύψουν σφάλματα στη γείωση και inrush currents, τα οποία συσχετίζονται με άλλες ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις εντός του λιμανιού, επηρεάζοντας την

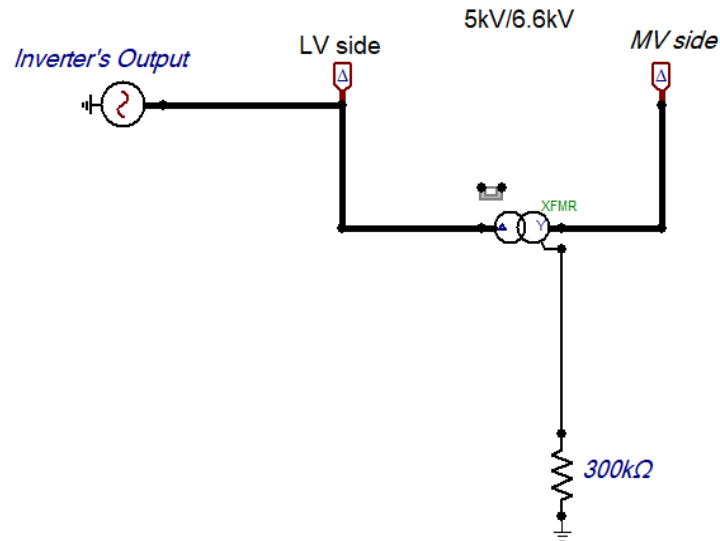
προστασία των σφαλμάτων γείωσης του πλοίου. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί, εάν το σύστημα τροφοδοσίας της ξηράς διαθέτει δική του ζώνη γείωσης, μέσω του μεμονωμένου μετασχηματιστή, όπου και συνδέεται αντίσταση γείωσης στον ουδέτερο αγωγό (NGR) [1].

Όσον αφορά τον μετασχηματιστή εντός του πλωτού, ανάλογα με τον τύπο και το μέγεθος του πλοίου, το δευτερεύον του τύλιγμα θα παράγει επίπεδα χαμηλής, δηλαδή 440 V, ή υψηλής τάσης, συνήθως 6.6 kV ή 11 kV. Η γείωση του συστήματος του πλοίου, έγκειται στο ότι ο ουδέτερος αγωγός του μετασχηματιστή συνδέεται με αντίσταση υψηλής τιμής, δημιουργώντας σύστημα Isolated Terrain (IT) [46]. Στην Εικόνα 7 απεικονίζεται ο μετασχηματιστής υποβιβασμού τάσης, με χρήση του μοντέλου XMFR, στο πρόγραμμα ATPDraw. Για όλα τα μοντέλα μετασχηματιστών χρησιμοποιήθηκαν οι τυπικές τιμές που δίνει το μοντέλο [15].



Εικόνα 7. Κυκλωματική αναπαράσταση μετασχηματιστή ξηράς με το πρόγραμμα ATPDraw.

Ο μετασχηματιστής υποβιβασμού τάσης που βρίσκεται στη μεριά της ξηράς, συνδέεται με τον τοπικό υποσταθμό και μετατρέπει την τάση των 20 kV σε 6.6 kV, ώστε να καλύπτει τις ανάγκες του φορτίου [42]. Το πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή, είναι σε συνδεσμολογία τριγώνου και δέχεται την υποβιβασμένη τάση του δικτύου, ενώ το δευτερεύον τύλιγμά του, είναι σε συνδεσμολογία αστέρα και παράγει την μετασχηματισμένη επιθυμητή τάση των 6.6kV. Ακόμη, η μεριά της χαμηλής τάσης, γειώνεται με αντίσταση τιμής 1Ω, η οποία αποτελεί κοινή πρακτική σε τέτοια συστήματα [47]. Τέλος, η φαινόμενη ισχύς του μετασχηματιστή είναι 5MVA, ώστε να καλύπτει τις ανάγκες του πλοίου.



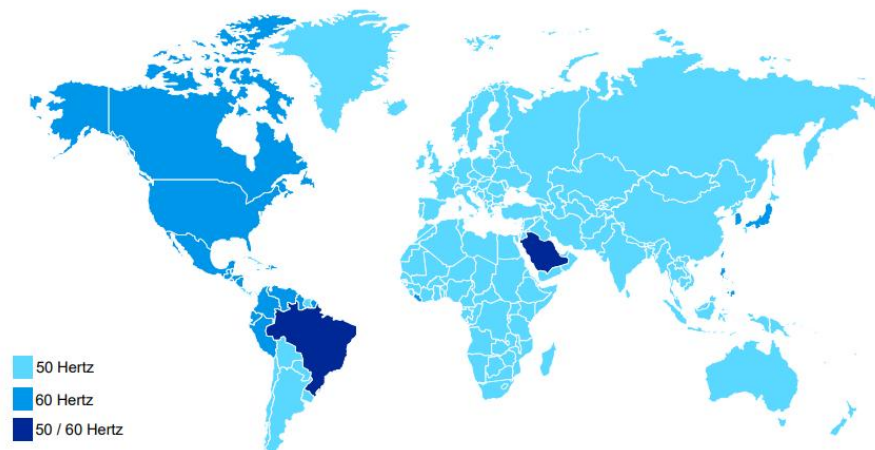
Εικόνα 8. Κυκλωματική αναπαράσταση μετασχηματιστή πλοίου μέσω εργαλείου ATPDraw.

Για την προσομοίωση μεταβατικών φαινομένων συνυπολογίστηκε και η χωρητική σύζευξη μεταξύ των τυλιγμάτων και μεταξύ των τυλιγμάτων και της γης. Προκειμένου να προσομοιωθεί η παρασιτική χωρητικότητα χρησιμοποιήθηκαν τυπικές τιμές, εξαρτώμενες από την ονομαστική ισχύ των μετασχηματιστών (5 MVA) [48]. Οι τυπικές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- Τύλιγμα υψηλής τάσης – γη: 4 nF
- Τύλιγμα χαμηλής τάσης – γη: 8 nF
- Μεταξύ τυλιγμάτων: 4 nF.

## 4.5 Μετατροπéας Συχνότητας

Επειδή η πλειοψηφία των πλοίων λειτουργεί στη συχνότητα των 60 Hz, ενώ τα εθνικά και ευρωπαϊκά δίκτυα στα 50 Hz, γεννάται η ανάγκη για την εξόπλιση μετατροπέων συχνότητας στα λιμάνια που εφαρμόζουν cold-ironing.



Εικόνα 9. Συχνότητα δικτύων ανά τον κόσμο [49].

Κατά τα πρώιμα στάδια της ανάπτυξης της τεχνολογίας cold-ironing, η μετατροπή συχνότητας γινόταν από σύστημα μηχανικά συζευγμένων σύγχρονων κινητήρων/ γεννητριών, τα οποία τοποθετούνταν σε συγκεκριμένα ναυπηγεία και λιμάνια. Παρόλα αυτά, το ενδιαφέρον για την αγορά του συγκεκριμένου εξοπλισμού μειώθηκε, από τη στιγμή που έκανε την εμφάνισή της η μετατροπή συχνότητας μέσω ηλεκτρονικών ισχύος. Με τη χρήση του μετατροπέα συχνότητας, έγινε εφικτή η οποιαδήποτε σύνδεση μεταξύ πλοίου και δικτύου, ανεξάρτητα από την απαιτούμενη συχνότητα.

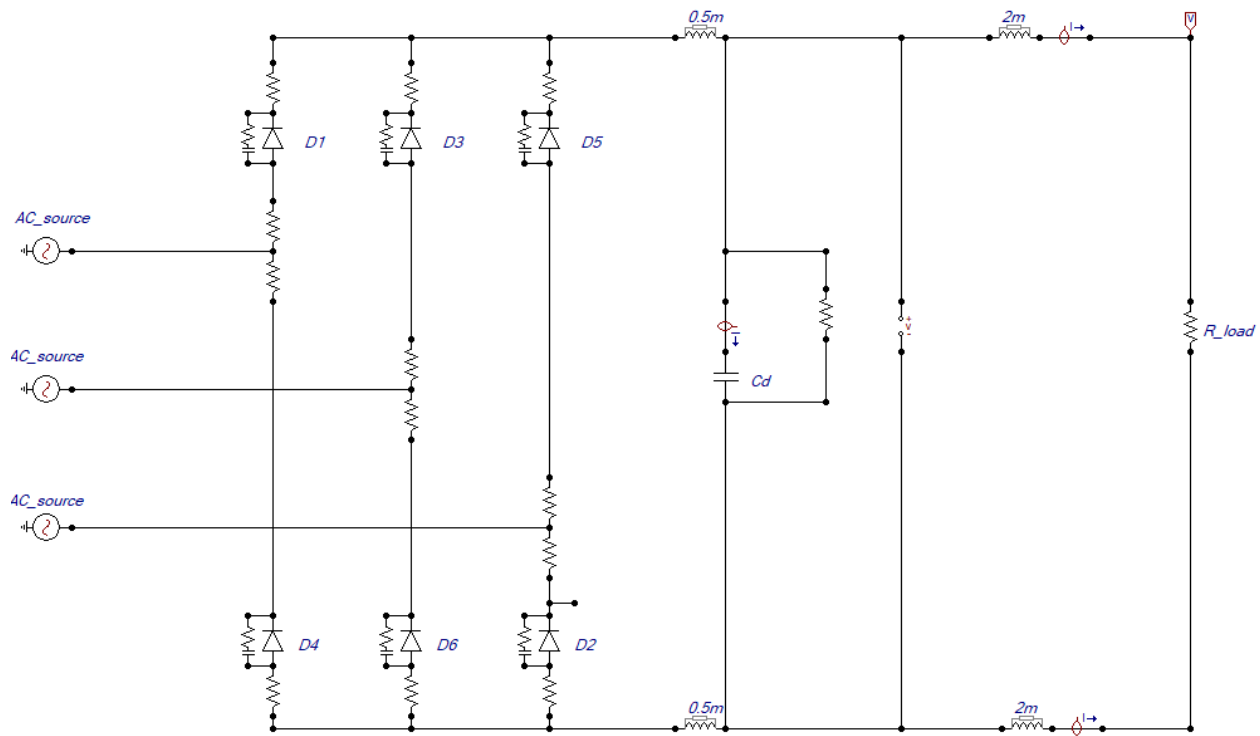
Μεταξύ των προτερημάτων της χρήσης του στατικού μετατροπέα συχνότητας, σημειώνονται η σταθεροποίηση της τροφοδοσίας από το λιμενικό δίκτυο, εξαιτίας της ελεγχόμενης τάσης και συχνότητας, τα χαμηλά λειτουργικά κόστη λόγω του υψηλού βαθμού απόδοσης, σε συνδυασμό με το μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα, το οποίο οφείλεται στο σχέδιο του μετατροπέα με μειωμένες απώλειες και υψηλή πυκνότητα ισχύος. Τέλος, αξίζουν να αναφερθούν στα πλεονεκτήματα αυτής της εφαρμογής, το μειωμένο ενεργειακό κόστος, μέσω της αντιστάθμισης αέργου ισχύος και της υψηλής απόδοσης, καθώς και η απρόσκοπτη ενσωμάτωση σε συστήματα shore-to-ship [50].

Υπάρχουν δύο τρόποι τοποθέτησης του μετατροπέα συχνότητας, με την πρώτη από αυτές να γίνεται στη θέση πρόσδεσης των πλοίων στο λιμάνι. Πρόκειται για ένα αποκεντρωμένο σύστημα, σύμφωνα με το οποίο σε κάθε θέση πρόσδεσης τοποθετείται ένας ξεχωριστός μετατροπέας συχνότητας, και των οποίων η τροφοδοσία συμβαίνει ακτινικά από έναν τοπικό υποσταθμό. Σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της εγκατάστασης, αποτελεί η αυτονομία, όπου σε περίπτωση

βλάβης σε κάποιον μετατροπέα συχνότητας ή κατά τη συντήρηση του εξοπλισμού, δεν επηρεάζονται οι υπόλοιπες θέσεις πρόσδεσης. Παρόλα αυτά, απαιτείται αρκετός χώρος σε κάθε προβλήτα και σημαντικός αριθμός μετασχηματιστών για την ικανοποίηση των προβλεπόμενων της εγκατάστασης αυτής, ενώ ακόμη ο μετατροπέας βρίσκεται σε λειτουργία και όταν συνδέεται πλοίο με απαίτηση συχνότητας 50 Hz.

Κατά τον δεύτερο τρόπο εγκατάστασης, ο μετατροπέας συχνότητας βρίσκεται τοποθετημένος σε κεντρικό σημείο, έχοντας κατάλληλους διακόπτες και ζυγούς (busbars), για τον έλεγχό του. Η εγκατάσταση δύναται να περιλαμβάνει μετατροπείς παράλληλα συνδεδεμένους, εκτός από έναν μεμονωμένο, ανάλογα με τη ζήτηση ισχύος στο εκάστοτε λιμάνι, συνδέοντας έναν από τους ζυγούς σε μετασχηματιστές υποβιβασμού και ανύψωσης τάσης. Για να καταστεί δυνατή η ταυτόχρονη σύνδεση πλοίων 50 Hz και 60 Hz, ενσωματώνεται ένας επιπλέον ζυγός, ο οποίος συνδέεται απευθείας με το εθνικό δίκτυο, μέσω ενός μετασχηματιστή. Έτσι, υπάρχει ένας ζυγός που παρέχει 50 Hz και ένας δεύτερος που παρέχει 60 Hz. Κάθε προβλήτα η οποία είναι συνδεδεμένη με την κεντρική εγκατάσταση μετατροπέων, τροφοδοτείται μέσω ενός αποζεύκτη (breaker) και ενός μεταγωγικού διακόπτη [43].

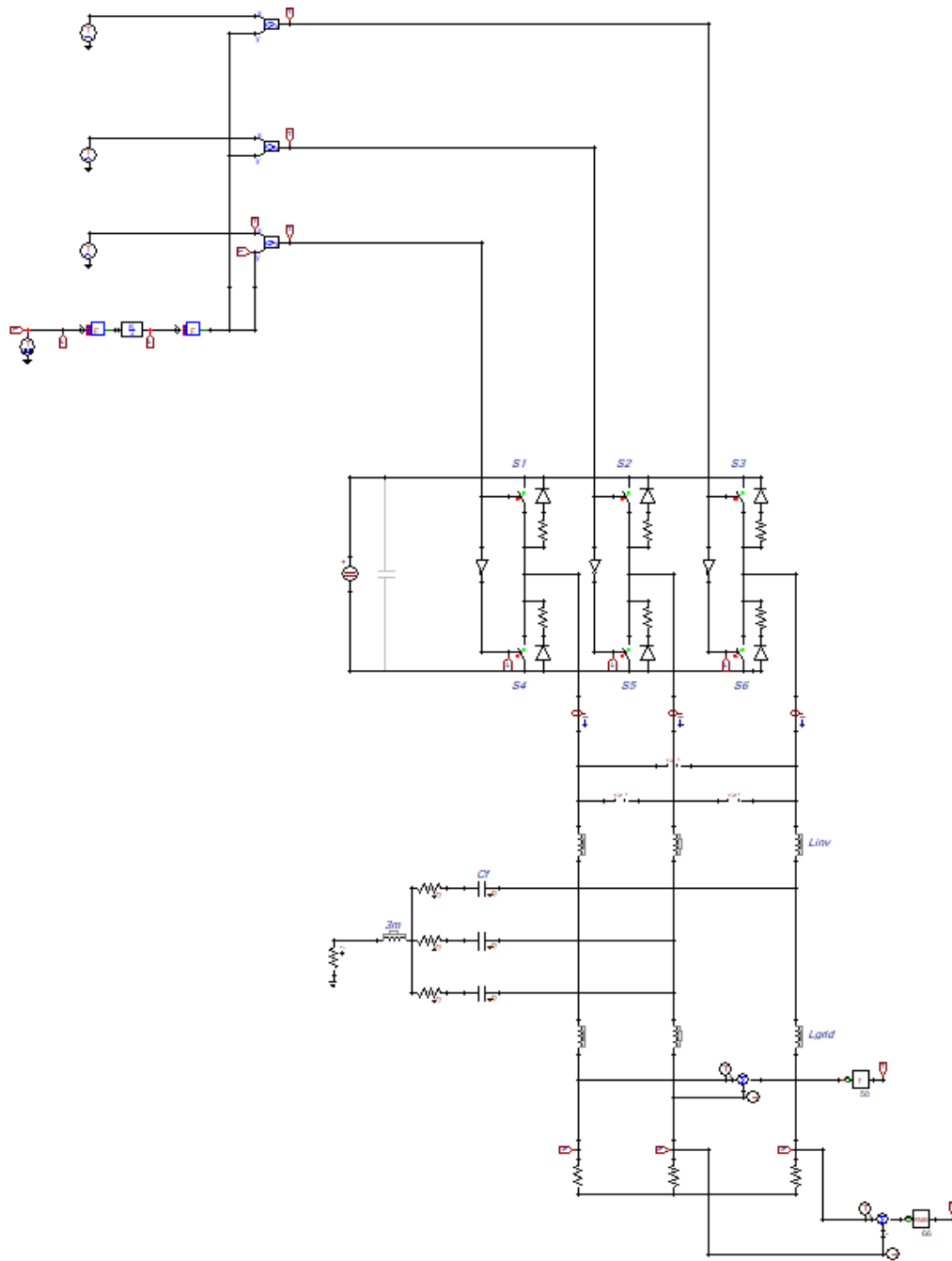
Πλεονεκτήματα αυτής της τοπολογίας έναντι της προηγούμενης, εντοπίζονται στη μειωμένη απαίτηση χώρου και στο ότι ο μετατροπέας συχνότητας, χρησιμοποιείται μόνο για τη μετατροπή από 50 Hz σε 60 Hz, οπότε δεν επιβαρύνεται από πλοία που δε χρειάζονται μετατροπή στη συχνότητά τους. Στον αντίποδα, το κόστος είναι αυξημένο λόγω της ανάγκης χρήσης ειδικών μεταγωγικών διατάξεων, ενώ επιπρόσθετα ένα τέτοιο σύστημα είναι πιο ευάλωτο, λόγω των ημιαγώγιμων στοιχείων που χρησιμοποιεί. Ως προς το κυκλωματικό ισοδύναμο του μετατροπέα συχνότητας, χρησιμοποιείται μία τυπική διάταξη. Συγκεκριμένα, η διάταξη αποτελείται από έναν τριφασικό ανορθωτή τάσης ο οποίος μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή, και στη συνέχεια η συνεχής αυτή τάση γίνεται είσοδος σε έναν αντιστροφέα, ο οποίος τη μετατρέπει ξανά σε εναλλασσόμενη, έχοντας την επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας. Στην Εικόνα 10 φαίνεται ένας τριφασικός ανορθωτής υλοποιημένος στο ATP-EMTP.



Εικόνα 10. Κυκλωματική διάταξη τριφασικού ανορθωτή στο πρόγραμμα ATP-EMTP.

Στο κύκλωμα του τριφασικού ανορθωτή, κάθε χρονική στιγμή άγει μία μόνο άνω δίοδος και μία μόνο κάτω δίοδος· εκείνη που έχει υψηλότερη τάση στην άνοδο και εκείνη που έχει χαμηλότερη τάση στην κάθοδο, ενώ οι υπόλοιπες είναι ανάστροφα πολωμένες. Οπότε το ρεύμα διαρρέει κάθε φορά μία δίοδο από την άνω ομάδα και μία δίοδο από την κάτω ομάδα. Τέλος, στην έξοδο του ανορθωτή, συνδέεται φίλτρο πυκνωτή χωρητικότητας 20μF. [51].

Στο κύκλωμα του τριφασικού αντιστροφέα με διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM), σκοπός είναι η παραγωγή συμμετρικών τριφασικών τάσεων εξόδου, με ρυθμιζόμενο πλάτος και συχνότητα, έχοντας ως είσοδο μία σταθερή DC τάση. Το κύκλωμα περιλαμβάνει τρεις κλάδους, έναν για κάθε φάση, και ελέγχει την τάση εξόδου μέσω σύγκρισης μιας τριγωνικής κυματομορφής (carrier signal), η οποία καθορίζει και τη συχνότητα του αντιστροφέα, με μία ημιτονοειδή κυματομορφή αναφοράς κάθε φορά από αυτές που παράγονται από κάθε κλάδο. Οι τρεις ημιτονοειδείς κυματομορφές που παράγονται είναι μετατοπισμένες κατά  $120^\circ$  μεταξύ τους. Στην Εικόνα 11 φαίνεται ο τριφασικός αντιστροφέας υλοποιημένος στο πρόγραμμα ATP-EMTP.



Εικόνα 11. Κυκλωματική διάταξη τριφασικού αντιστροφέα στο πρόγραμμα ATP-EMTP.

Με βάση το πλάτος της τάσης κυματομορφής ελέγχου και το πλάτος του φέροντος σήματος, ορίζεται ο συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους, όπου καθορίζει το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας στην έξοδο του αντιστροφέα.

$$m_a = \frac{V_{control}}{V_{tri}} \quad (1)$$



Για τιμές του  $m_a \leq 1$ , η θεμελιώδης αρμονική συνιστώσα της συχνότητας στην τάση εξόδου, μεταβάλλεται γραμμικά με τον συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους (γραμμική περιοχή), ενώ για  $m_a > 1$  η θεμελιώδης αρμονική συνιστώσα είναι σε υπερδιέγερση (overmodulation), κατά την οποία η μέγιστη τιμή των κυματομορφών ελέγχου επιτρέπεται να υπερβαίνει τη μέγιστη τιμή της τριγωνικής κυματομορφής. Σε αντίθεση με τη γραμμική περιοχή, το μέγεθος της τάσης στη θεμελιώδη συχνότητα, δεν αυξάνεται αναλογικά με τον συντελεστή διαμόρφωσης  $m_a$  [51].

Επομένως, η πολική τάση εξόδου στη γραμμική περιοχή ισούται με:

$$V_{LL} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a V_d \approx 0.612 m_a V_d \quad (2)$$

Στην έξοδο του αντιστροφέα, τοποθετείται φίλτρο LCL, το οποίο αποσκοπεί στην εξομάλυνση των κυματομορφών εξόδου. Ακολουθούν οι μαθηματικοί υπολογισμοί για τον καθορισμό των παραμέτρων του φίλτρου εξόδου [52], [53].

Έχοντας ως δεδομένα τα εξής:

- Ονομαστική τάση πλοίου -  $V_{grid\_ship} = 6.6kV$
- Ονομαστική φαινόμενη ισχύς πλοίου -  $S_{nom} = 5MVA$
- Συχνότητα λειτουργίας -  $f_g = 60Hz$
- Συχνότητα switching -  $f_s = 10kHz$
- Τάση DC -  $V_{DC} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{grid\_ship} = 8.913kV$

Υπολογίζουμε:

- Σύνθετη αντίσταση βάσης:

$$Z_b = \frac{V_{grid\_ship}^2}{S_{nom}} = 8.712\Omega \quad (3)$$

- Πυκνωτής βάσης:

$$C_b = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_g \cdot Z_b} = 0.3045mF \quad (4)$$

- Πυκνωτής φίλτρου:

$$C_f = 0.05 \cdot C_b = 15.22\mu F \quad (5)$$

- Κυμάτωση ρεύματος, θεωρώντας αποδεκτή τιμή 5% του ονομαστικού ρεύματος του αντιστροφέα:

$$\Delta I_L = 0.05 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot S_{nom}}{V_{grid_{ship}}} = 53.569A \quad (6)$$

- Πηνίο από τη μεριά του αντιστροφέα:

$$L_{inv} = \frac{V_{DC}}{16 \cdot \Delta I_L \cdot f_s} = 1.039mH \quad (7)$$

- Πηνίο από την πλευρά του φορτίου του πλοίου:

$$L_{grid} = 0.8 \cdot L_{inv} = 0.8319mH \quad (8)$$

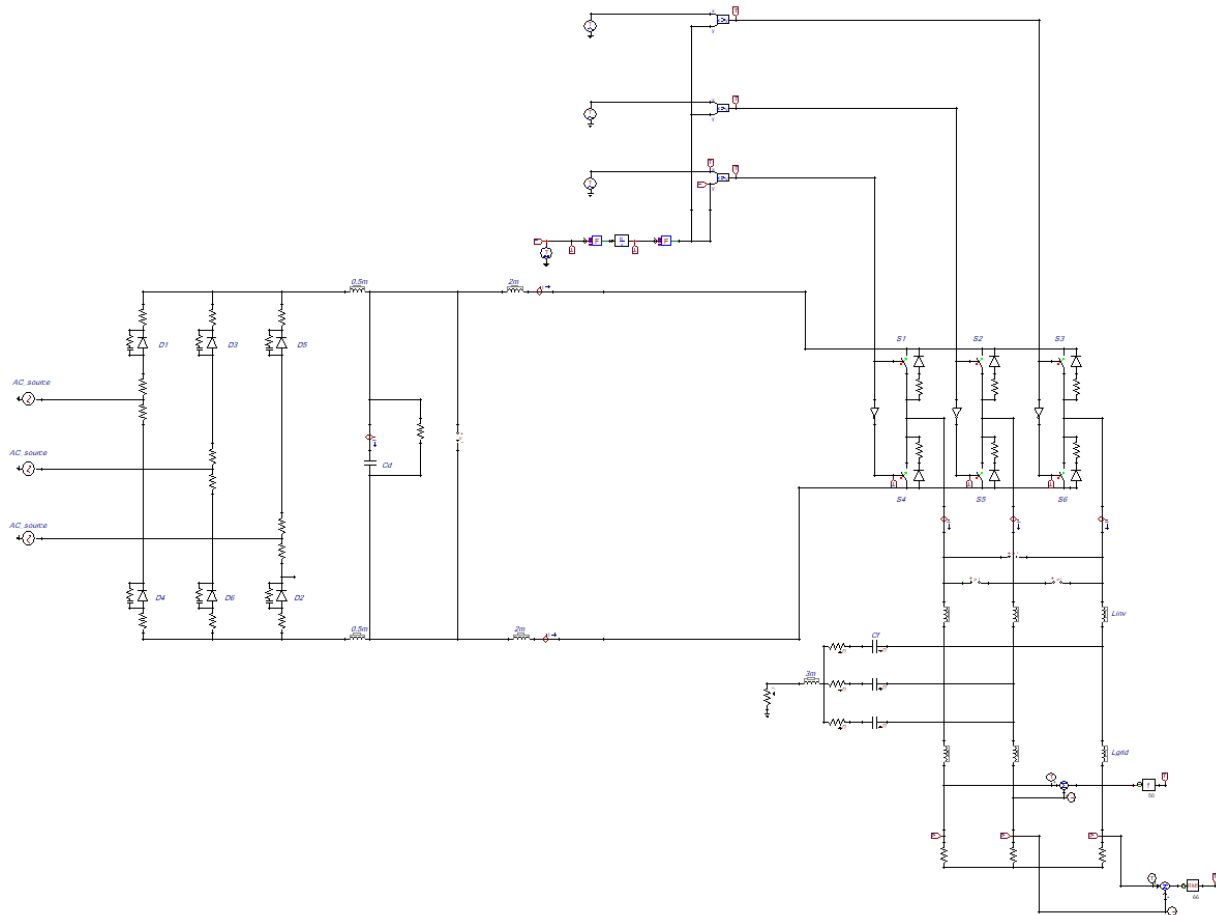
- Συχνότητα συντονισμού (πρέπει  $600 < f_{res} < 5000$ ):

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_{inv} + L_{grid}}{L_{inv} \cdot L_{grid} \cdot C_f}} = 1897.994Hz \quad (9)$$

- Επειδή το φίλτρο παρουσιάζει ταλαντώσεις γύρω από τη συχνότητα συντονισμού, προστίθεται σε σειρά με τον πυκνωτή του φίλτρου, μία αντίσταση (damping resistor) τιμής:

$$R_d = \frac{1}{3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{res} \cdot C_f} = 1.837\Omega \quad (10)$$

Τέλος, στην Εικόνα 12 παρουσιάζεται η συνολική διάταξη του μετατροπέα συχνότητας από 50 Hz σε 60 Hz:



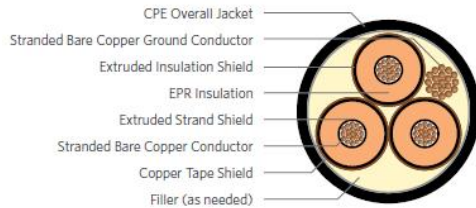
Εικόνα 12. Κυκλωματική διάταξη μετατροπέα συχνότητας στο πρόγραμμα ATP-EMTP.

Και στα δύο επιμέρους κυκλώματα ισχύος, τοποθετήθηκαν παράλληλα με τις διόδους snubber resistance, σύμφωνα με [49], [15].

#### 4.6 Καλώδια και αγωγοί

Το καλώδιο που συνδέει τον υποσταθμό ξηράς με τον κύκλωμα του πλοίου είναι τριπολικό. Για το κυκλωματικό ισοδύναμο στο ATP-EMTP χρησιμοποιήθηκε το datasheet του καλωδίου που φαίνεται στην Εικόνα 13 και στην Εικόνα 14. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το ισοδύναμο Π, το οποίο είναι κατάλληλο για κοντές γραμμές μεταφοράς [15], [17]. Το Π ισοδύναμο κύκλωμα δεν λαμβάνει υπόψη κυματικά φαινόμενα. Εντούτοις, στις κοντές γραμμές μεταφοράς δεν απαιτείται να συνυπολογιστούν κυματικά φαινόμενα [54]. Εν προκειμένω το υπό μελέτη καλώδιο είναι μήκους 100 m, καθιστώντας το Π ισοδύναμο ιδανικό για την προσομοίωση του.

## EPR/CTS/TP-CPE Power, Type MV-105, 3 Conductor, 5kV-15kV Series E8 (Copper Conductors)



### PRODUCT KEY

Conductor	Stranding	Voltage	Insulation (CCV)	Shield	Jacket
Cu	B	MV	EPR	Copper Tape	TP CPE

### PRODUCT DESCRIPTION

The Superior Essex 3 Conductor MV-105 Power Cables consist of fully annealed bare copper Class B stranded conductors, covered with ethylene propylene rubber (EPR), copper tape shield, and black CPE jacket. These cables are used in industrial power circuits.

### APPLICATIONS

- In conduit, duct, free air, direct burial and raceways, primary installations include cable trays, and outdoor locations
- In wet or dry locations
- Approved for Class I, Div. 2 industrial hazardous locations per NEC
- Designed to operate continuously at a conductor temperature not exceeding
  - 105°C for normal operations
  - 140°C for emergency overload
  - 250°C for short circuit

### FEATURES

- Rated at 105°C wet or dry
- Excellent corona resistance
- High dielectric strength
- Low moisture absorption
- Low dielectric loss
- Excellent sunlight resistance
- For CT USE per UL® 1072
- Meets cold bend test at -35°C
- For direct burial applications

### MARKETS



### SPECIFICATIONS

Conductor Count	3 conductor
Conductor	Full annealed bare copper Class B compressed strand (filled or unfilled) Also available with copper Class B compact strand
Gauge Sizes	Available in 2 AWG through 750 kcmil
Conductor Strand Shield	Extruded thermoset semi-conducting polymer over the conductor
Insulation	Ethylene Propylene Rubber (EPR)
Insulation Shield	Extruded thermoset semi-conducting polymer over the insulation
Phase Identification	Color ribbons in each phase (standard: black-red-blue)
Shield	5mil annealed copper tape helically applied with a 25% overlap
Fillers	Non-hygroscopic fillers, as necessary to obtain a circular cross section
Ground Conductor	Uninsulated bare copper ground
Overall Jacket	Thermoplastic Chlorinated Polyethylene (TP-CPE)
Jacket Marking	00000 FT SUPERIOR ESSEX XXAWG (or XXXXCMIL) 3/C XXXV XXX% INSUL LEVEL XXXMILS EPR/CPE JKT TYPE MV-105 FOR CT USE (UL) SUN RES DIR BUR MADE IN USA MMDDYYYY (LIGHTNING BOLT)
Packaging	Non-returnable reels in a variety of lengths and dimensions
Performance Compliances	ASTM B8 UL 1072 UL 1685 (flame compliance) ICEA S-93-639/NEMA WC74 ICEA S-97-682 AIEC CS8 NEC
Other Compliances	EPA 40 CFR, Part 261 OSHA

UL is a registered trademark of UL LLC.

Εικόνα 13. Πρώτη σελίδα του datasheet του καλωδίου.

EPR/CTS/TP-CPE POWER, TYPE MV-105, 3 CONDUCTOR

**Copper Cdr 5kV 133%/8kV 100% I.L., 115-mils, Shielded Series E8FMR****PART NUMBERS AND PHYSICAL CHARACTERISTICS**

Part Number	Conductor Size AWG/kcmil	Nominal Conductor Diameter <sup>1</sup> in (mm)	Nominal Insulation Diameter <sup>1</sup> in (mm)	Ground Wire AWG	Nominal Jacket Thickness <sup>1</sup> in (mm)	Nominal Overall Diameter <sup>1</sup> in (mm)	Nominal Net Weight <sup>1</sup> lbs/kft (kg/km)	Ampacity		
								Conduit in Air <sup>2</sup>	Underground Duct <sup>3</sup>	Tray <sup>4</sup>
E8FMR-021803CB00	2	0.280 (7.1)	0.563 (14.31)	6	0.080 (2.03)	1.614 (41.0)	1644 (2446)	165	160	185
E8FMR-011803CB00	1	0.319 (8.1)	0.602 (15.29)	4	0.080 (2.03)	1.762 (44.8)	1976 (2940)	185	185	210
E8FMR-1A1803CB00	1/0	0.358 (9.1)	0.642 (16.31)	4	0.080 (2.03)	1.848 (46.9)	2268 (3375)	215	210	240
E8FMR-2A1803CB00	2/0	0.401 (10.2)	0.685 (17.41)	4	0.080 (2.03)	1.940 (49.3)	2594 (3860)	245	235	275
E8FMR-3A1803CB00	3/0	0.451 (11.5)	0.736 (18.69)	3	0.080 (2.03)	2.050 (52.1)	3033 (4513)	280	270	315
E8FMR-4A1803CB00	4/0	0.507 (12.9)	0.792 (20.12)	3	0.110 (2.79)	2.170 (55.1)	3529 (5252)	320	305	360
E8FMR-A11803CB00	250	0.552 (14.0)	0.838 (21.29)	2	0.110 (2.79)	2.269 (57.6)	4004 (5958)	350	335	400
E8FMR-A31803CB00	350	0.654 (16.6)	0.941 (23.91)	2	0.110 (2.79)	2.491 (63.3)	5245 (7805)	430	400	490
E8FMR-A61803CB00	500	0.781 (19.8)	1.069 (27.15)	1	0.140 (3.55)	2.825 (71.7)	7058 (11616)	525	485	600
E8FMR-B21803CB00	750	0.958 (24.3)	1.248 (31.70)	1/0	0.140 (3.55)	3.140 (79.8)	9833 (14633)	635	585	745

**Copper Cdr 15kV 133% I.L., 220-mils, Shielded Series E8JMR****PART NUMBERS AND PHYSICAL CHARACTERISTICS**

Part Number	Conductor Size AWG/kcmil	Nominal Conductor Diameter <sup>1</sup> in (mm)	Nominal Insulation Diameter <sup>1</sup> in (mm)	Ground Wire AWG	Nominal Jacket Thickness <sup>1</sup> in (mm)	Nominal Overall Diameter <sup>1</sup> in (mm)	Nominal Net Weight <sup>1</sup> lbs/kft (kg/km)	Ampacity		
								Conduit in Air <sup>2</sup>	Underground Duct <sup>3</sup>	Tray <sup>4</sup>
E8JMR-021803CB00	2	0.280 (7.1)	0.793 (20.14)	6	0.110 (2.79)	2.172 (55.2)	2434 (3623)	165	160	185
E8JMR-011803CB00	1	0.319 (8.1)	0.832 (21.13)	4	0.110 (2.79)	2.256 (57.3)	2749 (4091)	185	185	210
E8JMR-1A1803CB00	1/0	0.358 (9.1)	0.872 (22.15)	4	0.110 (2.79)	2.342 (59.5)	3069 (4567)	215	210	240
E8JMR-2A1803CB00	2/0	0.401 (10.2)	0.915 (23.24)	4	0.110 (2.79)	2.435 (61.8)	3429 (5103)	245	235	275
E8JMR-3A1803CB00	3/0	0.451 (11.5)	0.966 (24.54)	3	0.110 (2.79)	2.544 (64.6)	3916 (5827)	280	270	315
E8JMR-4A1803CB00	4/0	0.507 (12.9)	1.022 (25.96)	3	0.110 (2.79)	2.665 (67.7)	4475 (6659)	320	305	360
E8JMR-A11803CB00	250	0.552 (14.0)	1.068 (27.13)	2	0.110 (2.79)	2.824 (71.7)	5168 (7690)	350	335	400
E8JMR-A31803CB00	350	0.654 (16.6)	1.171 (29.74)	2	0.140 (3.55)	3.045 (77.3)	6289 (9359)	430	400	490
E8JMR-A61803CB00	500	0.781 (19.8)	1.299 (32.99)	1	0.140 (3.55)	3.320 (84.3)	8102 (12057)	525	485	600
E8JMR-B21803CB00	750	0.958 (24.3)	1.478 (37.50)	1/0	0.140 (3.55)	3.610 (91.7)	10978 (16337)	635	585	745

<sup>1</sup>The dimensions and weights shown are nominal and subject to industry standards and manufacturing tolerances. Other designs are available upon request.

<sup>2</sup>Ampacities are in accordance with NEC table 310.60(C)(75), Type MV-105, 5001-35000 Volts, for tray or conduit in air.

<sup>3</sup>Ampacities are in accordance with NEC table 310.60(C)(79), Type MV-105, 5001-35000 Volts, for underground duct, one circuit.

<sup>4</sup>Ampacities are in accordance with NEC table 310.60(C)(71), Type MV-105, 5001-35000 Volts, for in air (tray).

Rev 10/16  
Ed 13.0

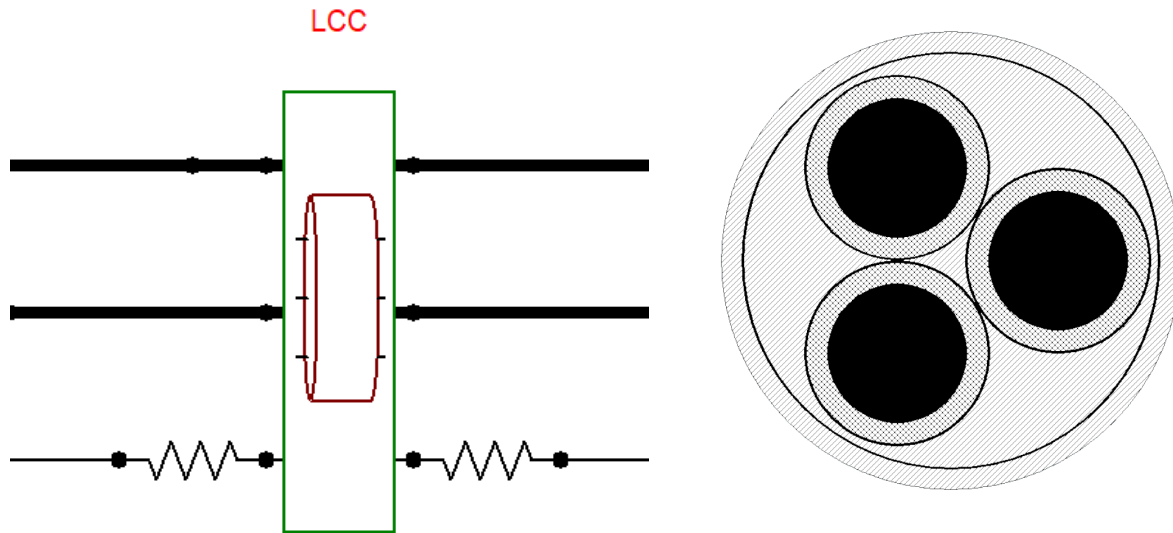
All information, content, data, specifications, packaging and part numbers detailed herein are subject to change. For the most up-to-date information, please visit [SuperiorEssex.com](http://SuperiorEssex.com). Purchase of this product is subject exclusively to the then current Superior Essex International LP Terms and Conditions of Sale for Communications and Energy Cable, Wire and Connectivity Products, which can be found on our website, [SuperiorEssex.com](http://SuperiorEssex.com), or provided to you upon request.

800.249.0014  
[superioressex.com](http://superioressex.com)



A-51

Εικόνα 14. Δεύτερη σελίδα του datasheet του καλωδίου.



Εικόνα 15. Τριπολικό καλώδιο – απεικόνιση στον προεπεξεργαστή ATPDraw.

#### 4.7 Συγχρονισμός

Για την τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας των πλοίων από το δίκτυο της ξηράς, χρησιμοποιούνται δύο τρόποι. Ο πρώτος εξ αυτών, υποδεικνύει την απενεργοποίηση των γεννητριών του πλοίου, ενώ κατά την εφαρμογή του δεύτερου, χρειάζεται οι γεννήτριες να παραμείνουν ενεργές και να συγχρονιστούν με το δίκτυο της ξηράς, με σκοπό την αδιάκοπη μεταφορά ισχύος. Κατά την πρώτη μέθοδο, υπάρχει πιθανότητα να προκύψουν διακοπές ρεύματος, φθείροντας, έτσι, τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού και την αξιοπιστία του. Συνεπώς, κρίνεται αναγκαίος ο συγχρονισμός των γεννητριών, τόσο του πλοίου όσο και του συστήματος τροφοδοσίας της ξηράς, ανεξαρτήτως το είδος του πλοίου. Αναλυτικότερα, η διαδικασία συγχρονισμού αφορά τη μετάβαση από την αυτόνομη λειτουργία του πλοίου, στην κατάσταση ηλεκτρικής τροφοδοσίας από το δίκτυο της ξηράς. Ο πρώτος τρόπος συγχρονισμού, ο οποίος ονομάζεται ship-to-shore, πραγματοποιείται η τεχνική σύνδεση των γεννητριών στο σταθερό δίκτυο, έχοντας παρόλα αυτά ως μειονέκτημα, την άμεση εξάρτηση από τις ηλεκτρομηχανικές χρονικές σταθερές, οι οποίες αναφέρονται στην αδράνεια των κινητήρων και των σύγχρονων γεννητριών που υπάρχουν στο πλοίο.

Ο δεύτερος τρόπος συγχρονισμού, ο οποίος καλείται shore-to-ship, γίνεται μέσω του μετατροπέα συχνότητας, συγχρονίζοντας τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του δικτύου με εκείνα του

πλοίου. Ακόμη και σε αυτόν τον τρόπο συγχρονισμού, οι χρονικές ηλεκτρικές σταθερές των κυκλωμάτων των ηλεκτρονικών ισχύος επηρεάζουν τη διαδικασία, αλλά με μικρότερη καθυστέρηση συγκριτικά με την πρώτη περίπτωση. Η διαδικασία συγχρονισμού, επιτυγχάνεται μέσω του συγχρονισμού της φάσης και της συχνότητας, μεταξύ δικτύου και πλοίου, μία διαδικασία που ορίζει ότι οι ενεργές τιμές των πολικών τάσεων γεννήτριας του πλοίου και δικτύου πρέπει να είναι ίδιες, καθώς και η διαδοχή φάσεων των γεννητριών πλοίου και δικτύου να είναι ίδιες. Η συχνότητα των τάσεων της γεννήτριας, πρέπει να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από τη συχνότητα του δικτύου, όπως επίσης και οι rms τιμές μίας φασικής τάσης γεννητριών πλοίου και δικτύου να είναι όμοιες. Τέλος, απαιτείται κατάλληλη πηγή τροφοδοσίας από τις γεννήτριες πλοίου στο δίκτυο της ξηράς [55], [56], [57].

#### 4.8 Απαιτήσεις σε ισχύ

Σύμφωνα με έρευνες που πραγματοποιήθηκαν για διαφορετικούς τύπους πλοίων, προέκυψαν τα παρακάτω δεδομένα σε πίνακες:

*Πίνακας 3. Απαιτήσεις σε ενεργό ισχύ για διαφορετικούς τύπους πλοίων*

Τύπος πλοίου:	Μέση απαίτηση ισχύος	Μέγιστη απαίτηση ισχύος	Μέγιστη απαίτηση ισχύος για το 95% των πλοίων
<b>Μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (&lt; 140 m)</b>	170 kW	1000 kW	800 kW
<b>Μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (&gt; 140 m)</b>	1200 kW	8000 kW	5000 kW
<b>Μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (στο σύνολό τους)</b>	800 kW	8000 kW	4000 kW
<b>Ro/Ro και φορτηγά πλοία</b>	1500 kW	2000 kW	1800 kW
<b>Πετρελαιοφόρα και παραγωγά δεξαμενόπλοια</b>	1400 kW	2700 kW	2500 kW
<b>Κρουαζιερόπλοια (&lt; 200 m)</b>	4100 kW	7300 kW	6700 kW
<b>Κρουαζιερόπλοια (&gt; 200 m)</b>	7500 kW	11000 kW	9500 kW
<b>Κρουαζιερόπλοια στο σύνολό τους)</b>	5800 kW	11000 kW	7300 kW

Πίνακας 4. Απαιτήσεις τάσης για διαφορετικούς τύπους πλοίων.

Τύπος πλοίου:	380 V	400 V	440 V	450 V	460 V	6.6 kV	10 kV	11 kV
Μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (< 140 m)	42 %	16 %	42 %	-	-	-	-	-
Μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (> 140 m)	6 %	79 %	-	3 %	-	12%	-	-
Μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (στο σύνολό τους)	19 %	6 %	64 %	2%	-	9%	-	-
Ro/Ro και φορτηγά πλοία	-	30 %	20 %	43 %	7 %	-	-	-
Πετρελαιοφόρα και παραγωγά δεξαμενόπλοια	13 %	-	40 %	47 %	-	-	-	-
Κρουαζιερόπλοια (< 200 m)	14 %	18 %	59 %	9 %	-	-	-	-
Κρουαζιερόπλοια (> 200 m)	-	-	12 %	-	-	48 %	4 %	36 %
Κρουαζιερόπλοια (στο σύνολό τους)	6 %	9 %	34 %	4 %	-	26 %	2 %	19 %

Πίνακας 5. Απαιτήσεις συχνότητας για διαφορετικούς τύπους πλοίων.

Τύπος πλοίου:	50 Hz	60 Hz
Μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (< 140 m)	63 %	37 %
Μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (> 140 m)	6 %	94 %
Μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (στο σύνολό τους)	26 %	74 %
Ro/Ro και φορτηγά πλοία	30 %	70 %
Πετρελαιοφόρα και παραγωγά δεξαμενόπλοια	20 %	80 %



<b>Κρουαζιερόπλοια (&lt; 200 m)</b>	36 %	64 %
<b>Κρουαζιερόπλοια (&gt; 200 m)</b>	-	100 %
<b>Κρουαζιερόπλοια στο σύνολό τους)</b>	17 %	83 %

Μεταξύ άλλων, οι έρευνες που διεξήχθησαν ήταν οι εξής:

- Λιμάνι του Rotterdam, 2006 για 53 container ships
- Στα μεγάλα ευρωπαϊκά λιμάνια και υπό την αιγίδα του Lloyds Register of Ships, για 30 πλοία
- Έρευνα από Environ, με 47 κρουαζιερόπλοια.

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκε να μοντελοποιηθεί μεταφορικό πλοίο (container vessel), έχοντας ως απαίτηση σε ενεργό ισχύ 4MW, τάση συστήματος τα 6.6kV και συχνότητα λειτουργίας 60Hz, βάσει των δεδομένων των παραπάνω πινάκων [43].

## 4.9 Κύκλωμα πλοίου

Το ισοδύναμο κύκλωμα του πλοίου, θεωρείται η απλοποιημένη περίπτωση ενός τριφασικού φορτίου RL σε αστέρα. Το φορτίο του πλοίου, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.5, απορροφά ενεργό ισχύ 4 MW, λειτουργεί στην πολική τάση των 6.6 kV, με συντελεστή ισχύος  $\cos\varphi = 0.8$  (ωμικό-επαγωγικό). Στην Εικόνα 16 φαίνεται το κύκλωμα υλοποιημένο στο πρόγραμμα ATP-EMTP. Οι υπολογισμοί των RL στοιχείων σε σειρά, επιλέγεται ως συχνότητα λειτουργίας του φορτίου στα 60 Hz.

- Φαινόμενη ισχύς S:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \rightarrow S = P \cdot \cos\varphi = 5MVA \quad (11)$$

- Άεργος ισχύς, Q:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = 3MVAr \quad (12)$$

- Φασικό ρεύμα γραμμής:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_{LL_{ship}} \cdot \cos \varphi} = 437.387 A \quad (13)$$

- Σύνθετη αντίσταση:

$$|Z_{OA}| = \frac{V_{ph}}{I_{ph}} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{LL_{ship}}}{I_{ph}} = 26.136 \Omega \quad (14)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + XL^2} \rightarrow$$

$$Z^2 = R^2 + XL^2 = 683.089 \quad (15)$$

$$\tan^{-1} \left( \frac{X_L}{R} \right) = 36.87^\circ \rightarrow$$

$$X_L = 0.75 \cdot R \quad (16)$$

- Η σχέση (15) μέσω της (16) γίνεται:

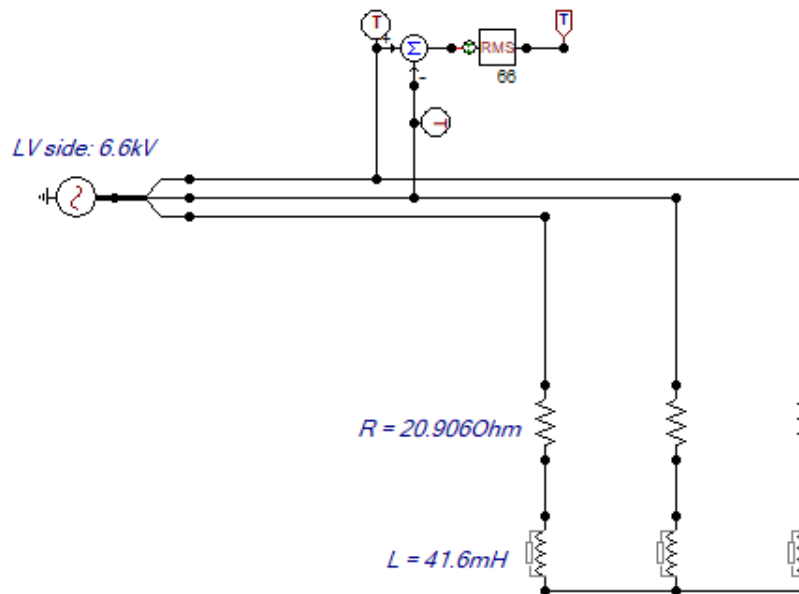
$$1.563 \cdot R^2 = 683.089 \rightarrow R = 20.905 \Omega$$

- Άρα:

$$X_L = 15.679 \Omega$$

- Υπολογισμός επαγωγικού στοιχείου, L:

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{X_L}{2\pi \cdot 60 \text{Hz}} \rightarrow L = 0.0416 H \quad (17)$$



Εικόνα 16. Κυκλωματική αναπαράσταση φορτίου του πλοίου μέσω εργαλείου ATPDraw.

#### 4.10 Εταιρείες που δραστηριοποιούνται στο cold-ironing

Μέχρι στιγμής, δεν είναι πολλές οι εταιρείες που έχουν υλοποιήσει εγκαταστάσεις cold-ironing, ενώ ακόμα λιγότερες είναι εκείνες όπου προμηθεύουν με συστήματα μετατροπής συχνότητας. Παρόλα αυτά, γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση των μεγαλύτερων εταιρειών εξ αυτών.

##### I. ABB

Η ABB αποτελεί έναν από τους κορυφαίους προμηθευτές κεντρικών ηλεκτρικών πινάκων (main switchboards), στον εξοπλισμό πλοίων και λιμανιών παγκοσμίως. Μερικά από τα μεγαλύτερα έργα της ήταν η σχεδίαση και κατασκευή της πρώτης shore-to-ship διασύνδεσης υψηλής τάσης για πλοία Ro-Ro, ενώ ακόμη προμήθευσε εξοπλισμό για διαχείριση και παρακολούθηση της ισχύος εν πλω στη ναυτιλιακή Princess Cruise Lines.

##### II. Siemens

Η εταιρεία Siemens, έχει αναπτύξει δύο συστήματα που αφορούν τη διασύνδεση cold-ironing. Το πρώτο σύστημά της για παροχή ρεύματος από την ξηρά, ονομάζεται SIHARBOR και περιλαμβάνεται στην εγκατάσταση Lübeck. Το δεύτερο σύστημα, σχετίζεται με τη διασύνδεση πλοίων που λειτουργούν στα 60Hz στο ευρωπαϊκό δίκτυο, με όνομα Siplink, επιτρέποντας τη

διασύνδεση ακόμη και όταν υπάρχουν διαφορετικές συχνότητες δικτύου. Το σύστημα Siplink, όμως, παραμένει σε δοκιμαστικό στάδιο, και υπάρχει στο ναυπηγείο στο Flensburg.

### **III. Cavotec**

Η εταιρεία Cavotec, έχοντας εμπειρία 18 χρόνων στις συνδέσεις shore-to-ship, έχει εξοπλίσει 14 πλοία με cable reels, πρίζες (plugs) και υποδοχείς (sockets), ενώ παράλληλα έχει συμμετάσχει σε πολλά έργα παροχής ρεύματος από την ξηρά, παρέχοντας εξοπλισμό που τοποθετείται επάνω στο πλοίο.

### **IV. Sam Electronics**

Η Sam Electronics, έχοντας αναλάβει δράση ήδη από το 2003 στις συνδέσεις shore-to-ship και ειδικότερα σε εξοπλισμούς παροχής ρεύματος, διαθέτει τις περισσότερες αναφορές στην αγορά για λύσεις χαμηλής τάσης (400V), αλλά και υψηλής (6.6kV, 11kV), όπως επίσης σε πλοία container και tanker.

### **V. Terasaki**

Έχοντας αναπτύξει θαλάσσια συστήματα από τη δεκαετία του '90, και έχοντας σχεδιάσει τη σύνδεση υψηλής τάσης για το λιμάνι του Λος Άντζελες, μπορεί να παρέχει εξοπλισμό για τη συχνότητα λειτουργία των 50Hz.

### **VI. Callenberg Engineering Inc.**

Η Callenberg Fläkt Marine (πρώην ABB Fläkt Marine), δραστηριοποιείται στη ναυτιλιακή βιομηχανία επί 70 χρόνια. Έχει προμηθεύσει με καλώδια, ειδικά βύσματα και γερανό για καλώδια υψηλής τάσης, την εταιρεία Princess Cruise Lines, για τη σύνδεση των πλοίων της σε παροχή υψηλής τάσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΕΝΑΝΤΙ ΣΤΟΥΣ ΚΕΡΑΥΝΟΥΣ ΚΑΙ ΤΙΣ ΥΠΕΡΤΑΣΕΙΣ

### 5.1 Εισαγωγή

Οι ηλεκτρικές εκκενώσεις (σπινθήρες), οι οποίες παρατηρούνται στην ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια των καταιγίδων, είναι η οπτική αναπαράσταση των κεραυνών. Η δε προέλευση του φαινομένου του κεραυνού, οφείλεται στη διαφορά δυναμικού μεταξύ αρνητικά φορτισμένων ιόντων στα σύννεφα και θετικά φορτισμένων ιόντων της ξηράς ή της θάλασσας.

Συγκεκριμένα, οι κεραυνοί προέρχονται από ηλεκτρισμένα καταιγιδοφόρα νέφη, τα οποία φορτίζονται μέσω πολύπλοκων φυσικών διεργασιών. Η ηλεκτροδότηση των νεφών συμβαίνει κυρίως μέσω της σύγκρουσης μεταξύ μικρών παγοκρυστάλλων και χαλαζόκοκκων (graupel), σε συνδυασμό με ισχυρά ανοδικά ρεύματα και απότομες θερμοκρασιακές διαφορές. Κατά τις συγκρούσεις αυτές, οι ελαφρύτεροι παγοκρυστάλλοι αποκτούν θετικό φορτίο και μετακινούνται προς το ανώτερο μέρος του νέφους, ενώ οι βαρύτεροι χαλαζόκοκκοι αποκτούν αρνητικό φορτίο και συγκεντρώνονται στα κατώτερα στρώματα [58].

Αυτός ο διαχωρισμός φορτίων, δημιουργεί ισχυρά ηλεκτρικά πεδία στο εσωτερικό του νέφους, με εντάσεις που ενδέχεται να φτάσουν τις μερικές χιλιάδες V/m [59]. Τα πεδία αυτά, επηρεάζουν επίσης την επιφάνεια της γης, προκαλώντας επαγωγικά φορτία κάτω από την καταιγίδα. Όταν το ηλεκτρικό πεδίο γίνεται αρκετά ισχυρό, ώστε να ξεπεράσει τη διηλεκτρική αντοχή του ατμοσφαιρικού αέρα, αρχίζει η διαδικασία της εκκένωσης. Αυτή η ηλεκτρική εκκένωση, γνωστή και ως κεραυνός, μπορεί να έχει ένταση χιλιάδων Αμπέρ [60].

Υπάρχουν διάφορα είδη κεραυνού, τα οποία προκαλούνται από τους φορείς της διαφοράς δυναμικού μεταξύ ανιόντων και κατιόντων. Συγκεκριμένα, κεραυνοί ενδέχεται να ξεσπάσουν:

- Ανάμεσα σε διαφορετικά νέφη,
- Μέσα στο ίδιο το νέφος,
- Ένα νέφος και το έδαφος.

Όσον αφορά τα κεραυνικά πλήγματα που εκδηλώνονται μεταξύ νέφους και εδάφους, υπάρχει διαχωρισμός ανάλογα με τη φορά και το είδος της φόρτισής τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων κεραυνού, είναι κατερχόμενοι και αρνητικοί, ενώ οι ανερχόμενοι κεραυνοί εκκινούν, συνήθως, από αντικείμενα που βρίσκονται σε μεγάλο υψόμετρο (ή τα ίδια έχουν μεγάλο ύψος) και αποτελούν σπάνιο φαινόμενο [61].

Συμπερασματικά, οι παροδικές υπερτάσεις και υπερρεύματα εξαιτίας του φαινομένου του κεραυνού και οι εγγενείς υπερτάσεις που προκαλούνται από συνθήκες σφάλματος στο σύστημα ισχύος ή χειρισμούς των circuit breakers, είναι αναπόφευκτες. Συνεπώς, η ανάλυση του συστήματος cold-ironing θα πρέπει να περιλαμβάνει την μελέτη συντονισμού μονώσεων, η οποία θα πρέπει να αφορά την εκάστοτε ηλεκτρική εγκατάσταση, προκειμένου να εφαρμοστούν τα κατάλληλα σχήματα προστασίας και να αποφευχθεί η αστοχία μόνωσης του εξοπλισμού [62].

Ο κεραυνός επιστημονικά ορίζεται ως μία παροδική (transient) , υψηλού ρεύματος (της τάξεως των kA) ηλεκτρική εκκένωση (electrical discharge), η οποία λαμβάνει χώρα στον αέρα και της οποίας το μήκος είναι της τάξεως των χιλιομέτρων. Η εκκένωση του κεραυνού, ανεξάρτητα με το εάν αφορά χτύπημα στη γη ή όχι, εντοπίζεται στη βιβλιογραφία ως λάμψη κεραυνού (lightning flash) ή αστραπή, ενώ όταν η εκκένωση περιλαμβάνει αντικείμενο είτε στη γη είτε στην ατμόσφαιρα, καλείται κεραυνικό πλήγμα (lightning strike). Τέλος, ο όρος stroke (χτύπημα) ή component stroke, αφορά αποκλειστικά τα τμήματα των εκκενώσεων που προέρχονται από το σύννεφο στο έδαφος.

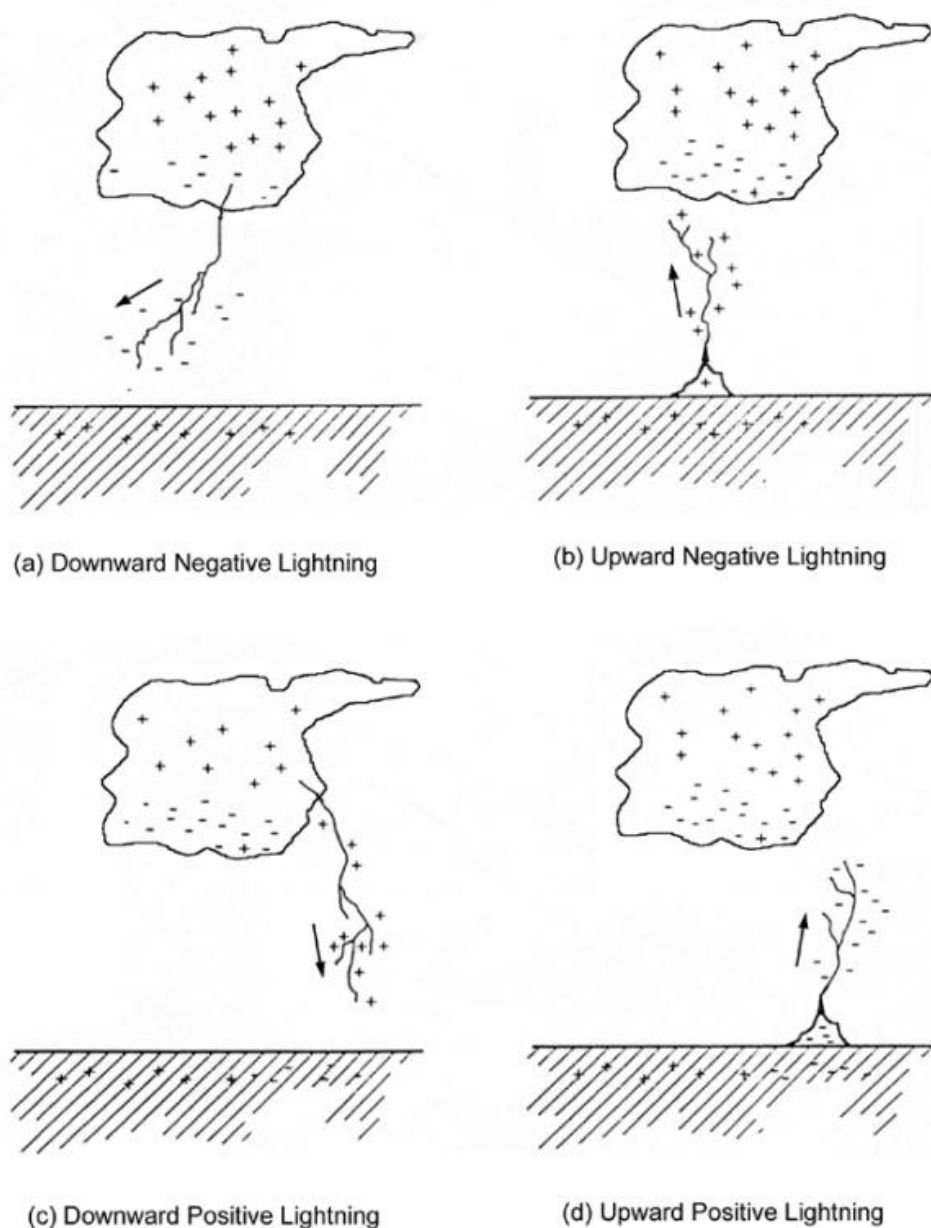
Οι περισσότερες λάμπεις κεραυνού, αποτελούνται από πολλαπλά χτυπήματα, και όλες, εξαιρουμένης της πρώτης, ονομάζονται επακόλουθα χτυπήματα (subsequent). Κάθε κεραυνικό πλήγμα, συνίσταται από μία καθοδική διαδικασία, η επίσημη ορολογία της οποίας είναι leader, και μία ανοδική διαδικασία, η οποία καλείται επίσημα ως return stroke. Ο leader, όντας μία σταδιακή καθοδική εκκένωση, δημιουργεί ένα αγωγίμο κανάλι από το σύννεφο προς το έδαφος, μεταφέροντας αρνητικό φορτίο από το σύννεφο, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, και φορτίζοντας αυτό το κανάλι. Όταν το άκρο του leader, πλησιάσει σε κοντινή απόσταση από το έδαφος, ένα αντίθετο θετικό ρεύμα (upward connecting leader), ξεκινά από το έδαφος και ενώνεται με τον κατερχόμενο leader. Από εκείνη τη στιγμή, αρχίζει την πορεία του το return stroke, το οποίο κινείται από το σημείο επαφής του εδάφους, προς τα πάνω και κατά μήκος του αγωγίμου καναλιού που δημιούργησε η καθοδική εκκένωση. Καθώς αυτό το ρεύμα διαγράφει την πορεία

του, εξουδετερώνει το δυναμικό του καναλιού, απομακρύνοντας το αρνητικό φορτίο του leader και επαναφέροντας την ηλεκτρική ισορροπία μεταξύ νέφους και γης [63].

## 5.2 Τύποι εκκενώσεων του κεραυνού

Ο παγκόσμιος ρυθμός κεραυνικών εκκενώσεων, ανέρχεται σε μερικές δεκάδες έως και εκατό λάμπες ανά δευτερόλεπτο, η πλειοψηφία των οποίων δεν καταφέρνουν να φτάσουν στο έδαφος. Αυτές οι εκκενώσεις ονομάζονται ενδονεφικές εκκενώσεις (cloud flashes) ή ICs (Intra-Cloud discharges), και περιλαμβάνουν εκκενώσεις εντός του ίδιου του νέφους (intracloud), μεταξύ διαφορετικών νεφών (intercloud) και εκκενώσεις από το σύννεφο προς τον αέρα (cloud-to-air). Οι εκκενώσεις μεταξύ νεφών και εδάφους, ονομάζονται εκκενώσεις από το σύννεφο προς το έδαφος (cloud-to-ground discharges – CGs), αποτελώντας περίπου το 25% της παγκόσμιας κεραυνικής δραστηριότητας.

Ανάλογα με την πολικότητα του φορτίου που φτάνει ουσιαστικά στο έδαφος, αλλά και την κατεύθυνση του αρχικού leader, έχουν αναγνωριστεί τέσσερις τύποι εκκενώσεων, μεταξύ σύννεφου και γης. Αυτοί είναι η καθοδική/ανοδική αρνητική εκκένωση και η καθοδική/ανοδική θετική εκκένωση. Οι καθοδικές εκκενώσεις, έχουν διακλαδώσεις προς τα κάτω, ενώ οι ανοδικές έχουν διακλαδώσεις προς τα πάνω. Ακόμη, οι καθοδικές αρνητικές εκκενώσεις, πιστεύεται αποτελούν περίπου το 90% (ή και περισσότερο) των εκκενώσεων τύπου CG, ενώ οι καθοδικές θετικές εκκενώσεις αποτελούν περίπου το 10% ή λιγότερο. Οι ανοδικές εκκενώσεις (αρνητικές ή θετικές), εμφανίζονται μόνο από ψηλά αντικείμενα, συνήθως άνω των 100m, ή από μεσαίου ύψους αντικείμενα σε βουνοκορφές.



Εικόνα 17. Τύποι των ηλεκτρικών εκκενώσεων από το σύννεφο στο έδαφος.

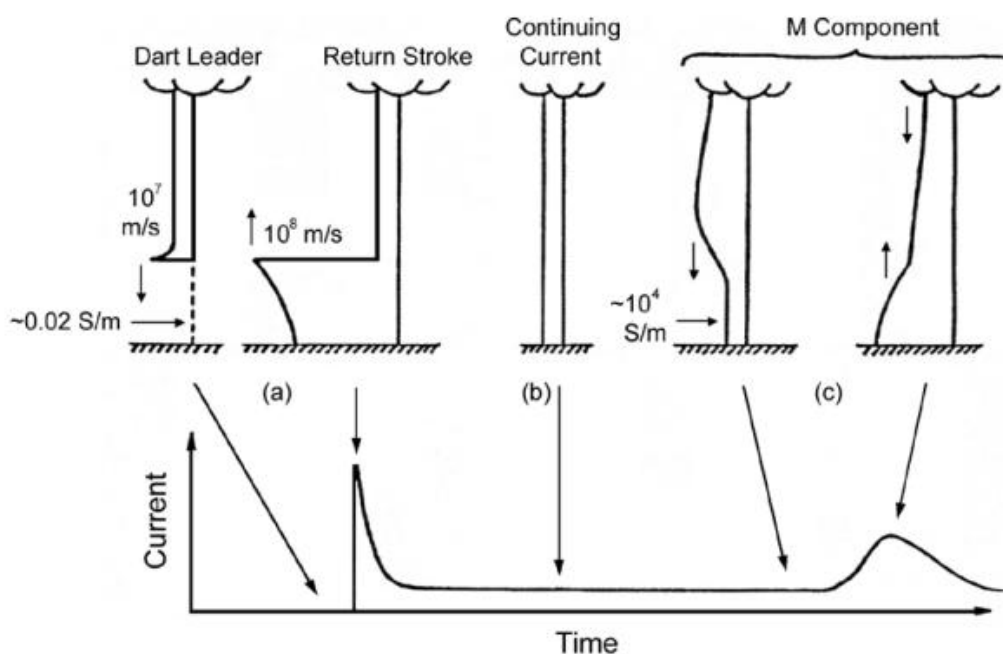
Για την πολικότητα του φορτίου, η λέξη «ουσιαστικά» χρησιμοποιείται, διότι δε μεταφέρονται μεμονωμένα φορτία σε όλο το μήκος του αγώγιμου καναλιού από το σύννεφο στο έδαφος, αλλά αντί για αυτό, η κίνηση ηλεκτρονίων σε ένα σημείο, προκαλεί τη μετακίνηση άλλων ηλεκτρονίων αλλού στο ίδιο κανάλι, σύμφωνα με τον Uman (1987, 2001). Για παράδειγμα, τα ηλεκτρόνια σε ένα return stroke, κινούνται μόνο μερικά μέτρα, ενώ μεταφέρονται συνολικά φορτία της τάξης ενός ή περισσότερων Coulombs στο έδαφος.



Μερικές φορές, κατά τη διάρκεια μιας εκκένωσης, μεταφέρονται τόσο θετικά όσο και αρνητικά ιόντα στο έδαφος. Οι εκκενώσεις αυτές ονομάζονται διπολικές (bipolar discharges), ενώ συνήθως είναι ανοδικού τύπου, προερχόμενες από ψηλά αντικείμενα. Το κανάλι της εκκένωσης, φέρει διακλαδώσεις προς διαφορετικές περιοχές του νέφους, η καθεμία από τις οποίες έχει διαφορετική πολικότητα φορτίου. Παρόλα αυτά, οι καθοδικές διπολικές εκκενώσεις συμβαίνουν αλλά σπανίζουν [63].

### 5.3 Τρόποι μεταφοράς φορτίου προς τη γη

Υπάρχουν τρεις πιθανοί τρόποι μεταφοράς ηλεκτρικού φορτίου προς τη γη κατά τη διάρκεια μιας κεραυνικής εκκένωσης. Η απεικόνισή τους, γίνεται με το παράδειγμα αρνητικών επακόλουθων πληγμάτων (negative subsequent strokes) και είναι οι εξής:



Εικόνα 18. Αναπαράσταση των τριών ειδών μεταφοράς φορτίου προς τη γη, σε συνδυασμό με την κυματομορφή ρεύματος επί το έδαφος.

#### i. Ακολουθία dart leader/return stroke:

Ο κατερχόμενος leader, δημιουργεί αγωγίμο μονοπάτι ανάμεσα στην περιοχή του φορτίου στο νέφος και το έδαφος, εναποθέτοντας αρνητικό φορτίο κατά μήκος του μονοπατιού. Το return stroke που ακολουθεί, διασχίζει την ίδια διαδρομή, αλλά με κατεύθυνση από τη γη προς το

σύννεφο, ώστε να ουδετεροποιήσει το αρνητικό φορτίο του leader. Εν τέλει, οι διαδικασίες του leader και return stroke, εξυπηρετούν στη μεταφορά του αρνητικού φορτίου από το νέφος στη γη.

ii. Continuing currents:

Το συνεχές ρεύμα κεραυνού, μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σχεδόν σταθερό ηλεκτρικό τόξο μεταξύ της περιοχής φόρτισης στο σύννεφο και του εδάφους. Το τυπικό ρεύμα τόξου, είναι δεκάδες ως εκατοντάδες αμπέρ, ενώ μπορεί να διαρκέσει μερικές εκατοντάδες χιλιοστά του δευτερολέπτου (milliseconds).

iii. M-components:

Τα συστατικά-M του κεραυνού, αντιπροσωπεύουν διαταραχές στο συνεχές ρεύμα και στη φωτεινότητα του καναλιού. Φαίνεται ότι κάθε συστατικό-M, περιλαμβάνει υπέρθεση δύο κυμάτων που διαδίδονται προς αντίθετες κατευθύνσεις (Εικόνα 17.c). Η μεταφορά φορτίου μέσω συστατικών-M, απαιτεί την ύπαρξη αγωγίμου καναλιού προς τη γη, το οποίο φέρει συνεχές ρεύμα και λειτουργεί ως δομή καθοδήγησης κύματος. Σε αντιδιαστολή με την ακολουθία dart leader/return stroke, εκείνη συμβαίνει μόνο όταν δεν υπάρχει τέτοιο αγωγίμο μονοπάτι, διότι το μονοπάτι αυτό δημιουργείται εκ νέου από τον leader. Είναι πιθανό ότι, όταν η αγωγιμότητα μειώνεται, το καθοδικό κύμα συστατικού-M να μετατρέπεται σε dart-leader [63].

## 5.4 Μέγιστο ρεύμα κεραυνού

Η στατιστική κατανομή των μέγιστων ρευμάτων των πρώτων χτυπημάτων σε αρνητικές κεραυνικές εκκενώσεις, συμπεριλαμβανομένων των εκκενώσεων ενός μόνο κεραυνικού πλήγματος, αποτελεί βασικό στοιχείο στις περισσότερες μελέτες προστασίας και τα διεθνή πρότυπα που αφορούν τον κεραυνό, καθώς βασίζεται κυρίως σε άμεσες μετρήσεις ρευμάτων κεραυνού, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στην Ελβετία, σε διάρκεια οκτώ ετών (1963 – 1971). Οι αθροιστικές στατιστικές κατανομές των μέγιστων ρευμάτων κεραυνού για αρνητικά/θετικά πρώτα πλήγματα, συνδυασμό αρνητικών και θετικών πρώτα πλήγματα και αρνητικών επακόλουθων πληγμάτων (subsequent strokes), θεωρούνται λογαριθμικά κανονικές (log-normal), επειδή είναι θετικά ασύμμετρες [63].

Αξίζει να σημειωθεί ότι, παρόλο που οι άμεσα μετρημένες κυματομορφές ρεύματος, ανεξαρτήτου πολικότητας, δεν υπερβαίνουν τα 300 kA, ενώ οι έμμεσες εκτιμήσεις από

απομακρυσμένες μετρήσεις ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, υποδεικνύουν την πιθανή ύπαρξη ρευμάτων έως 500 kA ή και υψηλότερης τιμής. Ακόμη, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι εκτιμήσεις μέγιστου ρεύματος από το Εθνικό Δίκτυο Ανίχνευσης Κεραυνών των Η.Π.Α. (NLDN) και παρόμοιων συστημάτων, βασίζονται σε εμπειρικό τύπο όπου η εγκυρότητα έχει ελεγχθεί, μέσω πρόκλησης κεραυνού στη Φλόριντα και ειδικά εξοπλισμένου πύργου μέτρησης κεραυνών στην Αυστρία, μόνο για αρνητικά επακόλουθα πλήγματα [63].

Η λογαριθμική κανονική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για το μέγιστο ρεύμα  $I$  σύμφωνα με την CIGRE, δίνεται από τον τύπο:

$$f(I) = \frac{1}{I \cdot \beta \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) \quad (18)$$

Όπου:

$$z = \frac{\ln(I) - \text{Mean}(\ln I)}{\beta} \quad (19)$$

Η πιθανότητα το μέγιστο ρεύμα να υπερβεί μία συγκεκριμένη τιμή  $I$  κατά IEEE, δίνεται από την εξίσωση:

$$P(I) = \int_I^{\infty} \frac{1}{I \cdot \beta \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dI \quad (20)$$

Η πιθανότητα αυτή, μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$P(I) = 1 - \Phi(z) = \frac{1}{2} \cdot \text{erfc}\left(\frac{z}{\sqrt{2}}\right) \quad (21)$$

Όπου  $\Phi(z)$  είναι η αθροιστική κατανομή της τυπικής κανονικής κατανομής και η  $\text{erfc}$  είναι η συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος.

Σύμφωνα με τα στατιστικά στοιχεία, μόνο μικρό ποσοστό των αρνητικών πρώτων πληγμάτων κεραυνών, έχουν μέγιστο ρεύμα άνω των 100 kA, ενώ περίπου το 20% των θετικών χτυπημάτων έχει παρατηρηθεί να υπερβαίνει τα 100 kA. Ακόμη, πιστεύεται ότι λιγότερο από το 10% των κεραυνών που προέρχονται από το σύννεφο προς γη, σε παγκόσμια κλίμακα, είναι θετικοί. Τέλος, τα επακόλουθα πλήγματα (subsequent strokes), είναι εν γένει λιγότερο ισχυρά, ως προς το μέγιστο ρεύμα κεραυνού, οπότε συχνά παραλείπονται από τις μελέτες προστασίας.

Οι κατανομές του μέγιστου ρεύματος κεραυνού που χρησιμοποιούνται στα εθνικά και διεθνή πρότυπα προστασίας, βασίζονται κυρίως στα δεδομένα του Berger και σε επεκτάσεις τους. Οι δύο κυριότερες και πλέον αναγνωρίσιμες κατανομές, είναι εκείνες οι οποίες προτείνονται από τους οργανισμούς CIGRE και IEEE.

Η κατανομή CIGRE, στηρίζεται στα αρχικά δεδομένα του Berger, τα οποία εμπλουτίστηκαν με μετρήσεις από τη Νότια Αφρική και έμμεσες μετρήσεις από άλλες χώρες. Χαρακτηρίζεται από δύο λοξές ευθείες γραμμές, οι οποίες έχουν ως σημείο τομής τα 20kA. Όσον αφορά τα αρνητικά πρώτα πλήγματα, η κατανομή CIGRE δείχνει ότι το 98% των ρευμάτων, υπερβαίνει τα 4kA, το 80% τα 20kA, ενώ το 5% τα 90kA [63].

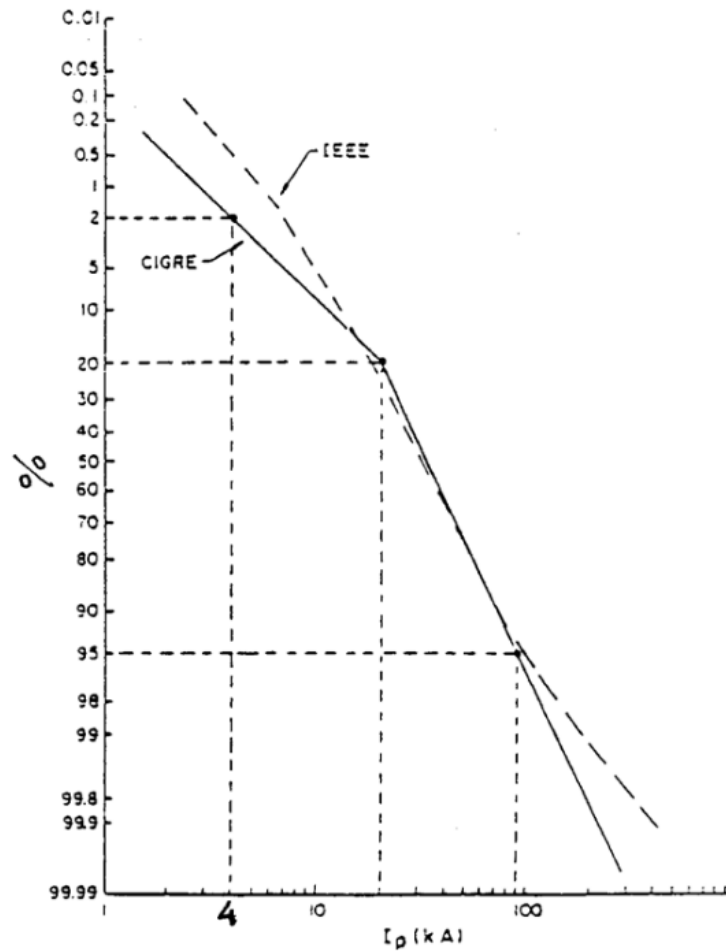
Από την άλλη πλευρά, η κατανομή IEEE, όπως περιλαμβάνεται στα πρότυπα IEEE Std 1243-1997, IEEE Std 1410-2010, βασίζεται σε εργασία του Popolansky (1972), η οποία συνδυάζει άμεσες και έμμεσες μετρήσεις από οκτώ χώρες συνολικά [63].

Η βασική εξίσωση της πιθανότητας υπέρβασης, με μέγιστο ρεύμα  $I$  (kA), για τα πρώτα αρνητικά κεραυνικά πλήγματα, δίνεται από τον μαθηματικό τύπο:

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}} \quad (22)$$

Για τα αρνητικά επακόλουθα κεραυνικά πλήγματα, χρησιμοποιείται η εξίσωση της κατανομής του μέγιστου ρεύματος από την IEEE:

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{12}\right)^{2.7}} \quad (23)$$



Εικόνα 19. Αθροιστικές Στατιστικές κατανομές των μέγιστων ρευμάτων, βάσει CIGRE και IEE [70].

Ακολουθεί ο Πίνακας 6 κατανομών ρεύματος, οι οποίες υπολογίστηκαν μέσω των εξισώσεων της IEEE για αρνητικά πρώτα και επακόλουθα κεραυνικά πλήγματα.

Πίνακας 6. Υπολογισμένες κατανομές ρεύματος, βάσει εξισώσεων IEEE.

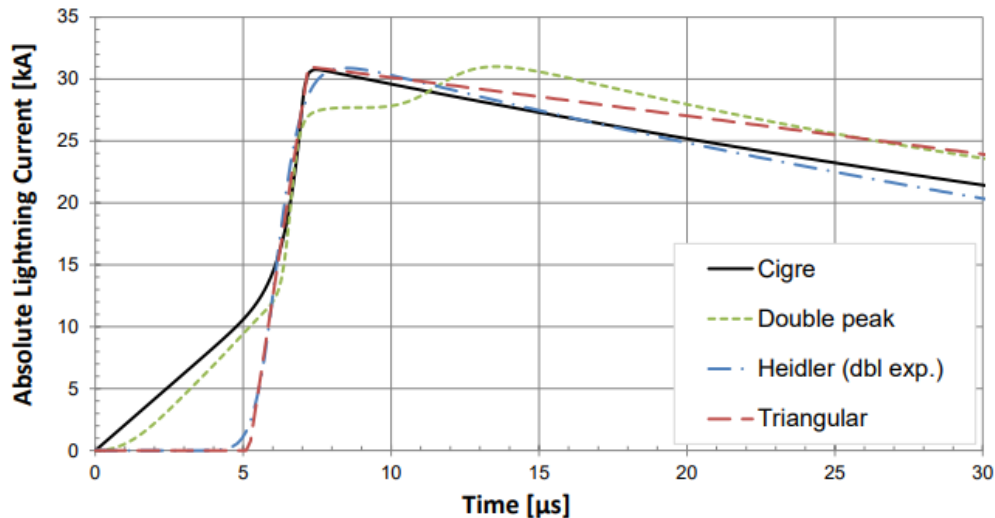
Μέγιστο ρεύμα, I, kA		5	10	20	40	60	80	100	200
Ποσοστό που υπερβαίνει την τιμή $P(I) \cdot 100\%$	Πρώτα κεραυνικά πλήγματα	99	95	76	34	15	7.8	4.5	0.78
	Επακόλουθα κεραυνικά πλήγματα	91	62	20	3.7	1.3	0.59	0.33	0.050

## 5.5 Απεικονίσεις κυματομορφής ρεύματος πρώτου κεραυνικού πλήγματος

Έχουν σχεδιαστεί διάφορες κυματομορφές, με σκοπό την αναπαράσταση των βασικών χαρακτηριστικών των ρευμάτων επιστροφής του πρώτου κεραυνικού πλήγματος (first return stroke currents), όσον αφορά τις μελέτες συμπεριφοράς του κεραυνού [71].

Ακολουθεί μία συνοπτική λίστα αυτών των κυματομορφών:

- Η CIGRE και η IEEE, πρότεινε μία τριγωνικού τύπου κυματομορφή, της οποίας η συνάρτηση είναι ramp-slope (κλίση «ράμπας»), μετώπου 2  $\mu$ s, με σκοπό τους απλούστερους υπολογισμούς της κεραυνικής επίδοσης. Ο γραμμικός χρόνος ανόδου, επιλέχθηκε ώστε το μέτωπο του κύματος να έχει τη μέγιστη απότομη μεταβολή ( $S_m - steepness$ ).
- Η διπλό-εκθετική κυματομορφή, μετώπου 2 $\mu$ s, έχει χρησιμοποιηθεί κατά κύριο λόγο, για την αποφυγή επιπλέον μεταβατικών φαινομένων, τα οποία προκαλούνται από την ασυνέχεια που φέρει το μέγιστο σημείο στην κυματομορφή τύπου ramp-slope. Πέραν τούτου, η διπλό-εκθετική κυματομορφή, χρησιμοποιείται γιατί μπορεί να αναπαραχθεί εύκολα σε εργαστήρια υψηλών τάσεων. Όμως, επειδή η μέγιστη τιμή της  $S_m$  εμφανίζεται την χρονική στιγμή ίση με το μηδέν, δηλαδή ξεκινάει από το μηδέν με πολύ απότομη κλίση, δεν αποτελεί ρεαλιστική απεικόνιση του μετώπου ρεύματος του πρώτου κεραυνικού χτυπήματος.
- Η κυματομορφή CIGRE-concave, χρησιμοποιώντας ξεχωριστές εξισώσεις, για την ανεξάρτητη απεικόνιση του μετώπου και της ουράς του ρεύματος, έχει βρει ευρεία εφαρμογή.
- Η συνάρτηση Heidler, έχει αναπτυχθεί για βελτιωμένη αναπαράσταση του μετώπου του κύματος, χρησιμοποιώντας μία μαθηματική εξίσωση, η οποία είναι συνεχώς παραγωγίσιμη, ενώ η  $S_m$  εμφανίζεται στο 50% της κορυφής της κυματομορφής.
- Η κυματομορφή της διπλής κορυφής (Double-peaked), είναι άθροισμα επτά συναρτήσεων Heidler, και σχεδιάστηκε για να αναπαράγει τη μέση τιμή όλων των σχετικών παραμέτρων που αφορούν το πλάτος και τον χρόνο των ρευμάτων επιστροφής πρώτου κεραυνικού χτυπήματος.



Εικόνα 20. Απεικονίσεις των κυματομορφών ρεύματος επιστροφής πρώτων κεραυνικών πληγμάτων (Τριγωνική, Διπλό-εκθετική, CIGRE-concave, Double-peaked) [71].

Η κυματομορφή που επιλέγεται για την αναπαράσταση του ρεύματος πρώτου κεραυνικού πλήγματος, θα πρέπει να εμφανίζει τη μέγιστη απότομη μεταβολή ( $S_m$ ) του μετώπου, λίγο πριν την πρώτη μέγιστη τιμή του ρεύματος, εφόσον αυτό είναι το χειρότερο σενάριο. Κυματομορφές που πληρούν αυτό το κριτήριο είναι η τριγωνική κυματομορφή τύπου ramp-slope, η καμπύλη CIGRE και η κυματομορφή της διπλής κορυφής (Double-peaked) [71].

Μία ακόμη κρίσιμη παράμετρος, είναι ο χρόνος μετώπου. Σε γραμμές μεταφοράς όπου υπάρχουν αγωγοί προστασίας (shield wires), ένα μέρος του ρεύματος κεραυνού, διαδίδεται κατά μήκος αυτών των αγωγών προς γειτονικές δομές, όπου αργότερα βρίσκει διέξοδο στη γη μέσω ηλεκτροδίων γείωσης και των θεμελίων της εγκατάστασης. Έτσι, δημιουργούνται αρνητικά ανακλώμενα κύματα, τα οποία επιστρέφουν στον πύργο όπου προηγουμένως είχε χτυπηθεί από κεραυνό, και μειώνουν τη μέγιστη τάση του όταν φτάσουν στο σημείο αυτό [71].

Ο ελάχιστος απαιτούμενος χρόνος, για να φτάσει μία τέτοια ανάκλαση, είναι τουλάχιστον διπλάσιος του χρόνου διαδρομής μεταξύ δύο πύργων (span), και για τυπικές γραμμές μεταφοράς αυτός ο χρόνος είναι μερικά microseconds ( $10^{-6}$ ). Για κυματομορφές με μεγάλο χρόνο μετώπου, ενδέχεται οι ανακλάσεις από γειτονικούς πύργους να προλάβουν να φτάσουν στον πύργο που χτυπήθηκε από τον κεραυνό, πριν το ρεύμα κορυφωθεί. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της μέγιστης τάσης αυτού του πύργου. Στον αντίποδα, οι κυματομορφές με μικρό χρόνο μετώπου, δεν προλαβαίνουν να φτάσουν έγκαιρα στον πύργο που χτυπήθηκε, έχοντας για αυτό τον λόγο, μικρότερη επίδραση [64].

## 5.6 Ακραίες καταγεγραμμένες τιμές των παραμέτρων κεραυνού

Οι κυματομορφές ρεύματος κεραυνού, καταγράφηκαν για πρώτη φορά από τους Stekolnikov και Valeev το 1937, και αργότερα από τους Davis και Standring το 1947. Ύστερα, ακολούθησαν οι μετρήσεις από το Empire State Building της Νέας Υόρκης, από τον McEachron το 1939 και 1941, και από τους Hagenguth και Anderson το 1952 [65].

Από το διάστημα που έχει μεσολαβήσει από τις μετρήσεις του τότε μέχρι σήμερα, έχει συλλεχθεί σημαντικός όγκος δεδομένων από έρευνες και εργασίες, μερικές από τις οποίες είναι των:

- Berger (1967),
- Garbagnati, Lo Piparo (1982),
- Miyake et al. (1992),
- Depasse (1994),
- Rakov et al. (2005),
- Diendorfer et al. (2009),
- Schoene et al. (2009),
- Visacro et al. (2012),
- Romero et al. (2013)

Όσον αφορά την καταγραφή των κεραυνών, ανάλογα με τον τύπο του σταθμού παρατήρησης, δύνανται να παρατηρηθούν διαφορετικά είδη εκκενώσεων κεραυνού. Συγκεκριμένα, οι ερευνητικοί πύργοι κεραυνών που βρίσκονται σε ορεινές περιοχές, δέχονται συχνότερα χτυπήματα κεραυνών, επομένως συλλέγουν μεγαλύτερο αριθμό δεδομένων σε σύντομο χρονικό διάστημα. Η πλειοψηφία των κεραυνών στους πύργους αυτούς, είναι ανοδικού τύπου [65].

Επιπρόσθετα, οι πύργοι μεταφοράς ισχύος και οι ανεμογεννήτριες, όπου βρίσκονται σε επίπεδο έδαφος, είναι πιο σπάνια δέκτες κεραυνών, παρόλα αυτά συμβάλλουν στη χαρτογράφηση των καθοδικών εκκενώσεων, δεδομένου ότι παρατηρούνται πιο συχνά σε αυτές τις δομές [65].



Τέλος, στους σταθμούς όπου οι κεραυνοί προκαλούνται με τεχνητό τρόπο (triggered lightning), έχουν συλλεχθεί στοιχεία, όχι μόνο για τη συγκεκριμένη μορφή εκκένωσης, αλλά και γενικότερα φαινόμενα που αφορούν τις παραμέτρους του κεραυνού. Άλλωστε, όπως αναφέρεται και από μελέτη του Jerauld και άλλων το 2007, οι φυσικές καθοδικές εκκενώσεις που είναι σύμφωνες με τα πρώτα κεραυνικά πλήγματα, παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά με τις τεχνητές εκκενώσεις, μετά το αρχικό στάδιο [65].

Ακολουθούν Πίνακες 7-13 που περιέχουν, είτε έμμεσες είτε άμεσες μετρήσεις στο πεδίο, για τις παραμέτρους του κεραυνού, δίνοντας έμφαση στις μεγαλύτερες εξ αυτών τιμές.

Πίνακας 7. Μέγιστα μετρούμενα ρεύματα κεραυνού.

Τύπος κεραυνού:	Αρνητικός (kA)	Θετικός (kA)
LLS	957	580
Ανοδικός	100	340
Καθοδικός	200	208
Τεχνητός	77	132

Πίνακας 8. Μέγιστοι μετρούμενοι χρόνοι μετώπου.

Τύπος κεραυνού	Αρνητικός (μs)		Θετικός(μs)	
	min	max	min	max
Ανοδικός	0.1	2000	0.2	10000
Καθοδικός	0.3	28	-	-
Τεχνητός	0.2	5.7	-	-

Πίνακας 9. Μέγιστοι μετρούμενοι χρόνοι ημίσεως εύρους.

Τύπος κεραυνού	Αρνητικός (μs)		Θετικός(μs)	
	min	max	min	max
Ανοδικός	3	4000	6	10000
Καθοδικός	6.5	280	-	-
Τεχνητός	4	103.2	-	-

Πίνακας 10. Μέγιστες μετρούμενες απότομες κλίσεις ρεύματος.

Τύπος κεραυνού:	Αρνητικός (kA/μs)	Θετικός (kA/μs)
Ανοδικός	150	70
Καθοδικός	76	-
Τεχνητός	411	-

Πίνακας 11. Μέγιστοι μετρούμενοι χρόνοι συνολικής διάρκειας κεραυνών.

Τύπος κεραυνού:	Αρνητικός (ms)	Θετικός (ms)
Ανοδικός	1937	370
Καθοδικός	1928	795
Τεχνητός	0.3	-

Πίνακας 12. Μέγιστα μετρούμενα φορτία κεραυνού.

Τύπος κεραυνού:	Αρνητικός (C)	Θετικός (C)
Ανοδικός	1000	3000
Καθοδικός	126	1311
Τεχνητός	243	640

Πίνακας 13. Μέγιστες τιμές ολοκληρώματος του τετραγώνου του ρεύματος ως προς τον χρόνο.

Τύπος κεραυνού:	Αρνητικός ( $10^3 A^2 s$ )	Θετικός ( $10^3 A^2 s$ )
Ανοδικός	500	36000
Καθοδικός	213	-
Τεχνητός	41.8	-

Τέλος, όσον αφορά την πολλαπλότητα σε έναν κεραυνό (multiplicity), η οποία αναφέρεται στον αριθμό των return strokes που περιλαμβάνει μία μόνο αστραπή, έχει καταγραφεί ως υψηλότερη τιμή τα 69 strokes/flash στην Ελβετία για ανοδικό κεραυνό (Romero et al, 2013), ενώ για καθοδικό κεραυνό έχει καταγραφεί ως υψηλότερη τιμή τα 26 strokes/flash (Kitagawa et al. 1962) στις Η.Π.Α. Αμφότεροι οι κεραυνοί, ήταν αρνητικής πολικότητας. [65]

## 5.7 Κυματομορφές προτύπου

Σύμφωνα με το Annex B, του προτύπου IEC 62305-1, οι κυματομορφές των κεραυνικών πληγμάτων, οι οποίες αφορούν το πρώτο κεραυνικό πλήγμα με 10/350μs, το πρώτο αρνητικό κεραυνικό πλήγμα με 1/200μs και τα αρνητικά επακόλουθα κεραυνικά χτυπήματα με 0.25/100μs, μπορούν να οριστούν βάσει της παρακάτω εξίσωσης:

$$i = \frac{I}{k} \times \frac{\left(\frac{t}{T_1}\right)^{10}}{1 + \left(\frac{t}{T_1}\right)^{10}} \times \exp\left(\frac{-t}{T_2}\right) \quad (24)$$

Όπου:

- $I$  είναι η μέγιστη τιμή του ρεύματος,

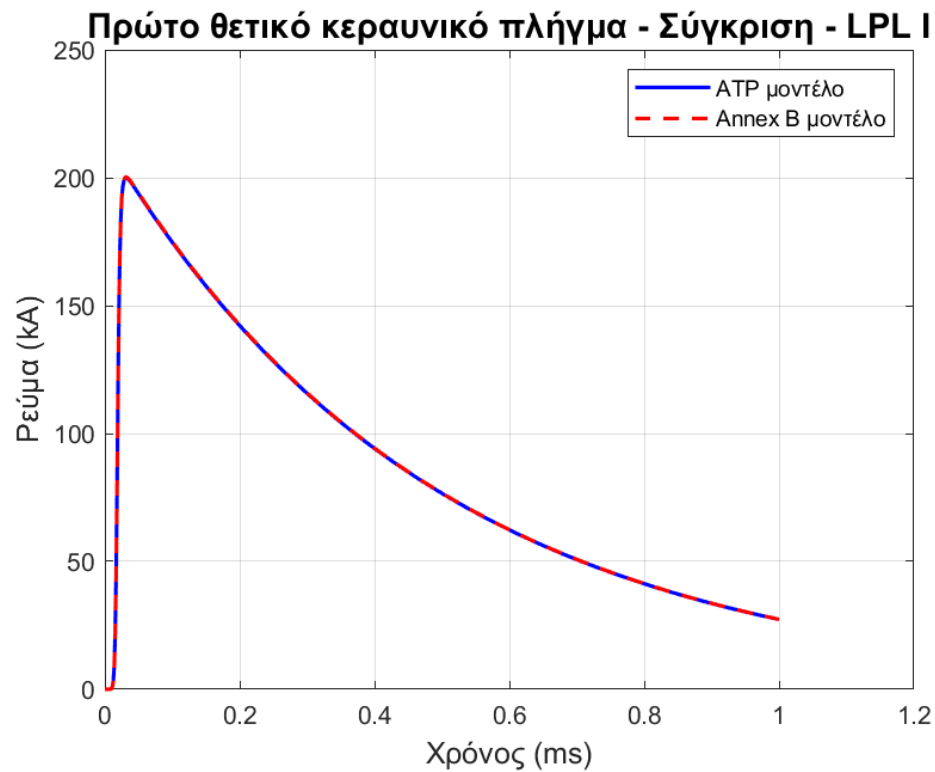
- $k$  είναι ο συντελεστής διόρθωσης για τη μέγιστη τιμή του ρεύματος,
- $t$  είναι ο χρόνος,
- $T_1$  είναι ο χρόνος μετώπου,
- $T_2$  είναι ο χρόνος ουράς.

Επιπλέον, για τις κυματομορφές ρεύματος του πρώτου αρνητικού και θετικού κεραυνικού πλήγματος, αλλά και των επακόλουθων αρνητικών κεραυνικών χτυπημάτων, για διαφορετικά είδη LPL (Lightning Protection Level), έχει οριστεί ο Πίνακας 14, του οποίου οι παράμετροι εφαρμόζονται στην παραπάνω εξίσωση:

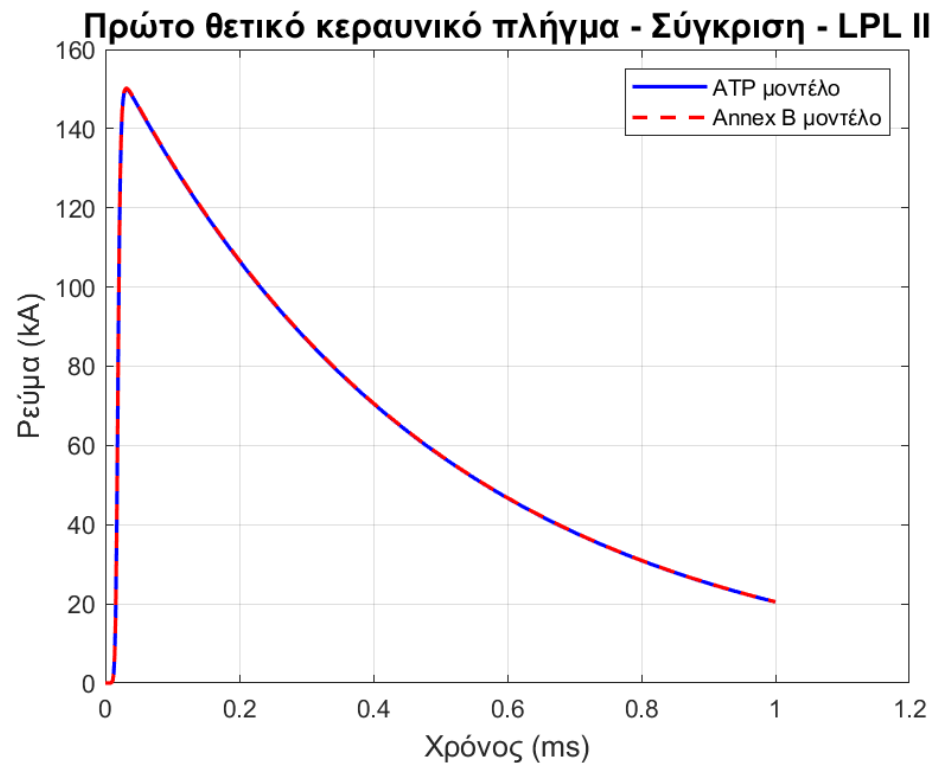
Πίνακας 14. Παράμετροι κεραυνού, για διαφορετικά LPL [66]..

Παράμετροι	Πρώτο θετικό πλήγμα			Πρώτο αρνητικό πλήγμα			Επακόλουθα αρνητικά πλήγματα		
	LPL			LPL			LPL		
	I	II	III-IV	I	II	III-IV	I	II	III-IV
$I$ (kA)	200	150	100	100	75	50	50	37.5	25
$k$	0.93	0.93	0.93	0.986	0.986	0.986	0.993	0.993	0.993
$T_1$ (μs)	19	19	19	1.82	1.82	1.82	0.454	0.454	0.454
$T_2$ (μs)	485	485	485	285	285	285	143	143	143

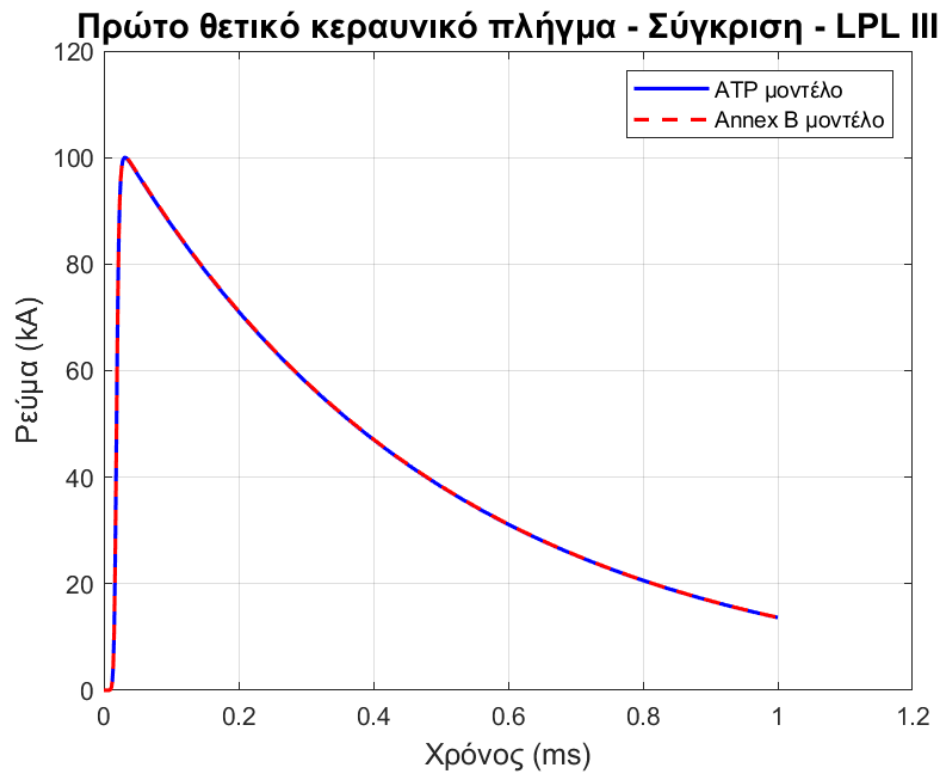
Ακολουθεί η σύγκριση των κυματομορφών (Εικόνα 21 – 29), ορισμένων από το πρότυπο, με τις κυματομορφές της μοντελοποίησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας:



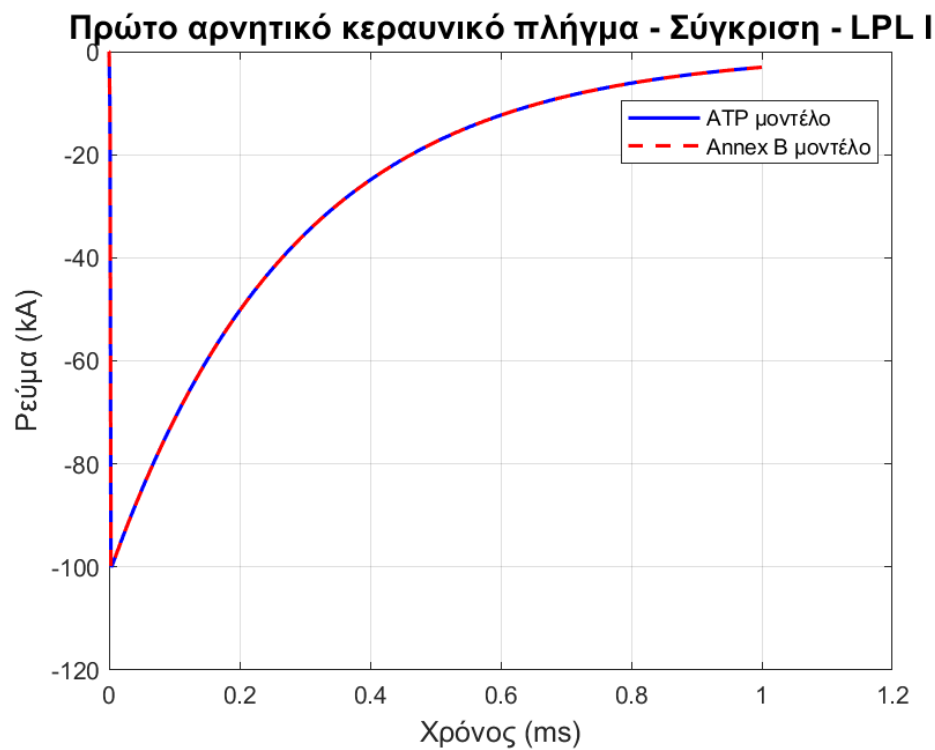
Εικόνα 21. Απεικόνιση, σε κοινούς άξονες, κυματομορφών προτύπου IEC 62305-1 και μοντελοποιημένων πηγών μέσω εργαλείου ATPDraw – Σύγκριση πρώτου θετικού κεραυνικού πλήγματος, LPL-I.



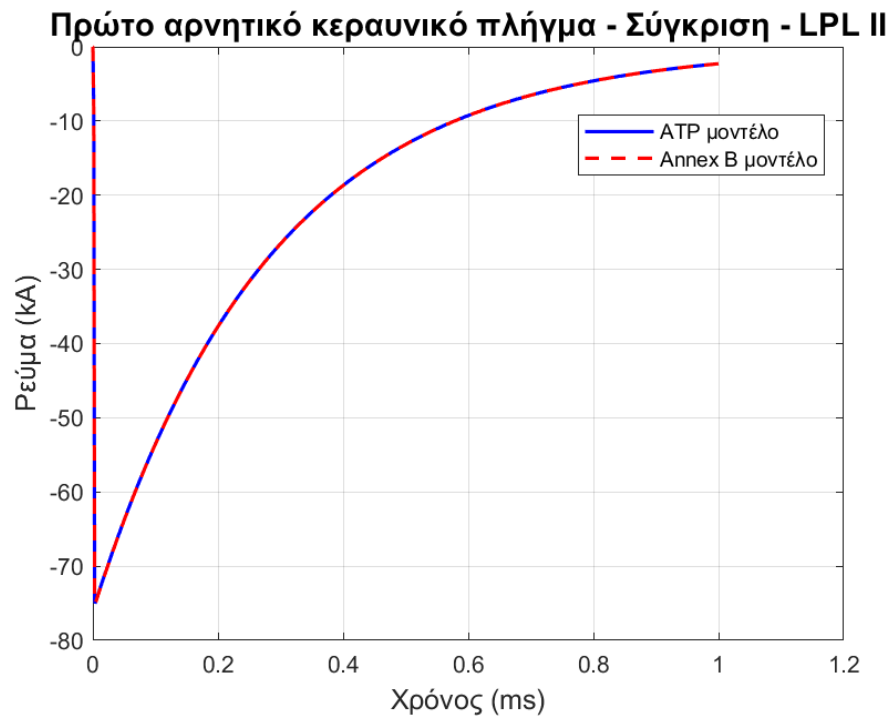
Εικόνα 22. Απεικόνιση, σε κοινούς άξονες, κυματομορφών προτύπου IEC 62305-1 και μοντελοποιημένων πηγών μέσω εργαλείου ATPDraw – Σύγκριση πρώτου θετικού κεραυνικού πλήγματος, LPL-II.



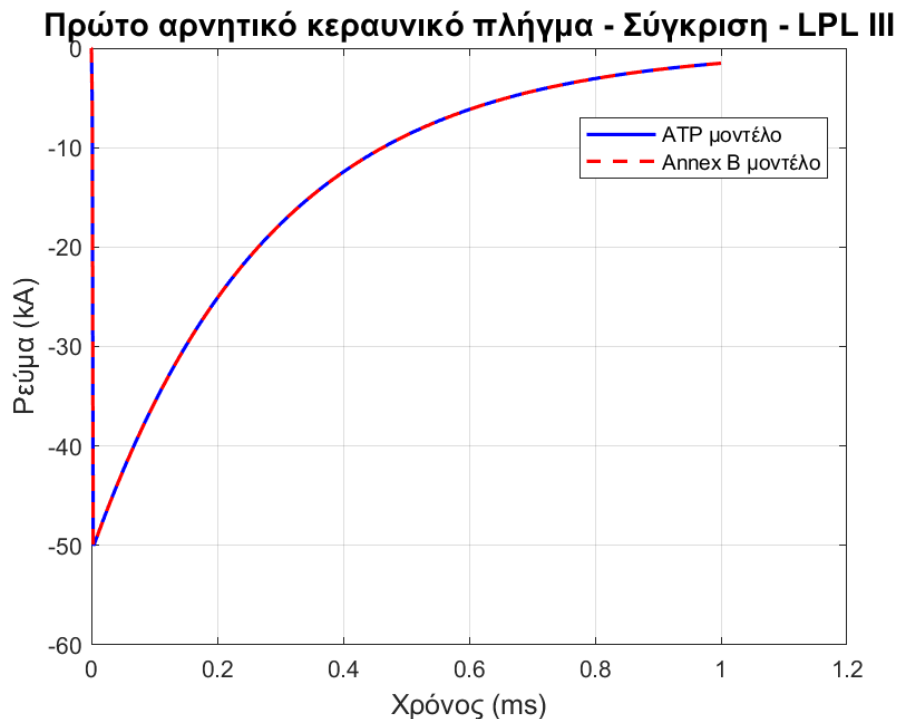
Εικόνα 23. Απεικόνιση, σε κοινούς άξονες, κυματομορφών προτύπου IEC 62305-1 και μοντελοποιημένων πηγών μέσω εργαλείου ATPDraw – Σύγκριση πρώτου θετικού κεραυνικού πλήγματος, LPL-III.



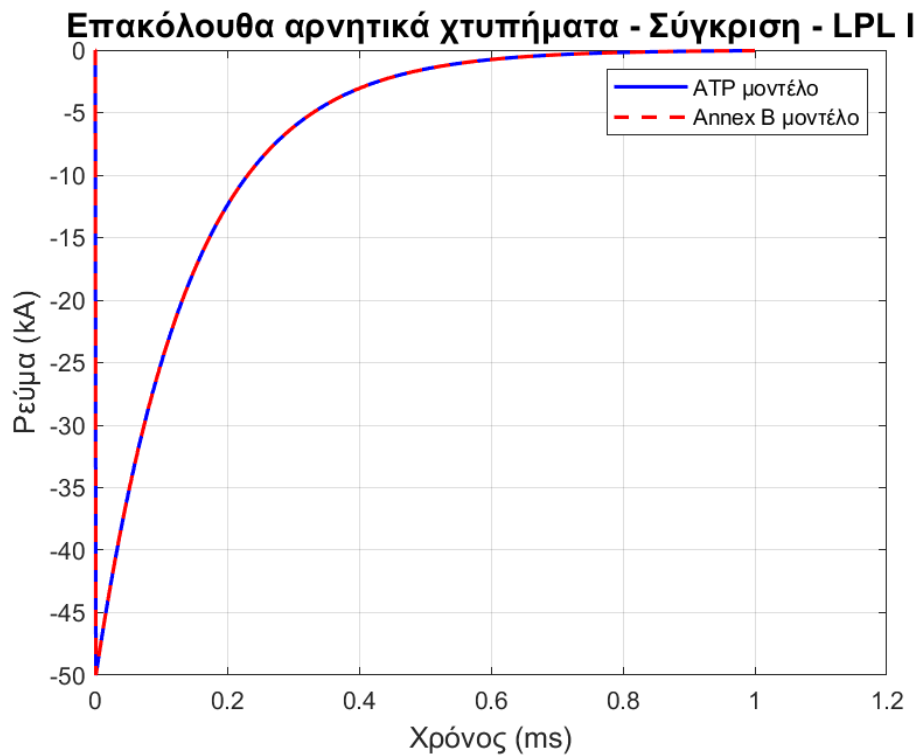
Εικόνα 24. Απεικόνιση, σε κοινούς άξονες, κυματομορφών προτύπου IEC 62305-1 και μοντελοποιημένων πηγών μέσω εργαλείου ATPDraw – Σύγκριση πρώτου αρνητικού κεραυνικού πλήγματος, LPL-I.



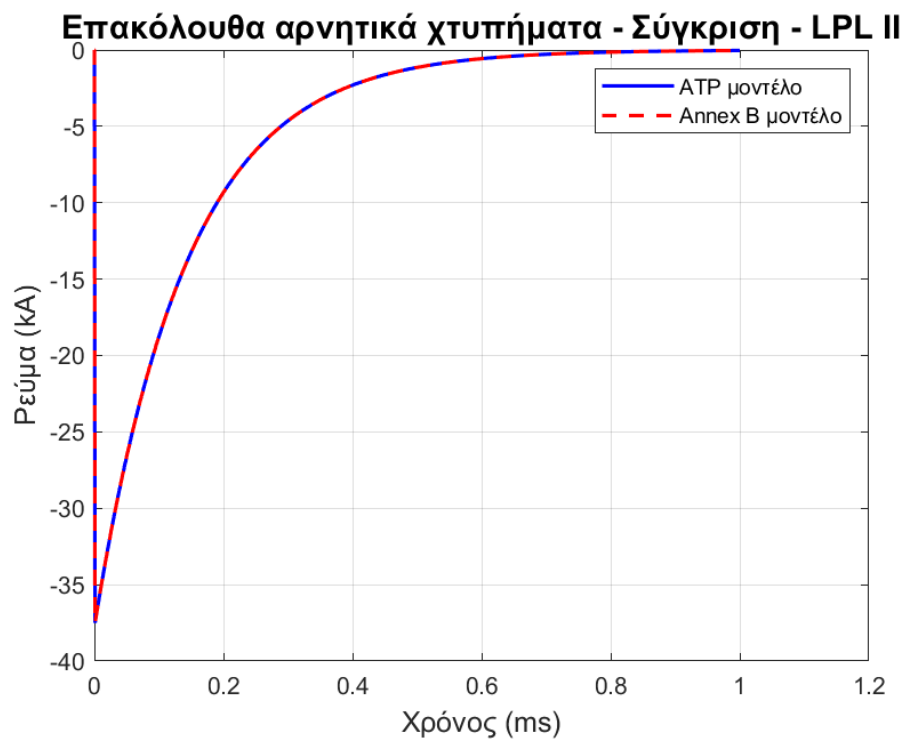
Εικόνα 25. Απεικόνιση, σε κοινούς άξονες, κυματομορφών προτύπου IEC 62305-1 και μοντελοποιημένων πηγών μέσω εργαλείου ATPDraw – Σύγκριση πρώτου αρνητικού κεραυνικού πλήγματος, LPL-II.



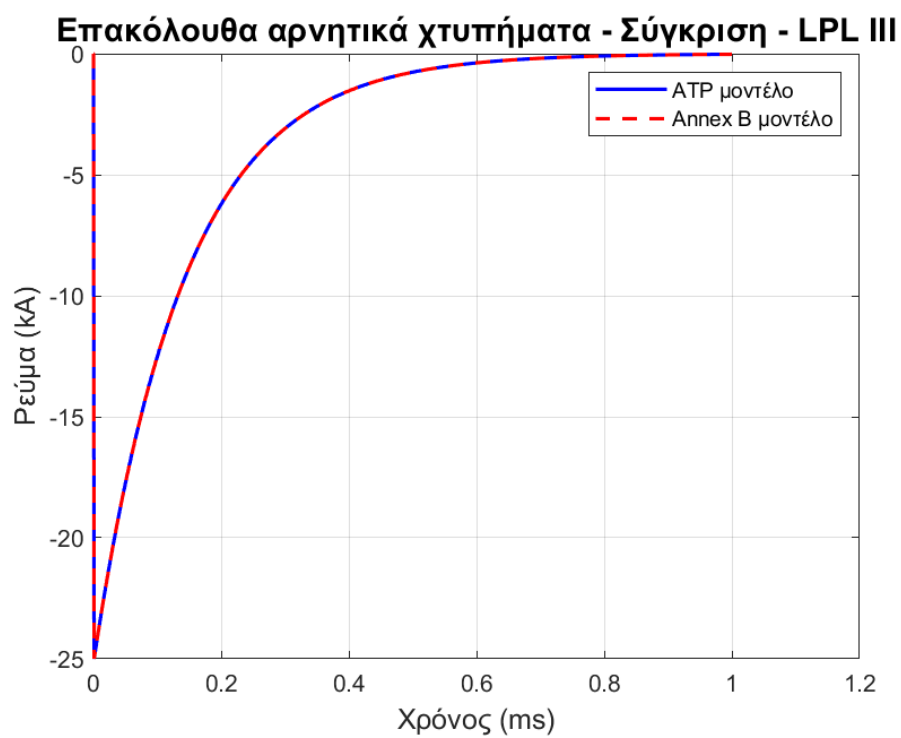
Εικόνα 26. Απεικόνιση, σε κοινούς άξονες, κυματομορφών προτύπου IEC 62305-1 και μοντελοποιημένων πηγών μέσω εργαλείου ATPDraw – Σύγκριση πρώτου αρνητικού κεραυνικού πλήγματος, LPL-III.



Εικόνα 27. Απεικόνιση, σε κοινούς άξονες, κυματομορφών προτύπου IEC 62305-1 και μοντελοποιημένων πηγών μέσω εργαλείου ATPDraw – Σύγκριση επακόλουθων αρνητικών κεραυνικών πληγμάτων, LPL-I.



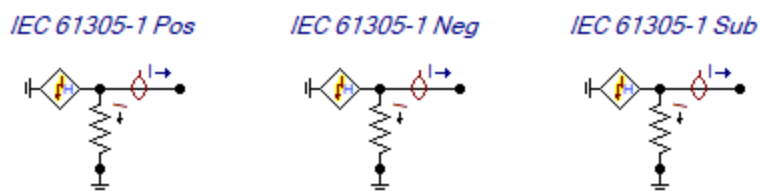
Εικόνα 28. Απεικόνιση, σε κοινούς άξονες, κυματομορφών προτύπου IEC 62305-1 και μοντελοποιημένων πηγών μέσω εργαλείου ATPDraw – Σύγκριση επακόλουθων αρνητικών κεραυνικών πληγμάτων, LPL-II.



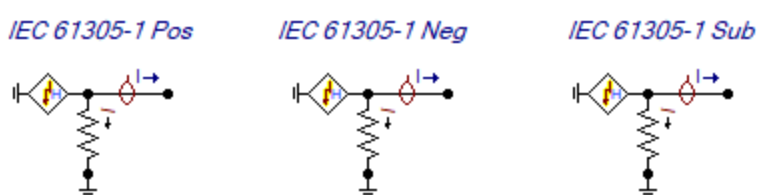
Εικόνα 29. Απεικόνιση, σε κοινούς άξονες, κυματομορφών προτύπου IEC 62305-1 και μοντελοποιημένων πηγών μέσω εργαλείου ATPDraw – Σύγκριση επακόλουθων αρνητικών κεραυνικών πλήγμάτων, LPL-III.



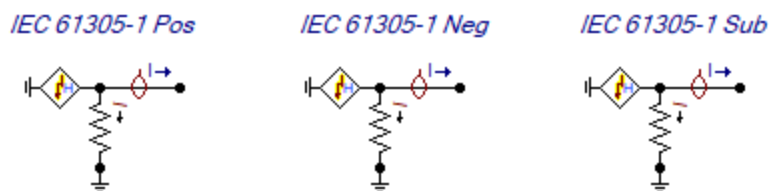
*LPL I*



## LPL II



## LPL III



Εικόνα 30. Τοπολογία πηγών ρεύματος κεραυνού στο εργαλείο ATPDraw.

Από τη σύγκριση των κυματομορφών του προτύπου IEC 62305-1 και των πηγών ρεύματος (Εικόνα 30) που μοντελοποιήθηκαν στο ATP-EMTP εργαλείο, είναι εμφανές ότι συμπίπτουν απόλυτα οι κυματομορφές όλων των περιπτώσεων κεραυνικού πλήγματος και όλων των επιπέδων προστασίας κεραυνού. Έτσι, διαπιστώνεται η εγκυρότητα της χρήσης των πηγών στις προσομοιώσεις της ολοκληρωμένης τοπολογίας, η οποία αναλύεται στο Κεφάλαιο 5.

## 5.8 Αξία αντικεραυνικής προστασίας

Εκτός από τις απαραίτητες ηλεκτρολογικές μελέτες που χρειάζονται να πραγματοποιηθούν για την υλοποίηση των υποδομών ενός έργου cold-ironing, είναι μείζονος σημασίας η μελέτη

αντικεραυνικής προστασίας και η προστασία εξοπλισμού και μονώσεων έναντι των υπερτάσεων, γνωστή και ως μελέτη συντονισμού μονώσεων (insulation coordination). Ένα οποιοδήποτε σύστημα ισχύος, μπορεί να απειληθεί από απρόβλεπτο πλήγμα στιγμιαίας υπέρτασης (transient overvoltage), το οποίο μπορεί να προέρχεται από κεραυνικά χτυπήματα (εξωτερική υπέρταση), απότομες αλλαγές στην τάση λόγω σφαλμάτων και ασταθειών στο δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας [62].

Το cold-ironing σύστημα, μπορεί να επηρεαστεί από στιγμιαίες υπερτάσεις και λόγω της υποδομής του συστήματος, δηλαδή από πλήγμα από την πλευρά της ξηράς, η οποία δύναται να επηρεάσει τον μετασχηματιστή ισχύος του υποσταθμού παροχής ενέργειας, τους χειρισμούς ενεργοποίησης και απενεργοποίησης επιμέρους κυκλωμάτων, όπως επίσης και τα επιμέρους μέρη της εγκατάστασης cold ironing ή του πλοίου.

Επιπρόσθετα, οι απρόβλεπτες απειλές από εξωτερικές υπερτάσεις στις οποίες υπόκειται μία εγκατάσταση cold-ironing, οι οποίες μεταδίδονται από το πρωτεύον σύστημα παροχής ισχύος, συναντούν αρχικά αλλαγές στην εμπέδηση των υπερτάσεων στο πρωτεύον κύκλωμα του μετασχηματιστή που βρίσκεται στην ξηρά. Σύμφωνα με την καθιερωμένη θεωρία διάδοσης κυμάτων, μία τέτοια εισερχόμενη υπέρταση στο πρωτεύον του μετασχηματιστή, θα προκαλέσει ανάκλαση, η οποία και θα υπερτεθεί στο αρχικό οδεύον κύμα, οδηγώντας σε σχεδόν διπλάσιου μεγέθους υπέρταση, ειδικότερα εάν ο διακόπτης σε αυτό το σημείο είναι ανοιχτός [54].

## 5.9 Στοιχεία προστασίας έναντι των υπερτάσεων

Σε ένα οποιοδήποτε σύστημα ισχύος, θα ελλοχεύει πάντα ο κίνδυνος εμφάνισης παροδικών υπερτάσεων. Επομένως, για τον σωστό σχεδιασμό ενός συστήματος cold-ironing, αναγκαία είναι η ανάλυση προστασίας έναντι των υπερτάσεων, γνωστή και ως insulation coordination [62].

Μία εγκατάσταση cold-ironing, χρησιμοποιεί σύστημα καλωδίων μακριού μήκους, μέσης τάσης, με διακόπτες (circuit breakers) σε αμφότερα τα άκρα του. Ο διακόπτης από την πλευρά του πλοίου, απαιτεί την εκτέλεση της λειτουργία κλεισίματος και ανοίγματος, υπό συγκεκριμένο φορτίο, κατά την άφιξη ή αναχώρηση του πλοίου από το σημείο πρόσδεσης. Η επαναλαμβανόμενη αυτή λειτουργία, ενδέχεται να γίνει η αιτία πρόκλησης παροδικών υπερτάσεων, πόσο μάλλον όταν υπάρχει πιθανότητα εμφάνισης απρόβλεπτων υπερτάσεων στο σύστημα παροχής ισχύος [62].

Ακόμη, οι παροδικές υπερτάσεις, οι οποίες οφείλονται στην ύπαρξη κεραυνικών πληγμάτων, δεν μπορούν να αποφευχθούν. Η κατάσταση δυσχεραίνει όταν προκύπτουν ενδογενή σφάλματα εντός του ηλεκτρικού συστήματος. Συνεπώς, είναι υψίστης σημασίας ο προληπτικός σχεδιασμός έναντι των υπερτάσεων, προκειμένου να αποφευχθεί η αστοχία μόνωσης του εξοπλισμού ή/και η ολοκληρωτική καταστροφή μερικών κυκλωματικών στοιχείων [62].

Για την προστασία της διασύνδεσης cold-ironing, τοποθετούνται στοιχεία προστασίας έναντι των υπερτάσεων, στα σημεία της εγκατάστασης όπου κρίνεται ότι χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής. Η χρήση των surge arresters, είναι μία αποτελεσματική τεχνική για την προστασία ενός συστήματος ισχύος έναντι στις υπερτάσεις, συνδυασμένο με άλλα μέτρα προστασίας, όπως γείωση των επιμέρους κυκλωματικών στοιχείων της εγκατάστασης, για την ολοκληρωμένη και επαρκή προστασία του [62].

Η δε επιλογή των surge arresters, γίνεται βάσει των προτύπων IEEE Std. C62.22-1997 και IEEE Std. 141, ενώ λαμβάνονται υπόψιν τα τεχνικά χαρακτηριστικά από επιλεγμένα ενημερωτικά φυλλάδια δεδομένων (datasheet). Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η μοντελοποίηση των στοιχείων προστασίας έγινε με βάση το μοντέλο του επιστημονικού άρθρου [67], το οποίο έχει ως βάση το μοντέλο που προτάθηκε από την IEEE W.G. 3.4.11. [68]. Το datasheet που επιλέχθηκε για την επιλογή κατάλληλων surge arresters, είναι της εταιρείας ABB.

Επειδή το χειρότερο σενάριο κεραυνικού πλήγματος, στην κυκλωματική εγκατάσταση του cold-ironing, μπορεί να εντοπιστεί στη γραμμή μεταφοράς και συγκεκριμένα στην είσοδο του μετασχηματιστή από την πλευρά της διασύνδεσης ξηράς, επιλέχθηκε να τοποθετηθεί στοιχείο προστασίας στην είσοδο του μετασχηματιστή ξηράς. Για την επαρκή προστασία του συστήματος, εξετάστηκε, ακόμη, η τοποθέτηση surge arrester στην πλευρά χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή ξηράς, όπως επίσης και στο πρωτεύον και δευτερεύον κύκλωμα του μετασχηματιστή, ο οποίος είναι εγκατεστημένος εντός του πλοίου.

Η είσοδος του μετασχηματιστή ξηράς στη μεριά της υψηλής τάσης, δέχεται 20kV πολική τάση. Για την επιλογή του κατάλληλου surge arrester, υπολογίζεται η φασική ενεργός τιμή της τάσης εισόδου του μετασχηματιστή ξηράς, η οποία είναι:

$$V_{ph_{rms}} = \frac{20kV}{\sqrt{3}} = 11.533kV \quad (25)$$

Επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία για την έξοδο του μετασχηματιστή ξηράς, η οποία ανέρχεται στα 6.6kV πολική τάση, υπολογίζεται η φασική ενεργός τιμή της τάσης:

$$V_{ph_{rms}} = \frac{6.6kV}{\sqrt{3}} = 3.811kV \quad (26)$$

Ομοίως, η πολική ενεργός τιμή της τάσης στην είσοδο του μετασχηματιστή του πλοίου, μετρήθηκε μέσω της προσομοίωσης ότι είναι 5.394kV, επομένως η φασική ενεργός τιμή της τάσης θα είναι:

$$V_{ph_{rms}} = \frac{5.394kV}{\sqrt{3}} = 3.114kV \quad (27)$$

Τέλος, η πολική ενεργός τιμή της τάσης στην έξοδο του μετασχηματιστή, ανέρχεται στα 6.6kV, οπότε η φασική ενεργός τιμή της τάσης υπολογίζεται ως έχει:

$$V_{ph_{rms}} = \frac{6.6kV}{\sqrt{3}} = 3.811kV \quad (28)$$

Με βάση τις φασικές ενεργές τιμές των τάσεων που υπολογίστηκαν παραπάνω, επιλέχθηκαν δύο τύποι surge arrester από το φυλλάδιο στοιχείων της ABB [69], για να ικανοποιούν τις ανάγκες σε φασική τάση των σημείων όπου γίνεται η επιλογή τοποθέτησής τους.

Ακολουθεί πίνακας των ονομαστικών δεδομένων τους, από το φυλλάδιο στοιχείων της ABB:

Πίνακας 15. Πίνακας ονομαστικών δεδομένων των στοιχείων προστασίας, από το φυλλάδιο στοιχείων της ABB [69].

Συνεχόμενη τάση λειτουργίας, $V_c$	Ονομαστική τάση λειτουργίας, $V_r$	Παραμένουσα τάση $V_{res}$ σε kV, peak						
kV, rms	kV, rms	Κύμα: 1/...μs		Κύμα: 8/20μs				
		5kA, peak	10kA, peak	1kA, peak	2.5kA, peak	5kA, peak	10kA, peak	20kA, peak
4	5.0	12.7	13.5	10.5	11.1	11.7	12.3	14.1
10	12.5	31.7	33.5	26.1	27.7	29.0	30.7	35.0

Για τη μοντελοποίηση των surge arrester, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο των επιστημόνων Pinceti, Giannettoni [67]. Ακολουθεί ο

υπολογισμός των παραμέτρων που χρειάστηκαν να υπολογιστούν, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του πίνακα 4.6.1, για τους δύο τύπους surge arrester:

- Τα στοιχεία που χρειάζονται για τον surge arrester με ονομαστική τάση λειτουργίας στα 5kV, rms, σύμφωνα με [67], είναι τα εξής:

Ονομαστική τάση λειτουργία του arrester:

$$V_r = 5kV$$

Παραμένουσα τάση, μετρημένη στα 10kA, για κύμα 8/20μs:

$$V_{r8/20} = 12.3kV$$

Παραμένουσα τάση μετρημένη στα 10kA, για κύμα 1/...μs:

$$V_{r1/T2} = 13.5kV$$

Από το επιστημονικό άρθρο, χρησιμοποιείται ο εξής πίνακας που περιλαμβάνει p.u. τιμές, για την εύρεση των μη-γραμμικών στοιχείων των στοιχείων προστασίας:

Πίνακας 16. Χαρακτηριστικές τιμές p.u. για τα μη γραμμικά στοιχεία των surge arrester [67].

I (kA)	A0 (p.u.)	A1(p.u.)
$2 \cdot 10^6$	0.810	0.623
0.1	0.974	0.788
1	1.052	0.866
3	1.108	0.922
10	1.195	1.009
20	1.277	1.091

Πολλαπλασιάζοντας την τάση  $V_{r8/20}$  με την δεύτερη και τρίτη στήλη του Πίνακα 16, προκύπτουν οι χαρακτηριστικές τάσης-ρεύματος για τα μη γραμμικά στοιχεία του surge arrester, ονομαστικής τάσης 5kV:

Πίνακας 17. Υπολογισμένες τιμές μη γραμμικών στοιχείων surge arrester, ονομαστική τιμή 5kV.

I (kA)	A0 (p.u.)	A1(p.u.)
$2 \cdot 10^6$	9.963	7.663
0.1	11.98	9.692
1	12.94	10.652
3	13.628	11.341
10	14.699	12.411
20	15.707	13.419

Τέλος, υπολογίζονται οι τιμές των αυτεπαγωγών του ισοδύναμου κυκλώματος, βάσει του μοντέλου:

$$L_1 = \frac{1}{4} \cdot \frac{V_{r1} - V_{r8}}{\frac{T_2}{20} \cdot V_{r8}} \cdot V_r = 0.122 \mu H \quad (29)$$

$$L_0 = \frac{1}{12} \cdot \frac{V_{r1} - V_{r8}}{\frac{T_2}{20} \cdot V_{r8}} \cdot V_r = 0.04065 \mu H \quad (30)$$

- Τα στοιχεία που χρειάζονται για τον surge arrester με ονομαστική τάση λειτουργίας στα 12.5kV, rms, σύμφωνα με [67], είναι τα εξής:

Ονομαστική τάση λειτουργία του arrester:

$$V_r = 12.5kV$$

Παραμένουσα τάση, μετρημένη στα 10kA, για κύμα 8/20μs:

$$V_{r8/20} = 30.7kV$$

Παραμένουσα τάση μετρημένη στα 10kA, για κύμα 1/...μs:

$$V_{r1/T2} = 33.5kV$$

Ο υπολογισμός των μη-γραμμικών στοιχείων, για ονομαστική τάση 12.5kV, γίνεται με πολλαπλασιασμό της τάσης  $V_{r8/20}$  με την δεύτερη και τρίτη στήλη του Πίνακα 16.

Πίνακας 18. Υπολογισμένες τιμές μη γραμμικών στοιχείων surge arrester, ονομαστικής τιμής 12.5kV.

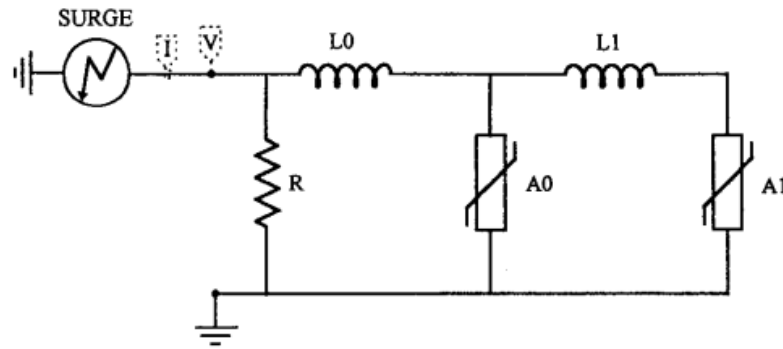
I (kA)	A0 (p.u.)	A1(p.u.)
$2 \cdot 10^6$	24.867	19.1261
0.1	29.902	24.192
1	32.296	26.586
3	34.0156	28.305
10	36.6865	30.976
20	39.204	33.494

Τέλος, υπολογίζονται οι τιμές των αυτεπαγωγών του ισοδύναμου κυκλώματος, βάσει του μοντέλου:

$$L_1 = \frac{1}{4} \cdot \frac{V_{r1} - V_{r8/20}}{\frac{T_2}{20} \cdot V_{r8/20}} \cdot V_r = 0.285 \mu H \quad (31)$$

$$L_0 = \frac{1}{12} \cdot \frac{V_{r1} - V_{r8/20}}{\frac{T_2}{20} \cdot V_{r8/20}} \cdot V_r = 0.095 \mu H \quad (32)$$

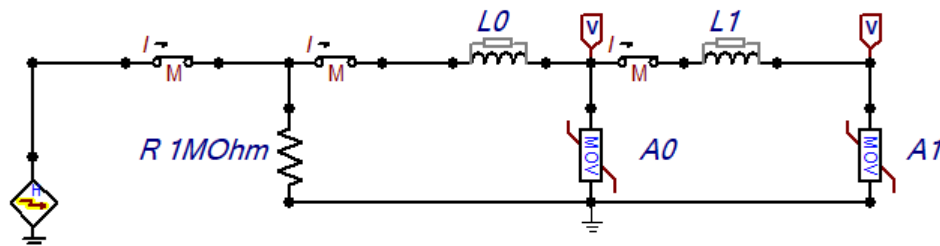
Η κυκλωματική διάταξη του μοντέλου που προτείνεται από τους Pinceti, Giannettoni είναι η εξής:



Εικόνα 31. Κυκλωματικό ισοδύναμο προσομοίωσης Pinceti, Giannettoni [67].

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 31 του ισοδυνάμου, μία πηγή υπερρεύματος συνδέεται σε σειρά με αντίσταση τιμής  $1\text{ M}\Omega$ , ενώ ακολουθεί η σύνδεση των αυτεπαγωγών και των μη-γραμμικών στοιχείων που υπολογίστηκαν νωρίτερα.

Το κυκλωματικό ισοδύναμο της προσομοίωσης που αφορά τους surge arrester, για την παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάζεται στην Εικόνα 32:



Εικόνα 32. Αποτύπωση του κυκλωματικού ισοδυνάμου του προτεινόμενου μοντέλου, μέσω εργαλείου ATPDraw.

Η πηγή υπερρεύματος, έχει μέγιστο ρεύμα στα  $40\text{ kA}$ , χρόνο μετώπου  $8\mu\text{s}$  και χρόνο ουράς στα  $20\mu\text{s}$ , και για τα δύο είδη surge arrester. Τα υπόλοιπα κυκλωματικά στοιχεία, δέχονται τις τιμές που υπολογίστηκαν παραπάνω.

Η πηγή υπερρεύματος, έχει εξίσωση διπλό-εκθετική, η οποία είναι η ακόλουθη [66]:

$$I = I_{amp} \cdot (e^{A \cdot t} - e^{B \cdot t}) \quad (33)$$

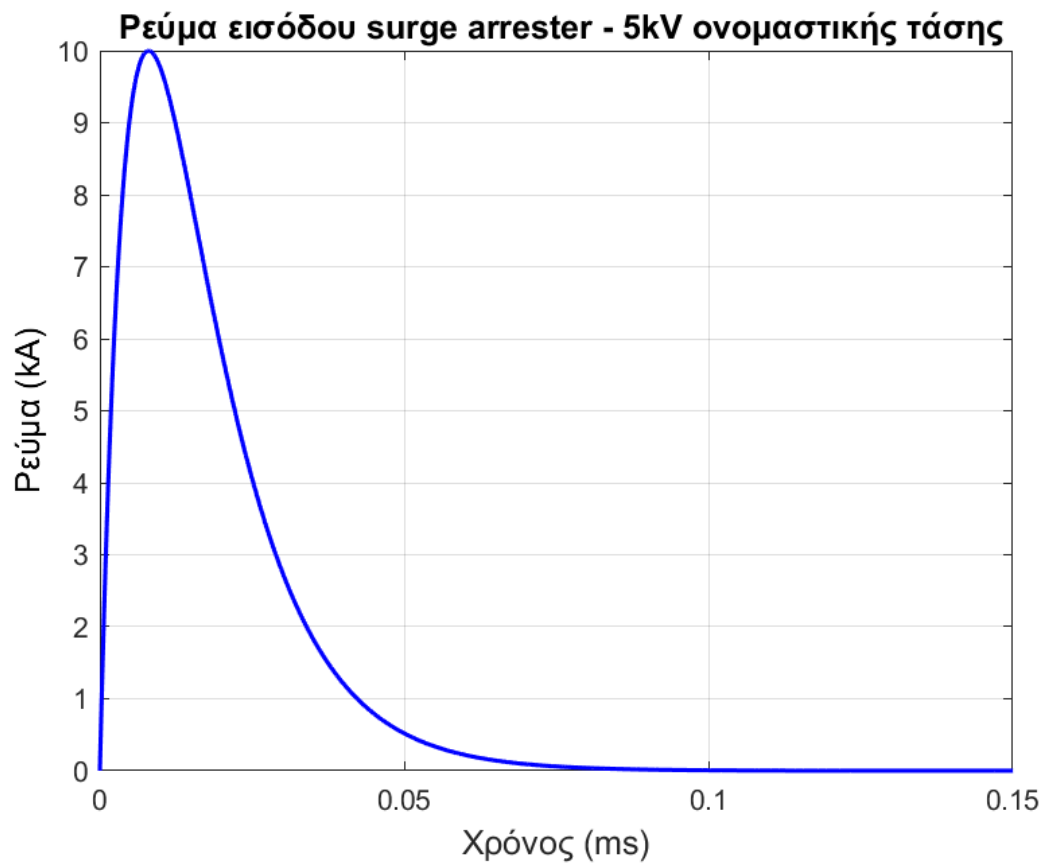
Όπου:

- $I_{amp} = 40\text{ kA}$ ,
- $A = -86600$ ,

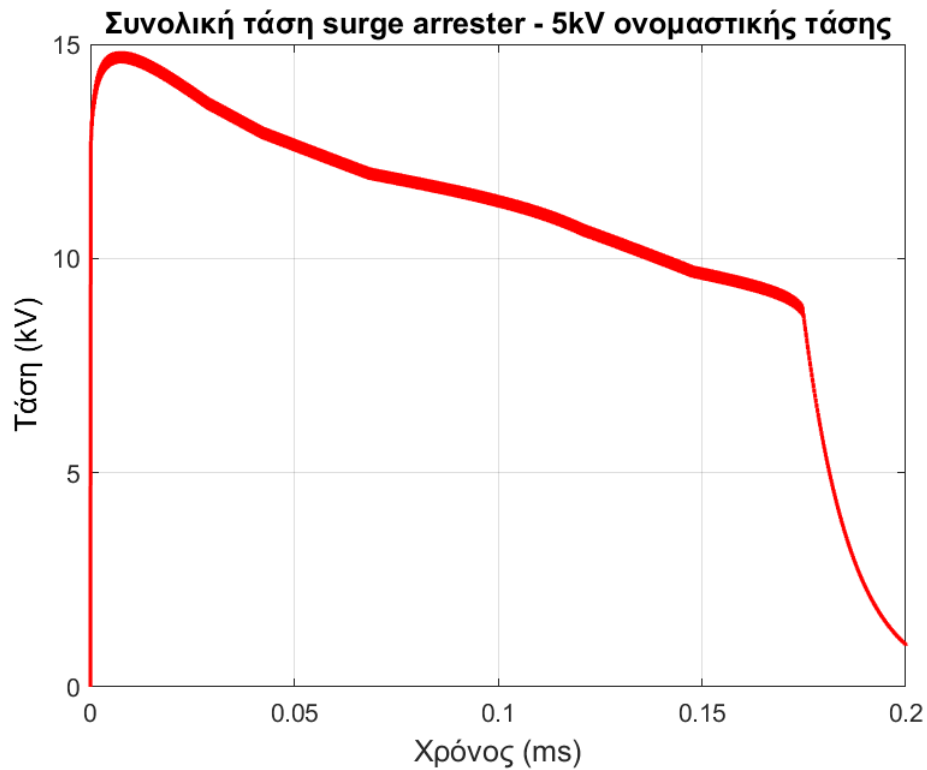


- $B = -173200$ .

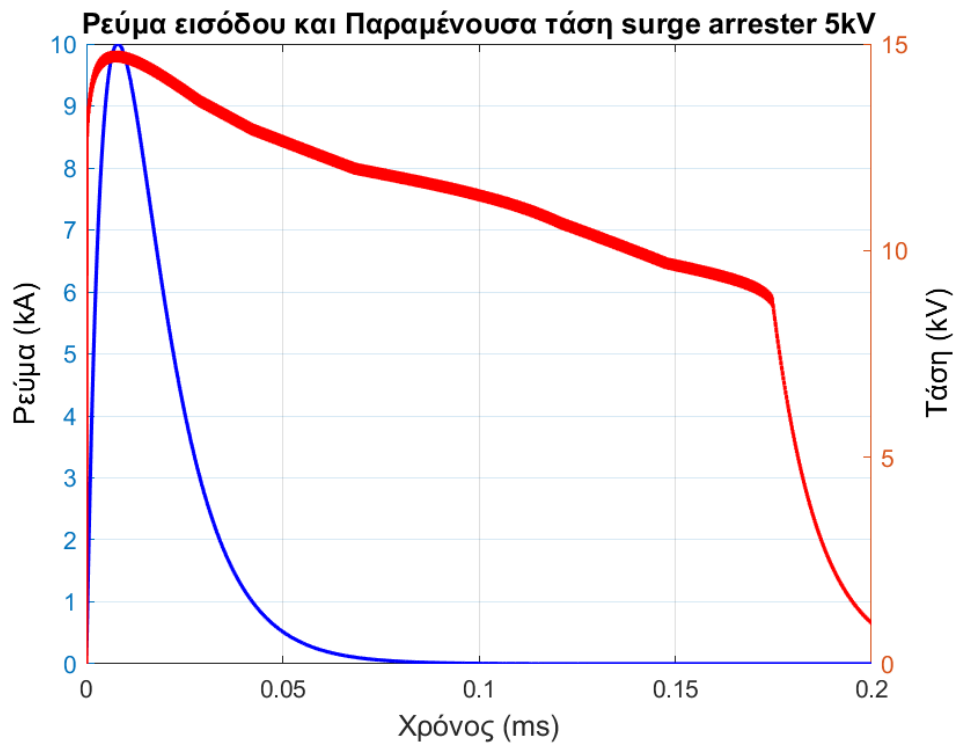
Ακολουθούν τα διαγράμματα απεικόνισης (Εικόνα 33 – 38) της παραμένουσας τάσης, του φορτίου του ρεύματος και του W/R.



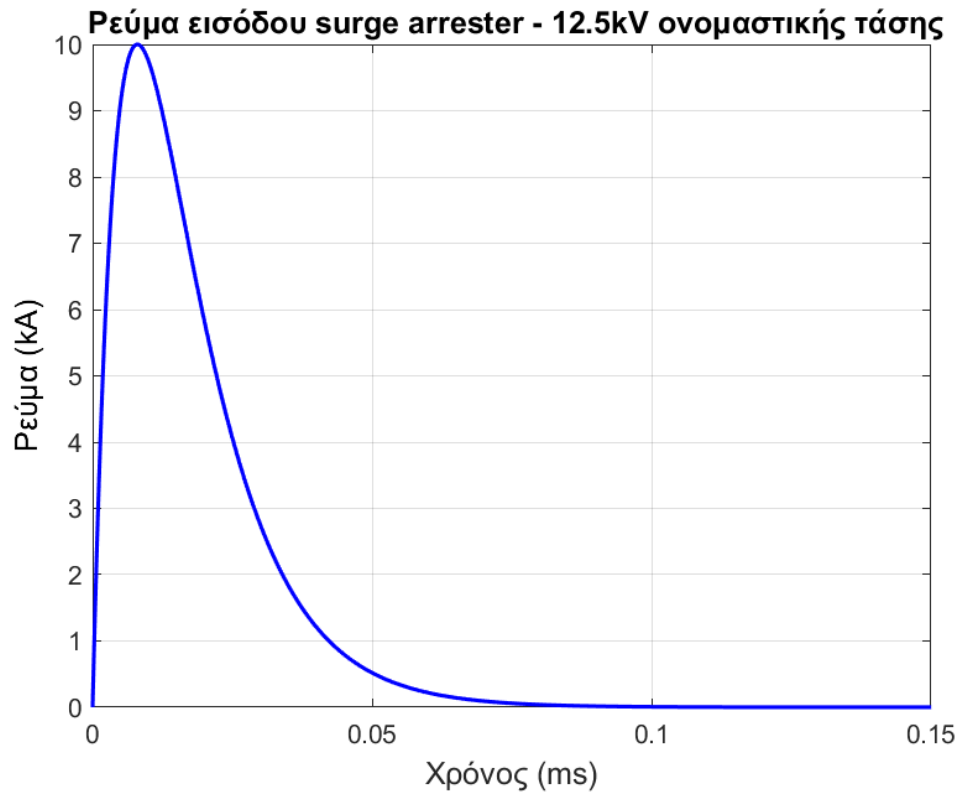
Εικόνα 33. Ρεύμα στην είσοδο του surge arrester, με ονομαστική τάση λειτουργίας στα 5 kV.



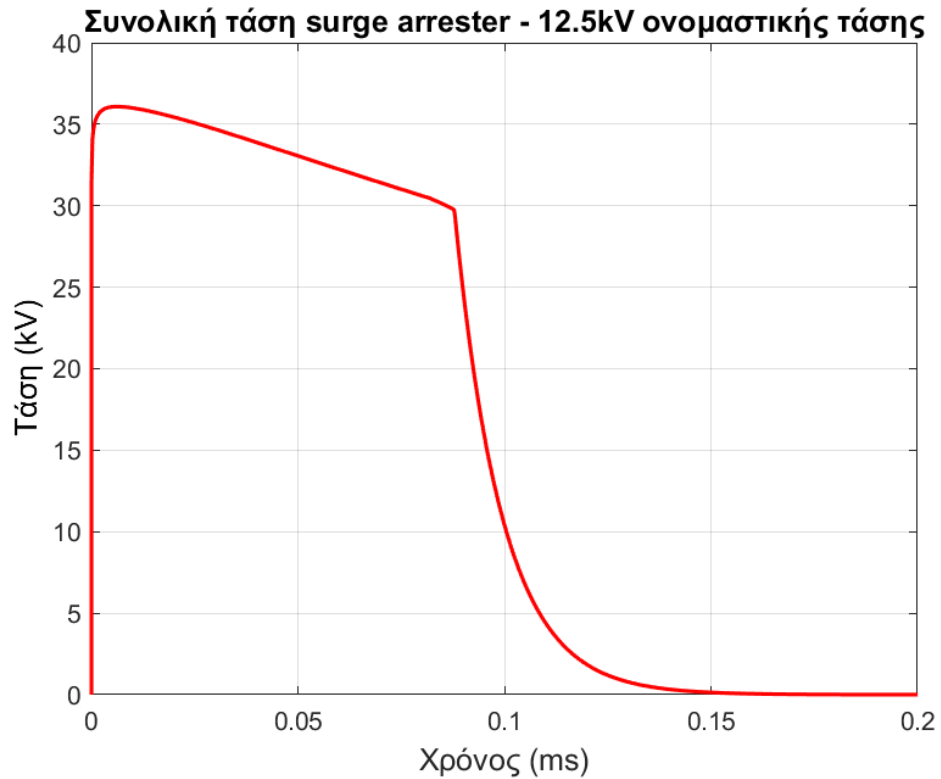
Εικόνα 34. Συνολική τάση surge arrester, με ονομαστική τάση λειτουργίας στα 5kV.



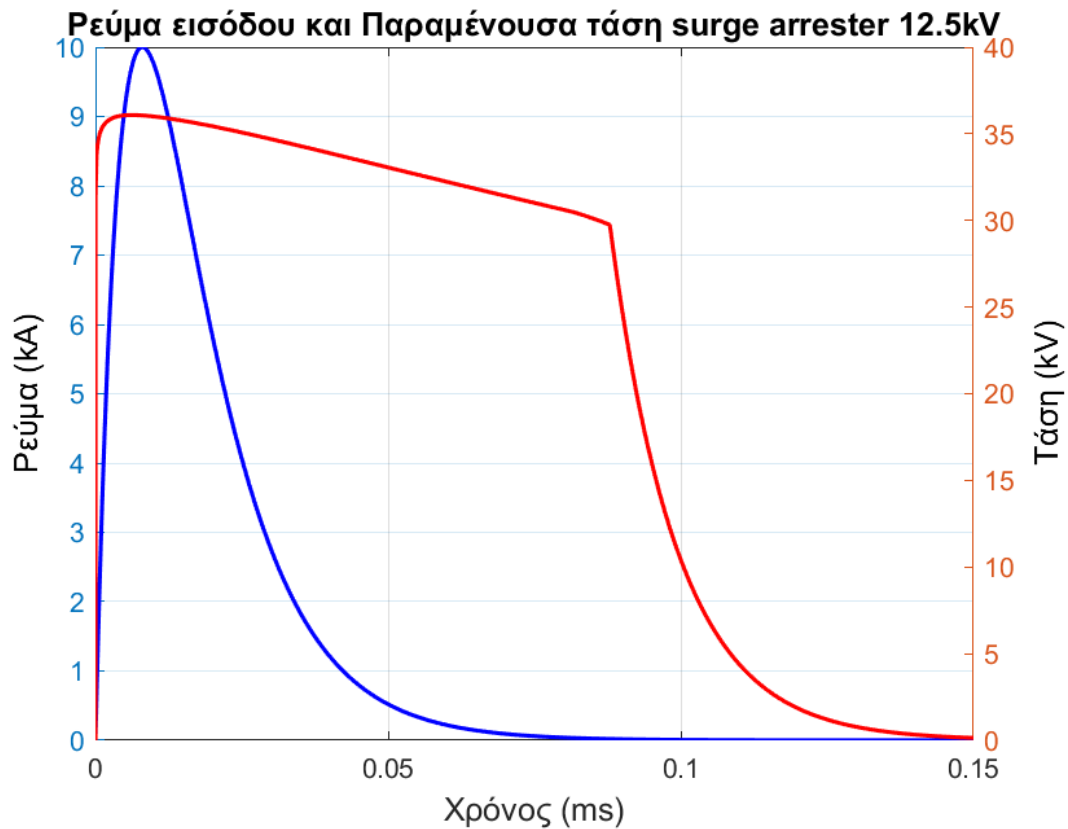
Εικόνα 35. Ρεύμα εισόδου και συνολική τάση surge arrester, σε κοινό διάγραμμα, με ονομαστική τάση λειτουργίας στα 5kV.



Εικόνα 36. Ρεύμα στην είσοδο του surge arrester, με ονομαστική τάση λειτουργίας στα 12.5kV.



Εικόνα 37. Συνολική τάση surge arrester, με ονομαστική τάση λειτουργίας στα 12.5kV.



Εικόνα 38. Ρεύμα εισόδου και συνολική τάση surge arrester, σε κοινό διάγραμμα, με ονομαστική τάση λειτουργίας στα 12.5kV.

Παρατηρούμε ότι οι τιμές ρεύματος και παραμένουσας τάσης, δε συμπίπτουν για αμφότερα τα είδη των surge arrester που εξετάζονται, το οποίο είναι αναμενόμενη συμπεριφορά του surge arrester [67]. Αξίζει να σημειωθεί ότι για τους arrester προσομοιώθηκαν και τα καλώδια (leads) τα οποία συνδέουν τους arresters. Προσομοιώθηκαν ως αυτεπαγωγές με τιμή 1μH/m, ενώ το μήκος τους θεωρήθηκε 2 m [70].

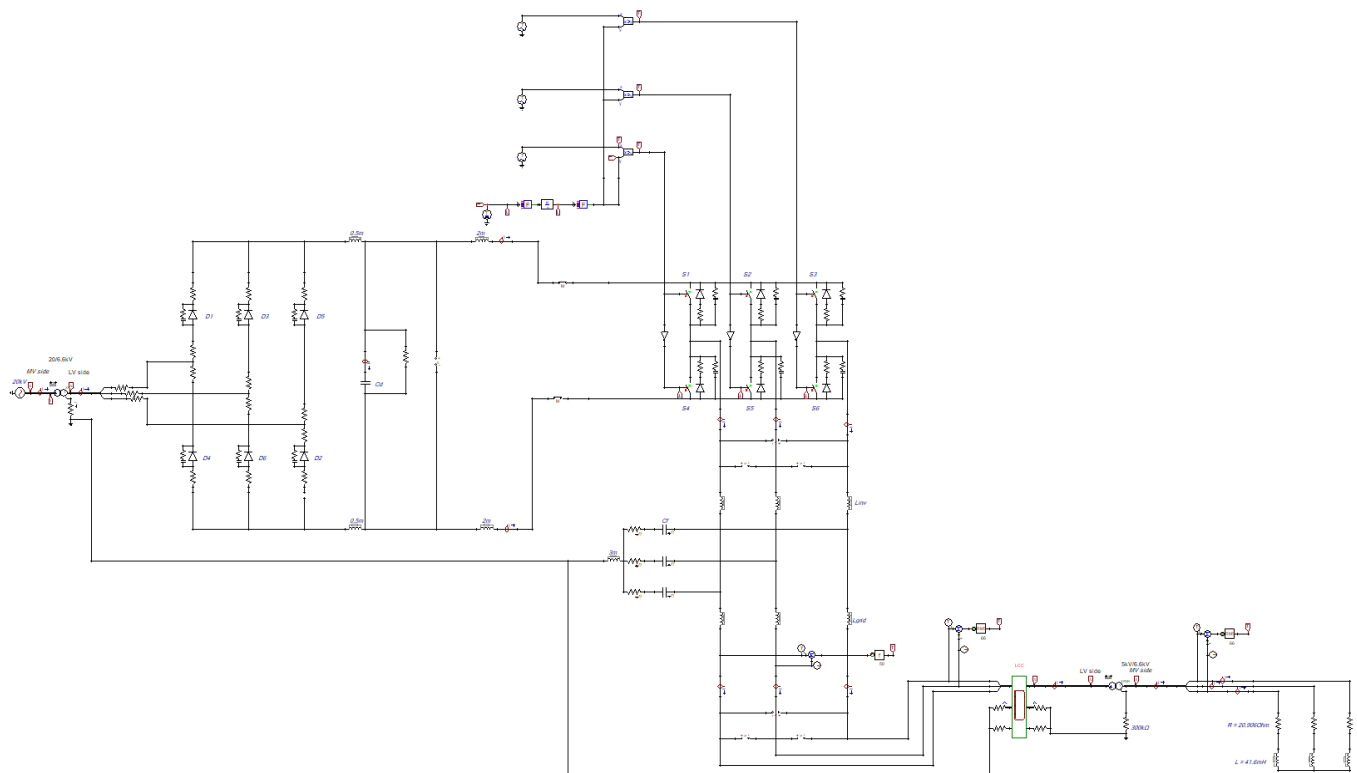
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

### 6.1 Λογισμικό προσομοίωσης – ATPDraw

Για την υλοποίηση των προσομοιώσεων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ATPDraw v7.3p.5. Το ATPDraw, είναι ένα γραφικό περιβάλλον προ-επεξεργασίας του ATP-EMTP (Alternative Transients Program - Electromagnetic Transients Program), το οποίο χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση και ανάλυση ηλεκτρομαγνητικών μεταβατικών καταστάσεων, με εφαρμογές τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας.

Η απεικόνιση και η μοντελοποίηση όλων των κυκλωμάτων, τόσο των επιμέρους όσο και της συνολικής διάταξης, πραγματοποιήθηκε με το εργαλείο ATPDraw, καθώς εξετάστηκαν αμφότερες οι περιπτώσεις μόνιμης κατάστασης και μεταβατικών φαινομένων της κυκλωματικής διάταξης.

### 6.2 Μόνιμη κατάσταση

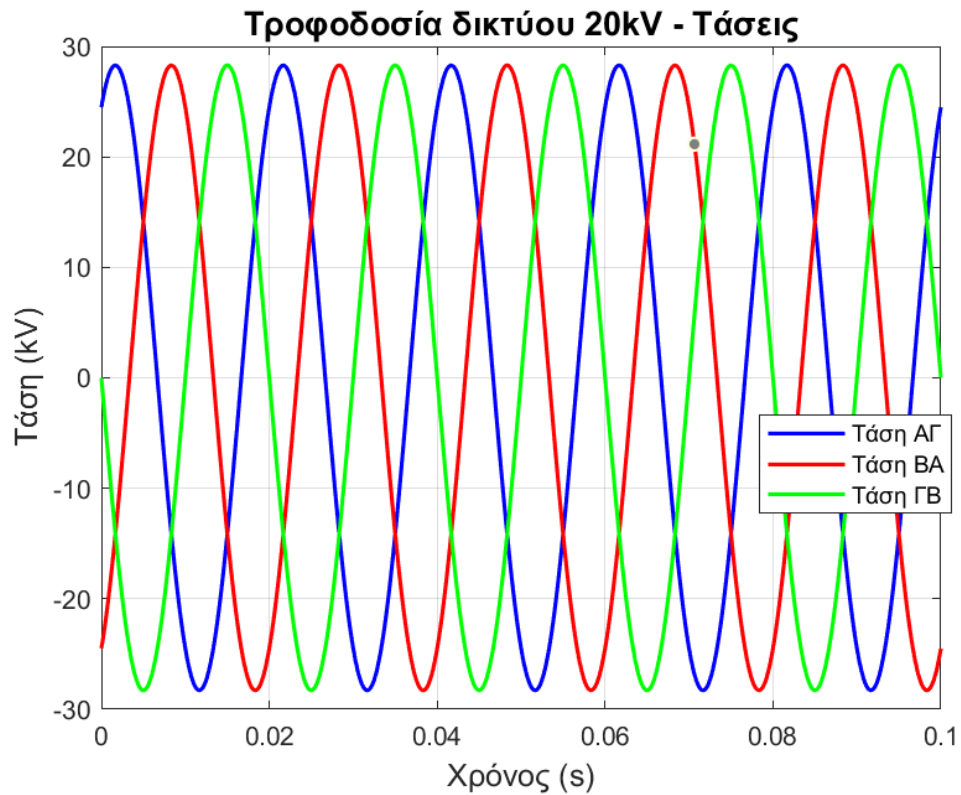


Εικόνα 39. Τοπολογία κυκλώματος στη μόνιμη κατάσταση.

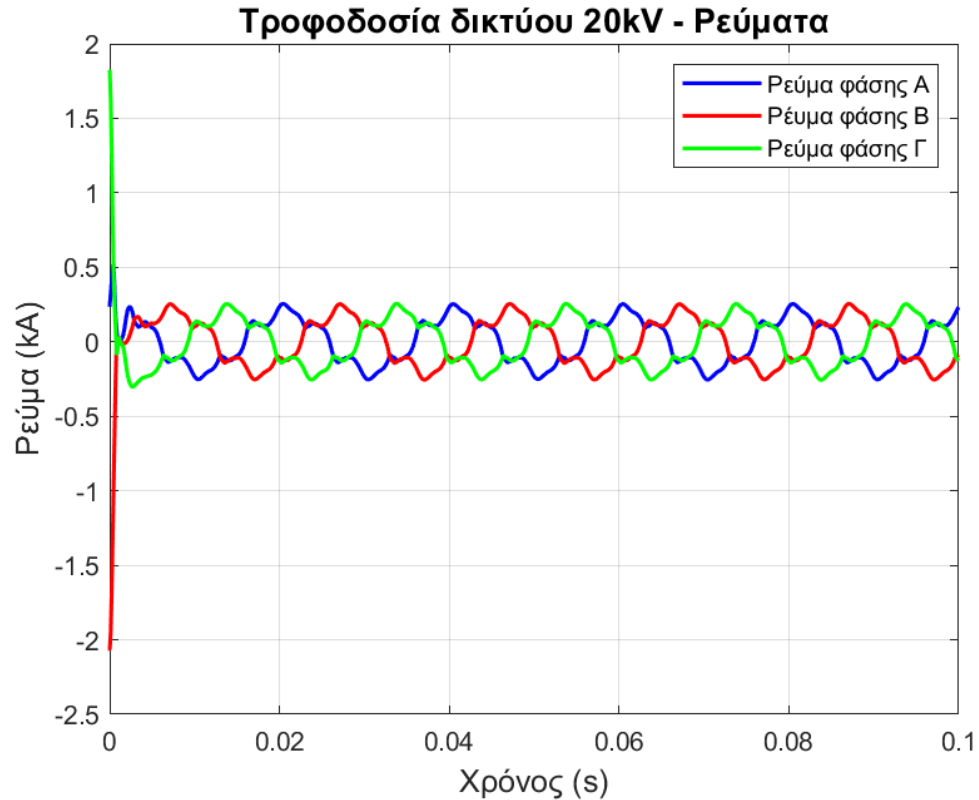
Στην παραπάνω τοπολογία της Εικόνας 39, απεικονίζεται η ολοκληρωμένη κυκλωματική διάταξη της μόνιμης κατάστασης, όπου περιλαμβάνει την τροφοδοσία από το δίκτυο διανομής, η οποία προσομοιώνεται με πηγή εναλλασσομένου ρεύματος ονομαστικής τάσης 20kV, μετασχηματιστή υποβιβασμού τάσης από τα 20kV στα 6.6kV, για να τροφοδοτηθεί ο μετατροπέας συχνότητας, από τα 50Hz στα 60Hz. Ο μετατροπέας συχνότητας, αποτελείται από κύκλωμα τριφασικού ανορθωτή, ο οποίος μετατρέπει την εναλλασσόμενη υποβιβασμένη τάση του δικτύου σε ανορθωμένη συνεχή τάση, και στη συνέχεια συνδέεται με τριφασικό αντιστροφέα ο οποίος τροφοδοτείται από γεννήτρια PWM. Ο αντιστροφέας συνδέεται με τριπολικό καλώδιο μακρού μήκους, το οποίο εν τέλει καταλήγει σε μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης από τα 5kV στα 6kV, ο οποίος βρίσκεται εντός του πλοίου. Τέλος, μέσω του μετασχηματιστή του πλοίου τροφοδοτείται το φορτίο του, το οποίο είναι τριφασικό.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, στις κυματομορφές 40 έως 51, παρατηρείται ένα μεταβατικό φαινόμενο στον αρχικό χρόνο της εκάστοτε κυματομορφής. Αυτό οφείλεται στην απόκριση του προγράμματος του ATPDraw, όπου στην προσπάθειά του να λειτουργήσει τα κυκλωματικά ισοδύναμα των ηλεκτρονικών ισχύος με μαθηματικές συναρτήσεις, χρησιμοποιεί αρχικοποιημένες παραμέτρους. Το μεταβατικό αυτό φαινόμενο, δε συναντάται σε πραγματική εφαρμογή, καθώς έχει καθαρά αριθμητική ιδιότητα και οφείλεται στο πρόγραμμα προσομοίωσης.

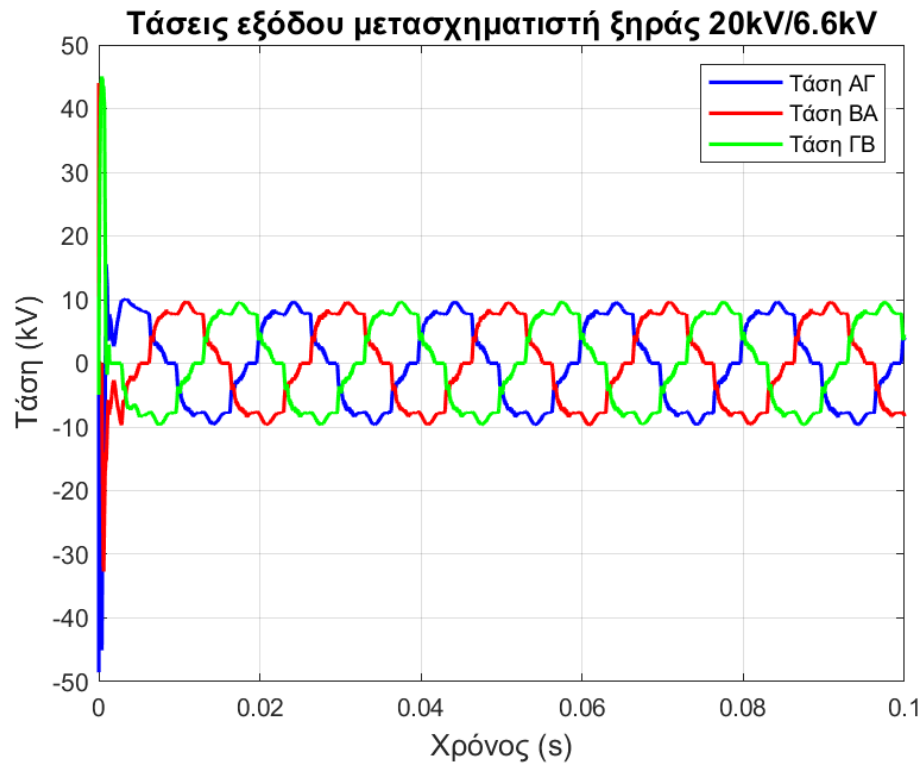
Ακολουθεί η διαγραμματική απεικόνιση, μέσω εργαλείου MATLAB, των πολικών μεγεθών ρευμάτων και τάσεων των επιμέρους κυκλωματικών μονάδων.



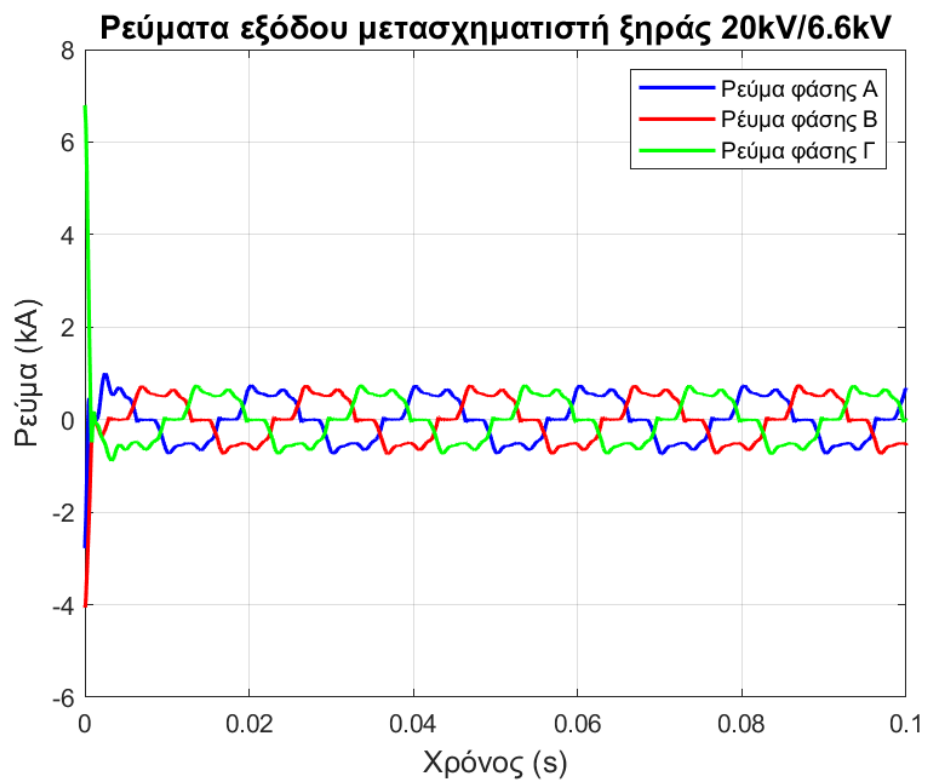
Εικόνα 40. Πολικές τάσεις δικτύου τροφοδοσίας των 20kV – είσοδος μετασχηματιστή ξηράς.



Εικόνα 41. Ρεύματα δικτύου τροφοδοσίας – είσοδος μετασχηματιστή ξηράς.

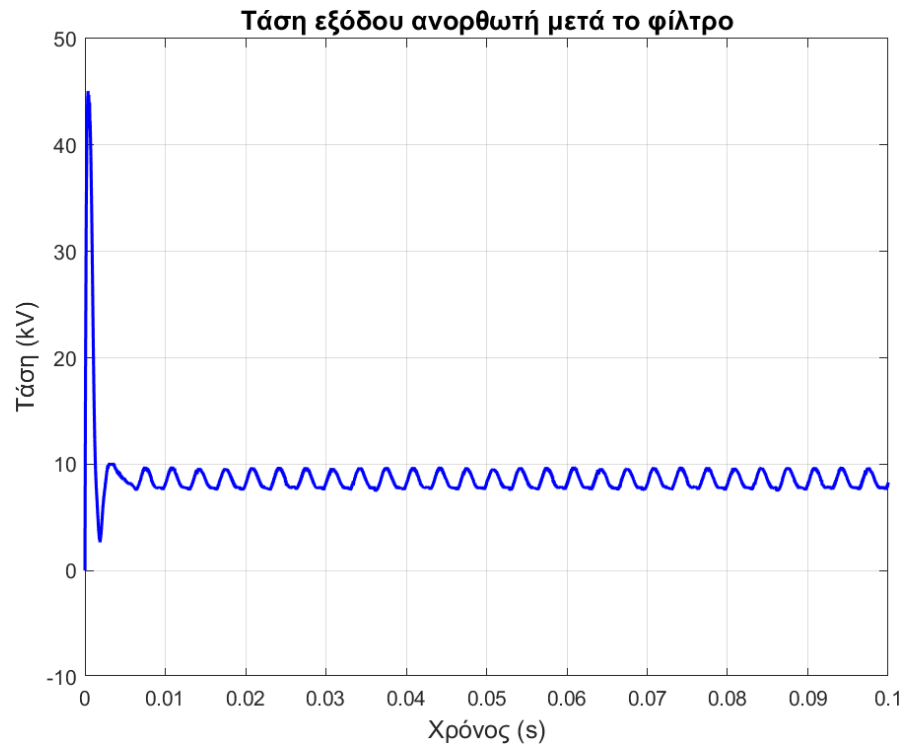


Εικόνα 42. Πολικές τάσεις εξόδου μετασχηματιστή ξηράς.

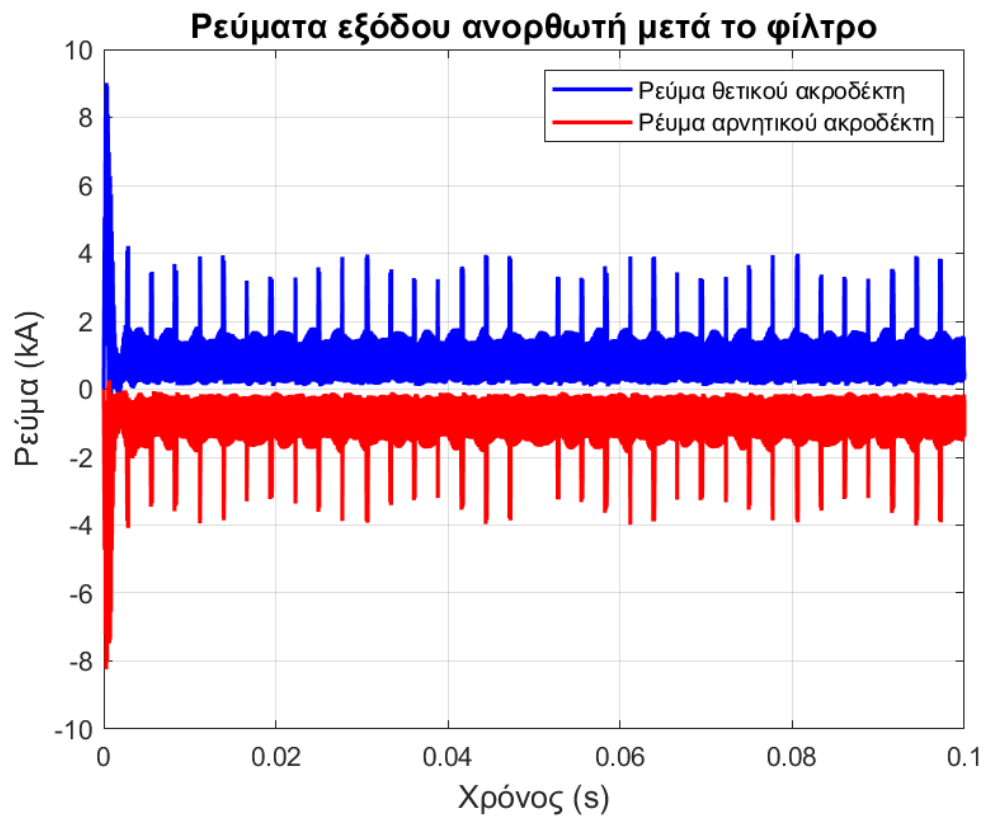


Εικόνα 43. Ρεύματα εξόδου μετασχηματιστή ξηράς.

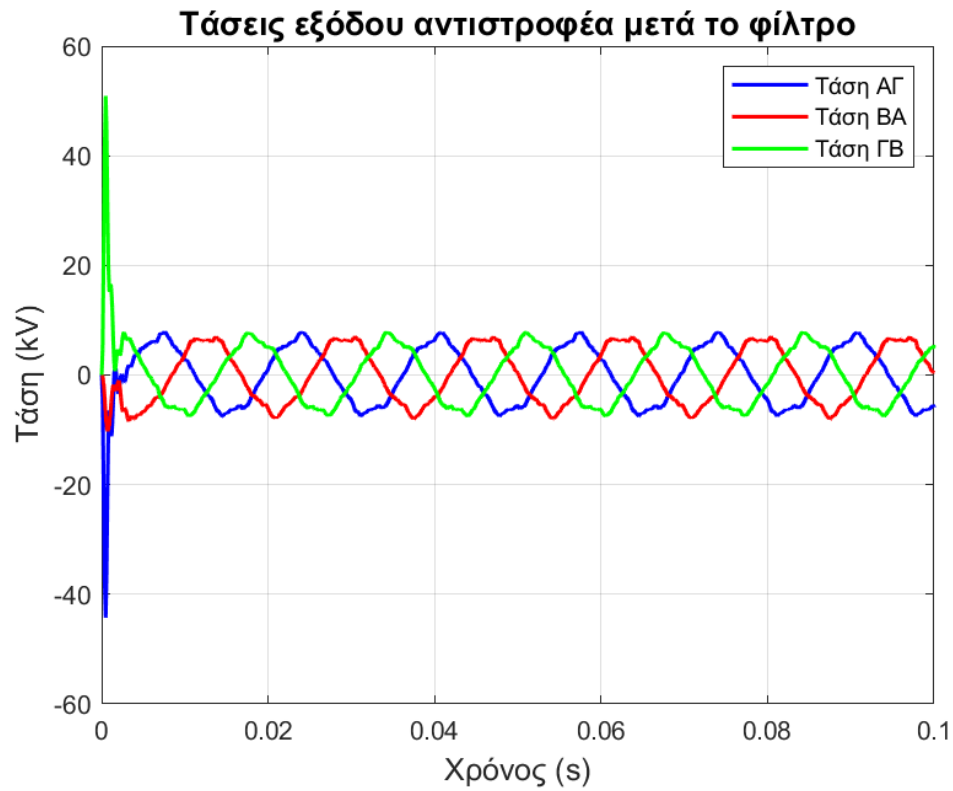




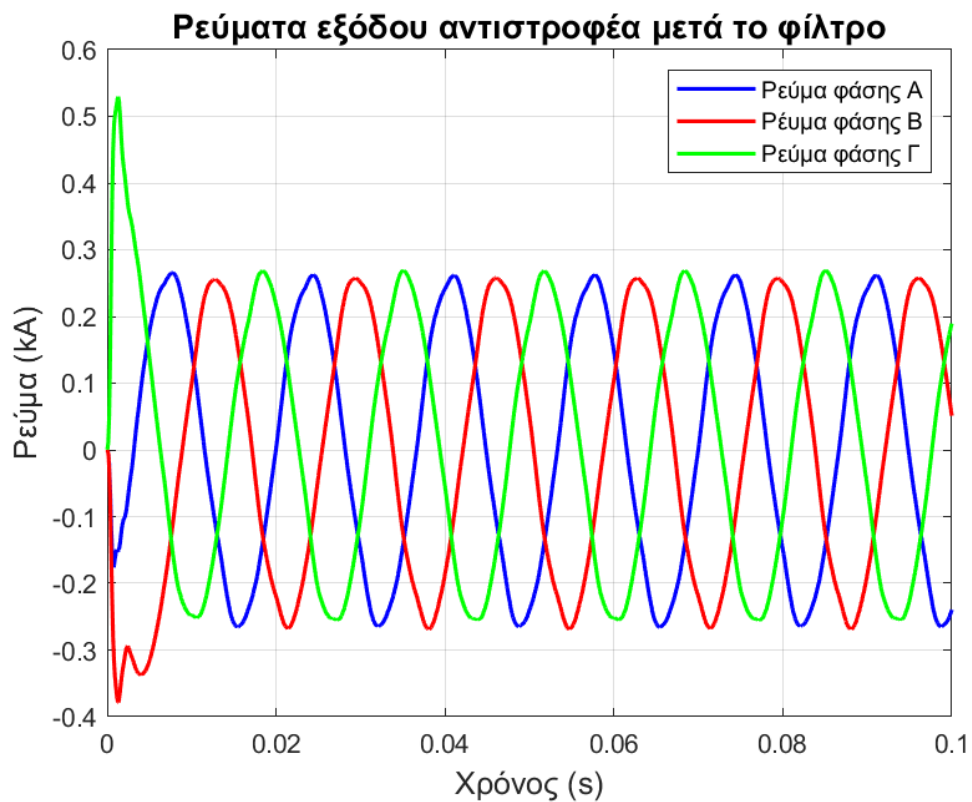
Εικόνα 44. Τάση εξόδου ανορθωτή, μετά το φίλτρο.



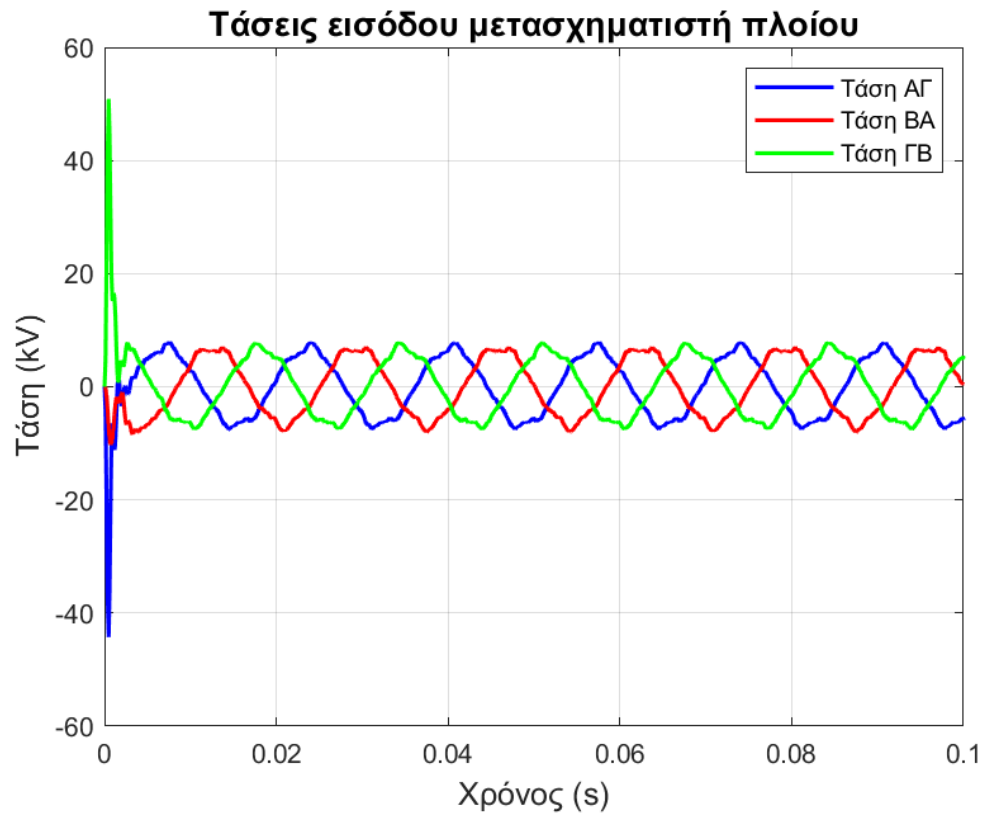
Εικόνα 45. Ρεύματα εξόδου ανορθωτή, μετά το φίλτρο, μετρούμενα στον θετικό και αρνητικό ακροδέκτη της εξόδου του.



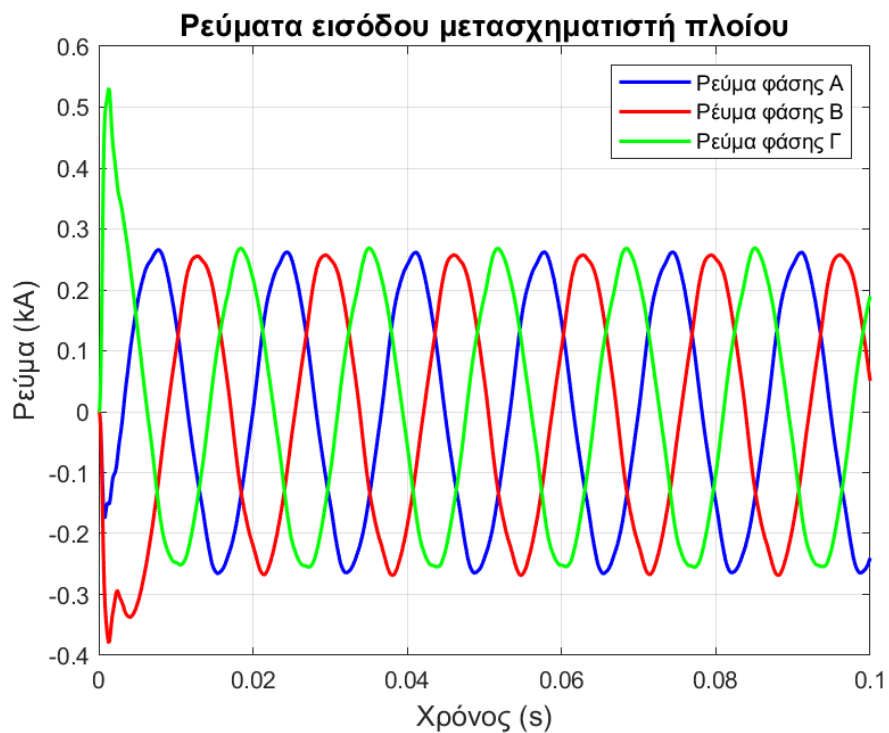
Εικόνα 46. Πολικές τάσεις εξόδου αντιστροφεία, μετρούμενες μετά το φίλτρο.



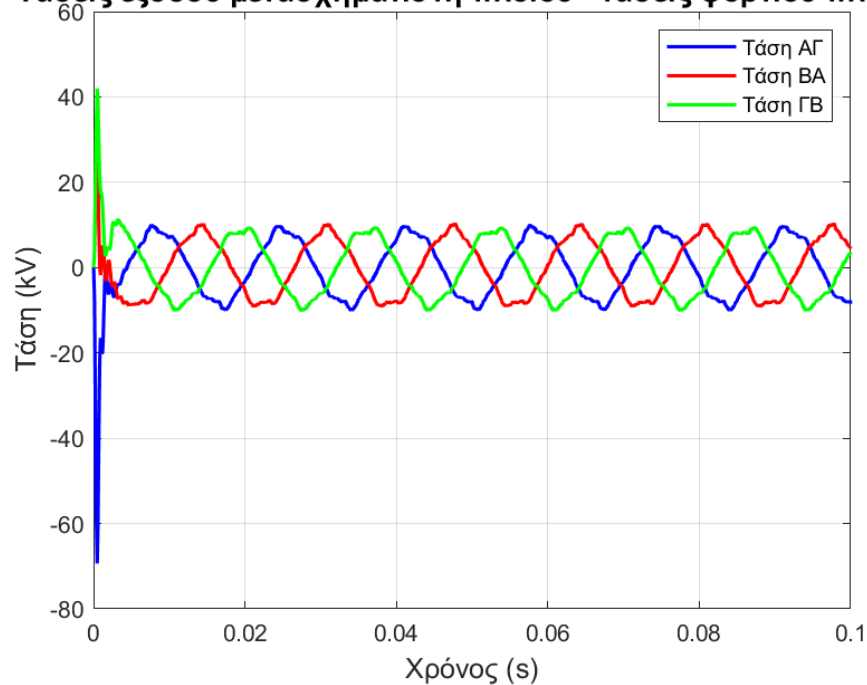
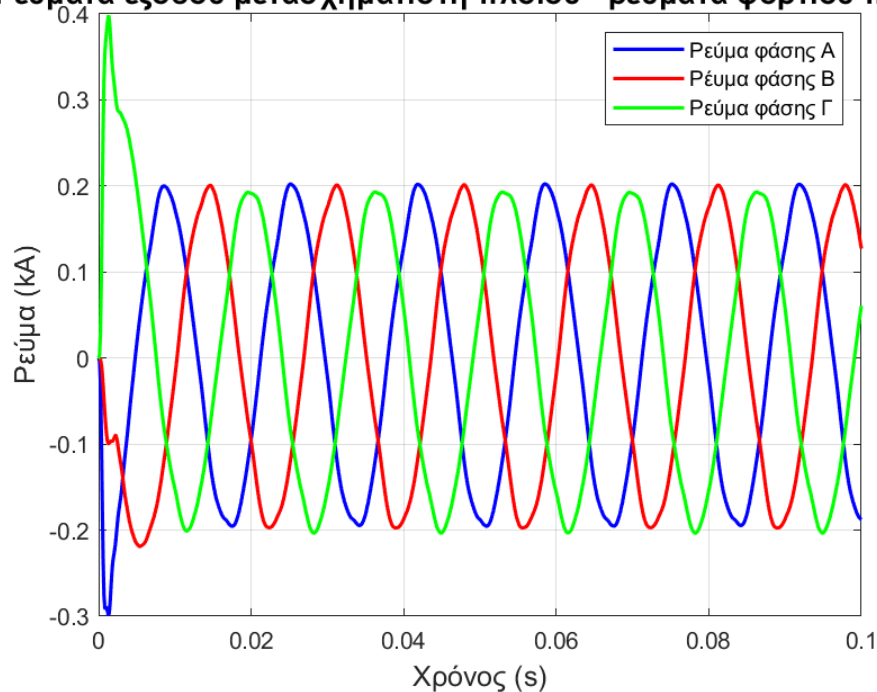
Εικόνα 47. Ρεύματα εξόδου αντιστροφεία, μετρούμενα μετά το φίλτρο.



Εικόνα 48. Τάσεις εισόδου στον μετασχηματιστή πλοίου – έξοδος καλωδίου διασύνδεσης συστήματος τροφοδοσίας ξηράς.



Εικόνα 49. Ρεύματα εισόδου στον μετασχηματιστή πλοίου – έξοδος καλωδίου διασύνδεσης συστήματος τροφοδοσίας ξηράς.

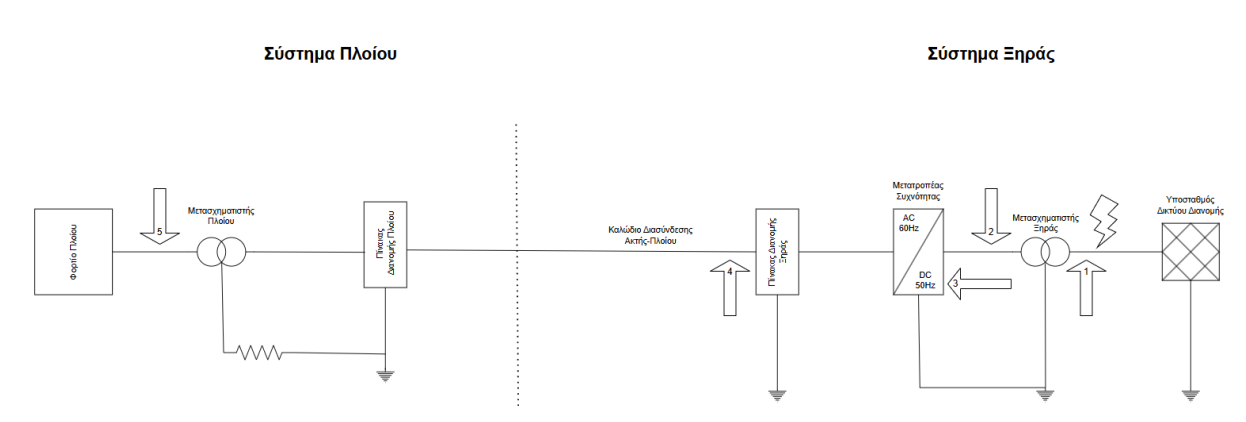
**Τάσεις εξόδου μετασχηματιστή πλοίου - τάσεις φορτίου πλοίου***Εικόνα 50. Τάσεις εξόδου μετασχηματιστή πλοίου – τάσεις τροφοδοσίας του φορτίου του πλοίου.***Ρεύματα εξόδου μετασχηματιστή πλοίου - ρεύματα φορτίου πλοίου***Εικόνα 51. Ρεύματα εξόδου μετασχηματιστή πλοίου – ρεύματα τροφοδοσίας του φορτίου του πλοίου.*

Ακολουθεί Πίνακας 19 με τις μέγιστες ενεργές τιμές των μεγεθών όπου απεικονίστηκαν στα διαγράμματα της παρούσας υποενότητας:

Πίνακας 19. Μέγιστες ενεργές τιμές των μεγεθών τάσης και ρεύματος των διαγραμμάτων μόνιμης κατάστασης.

<b>Τάση δικτύου 20kV</b>	19999.808 V
<b>Ρεύμα δικτύου 20kV</b>	253.47 A
<b>Τάση εξόδου Μ/Σ ξηράς 20kV/6.6kV</b>	6902.706 V
<b>Ρεύμα εξόδου Μ/Σ ξηράς 20kV/ 6.6kV</b>	742.11 A
<b>Τάση εξόδου ανορθωτή μετά το φίλτρο</b>	6858.653 V
<b>Ρεύμα εξόδου ανορθωτή μετά το φίλτρο στον θετικό ακροδέκτη</b>	564.36 A
<b>Ρεύμα εξόδου ανορθωτή μετά το φίλτρο στον αρνητικό ακροδέκτη</b>	-564.11 A
<b>Τάση εξόδου αντιστροφέα μετά το φίλτρο</b>	4916.3 V
<b>Ρεύμα εξόδου αντιστροφέα μετά το φίλτρο</b>	268.28 A
<b>Τάση εισόδου Μ/Σ πλοίου 5kV/6.6kV</b>	5548.101 V
<b>Ρεύμα εισόδου Μ/Σ πλοίου 5kV/6.6kV</b>	261.58 A
<b>Τάση εξόδου Μ/Σ πλοίου 5kV/6.6kV</b>	6354.8 V
<b>Ρεύμα εξόδου Μ/Σ πλοίου 5kV/6.6kV</b>	201.96 A

### 6.3 Επίδραση γωνίας κεραυνικού πλήγματος σε διάταξη χωρίς προστασία



Εικόνα 52. Σημείο κεραυνικού πλήγματος και σημεία μετρήσεων.

Στην παρούσα υποενότητα, πάρθηκαν μετρήσεις στα σημεία της Εικόνας 52, για τις περιπτώσεις κεραυνικών πληγμάτων, LPL-I, αρνητικών και επακόλουθων κυμάτων, καθώς και θετικών κεραυνών. Τα κεραυνικά χτυπήματα συμβαίνουν στην είσοδο του μετασχηματιστή ξηράς, και συγκεκριμένα στη φάση Α, θεωρώντας ότι αυτό είναι το χειρότερο σενάριο κεραυνικού πλήγματος για τη συγκεκριμένη τοπολογία. Τα κεραυνικά πλήγματα που σημειώθηκαν, έγιναν σε διαφορετικές γωνίες, ώστε να διαπιστωθεί ποια αποτελεί μεγαλύτερη απειλή για το εν λόγω σύστημα, όπως επίσης και να γίνει καλύτερη εκτίμηση των υπερτάσεων και υπερρευσμάτων στα

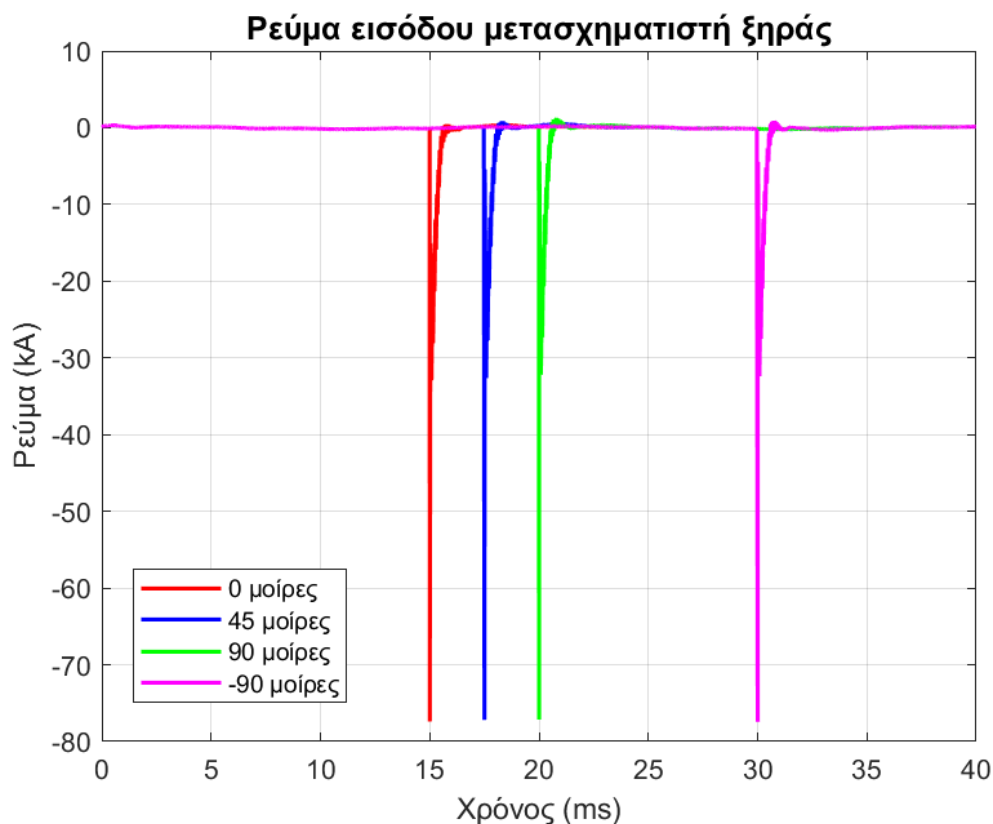
ενδεδειγμένα σημεία του Πίνακα 20, αμελώντας το μεταβατικό φαινόμενο που εξελίσσεται σε αρχικούς χρόνους, εξαιτίας του προγράμματος προσομοίωσης.

Πίνακας 20. Επεξήγηση σημείων μετρήσεων της εικόνας 53.

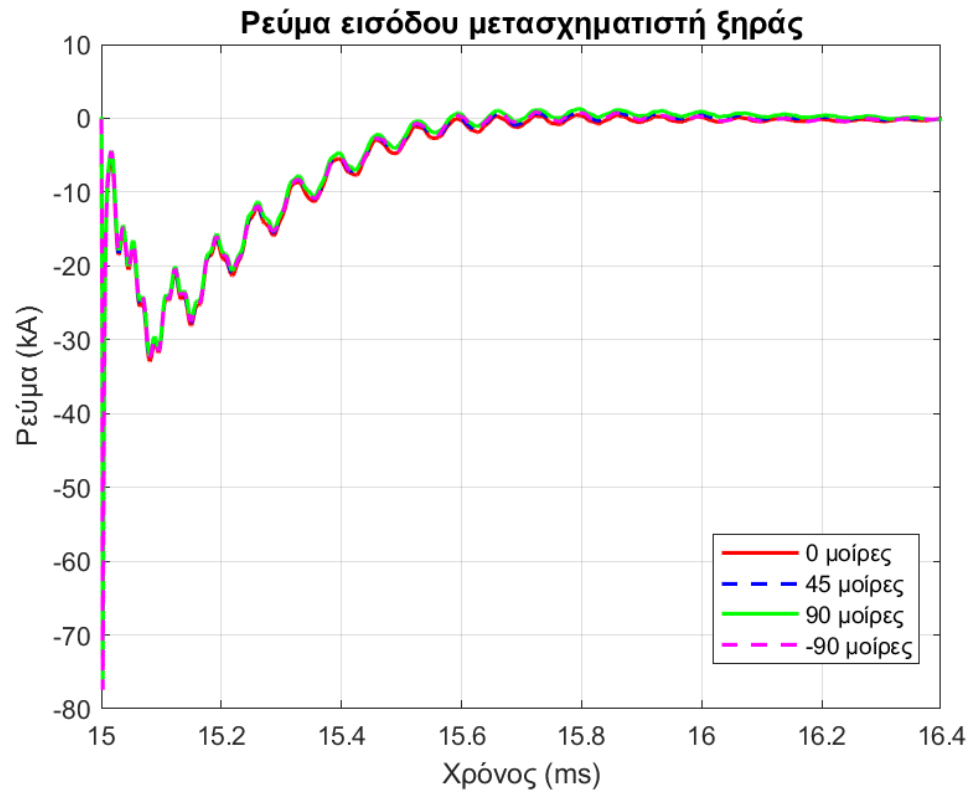
Σημείο 1	Ρεύμα και τάση εισόδου Μ/Σ ξηράς
Σημείο 2	Ρεύμα και τάση εξόδου Μ/Σ ξηράς
Σημείο 3	Τάση, ρεύμα στον θετικό/αρνητικό ακροδέκτη της εξόδου του ανορθωτή
Σημείο 4	Ρεύμα και τάση εισόδου καλωδίου σύνδεσης
Σημείο 5	Ρεύμα και τάση εξόδου Μ/Σ πλοίου

Ακολουθούν τα διαγράμματα των μετρήσεων, με κεραυνικά πλήγματα στις γωνίες  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, -90^\circ$ .

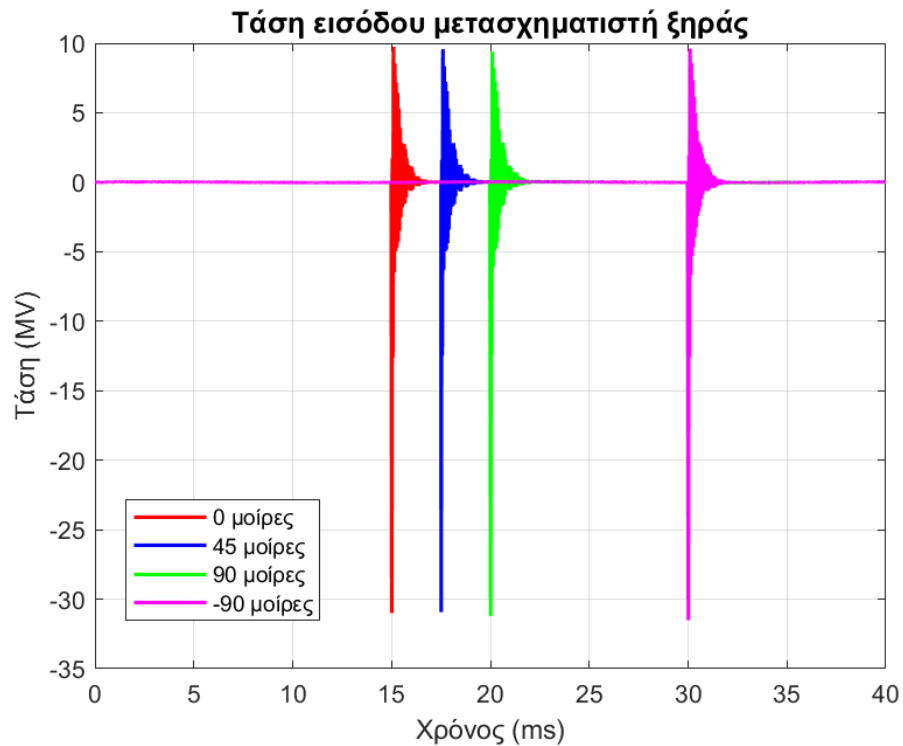
- Αρνητικό κεραυνικό πλήγμα (Εικόνα 53 – 64):



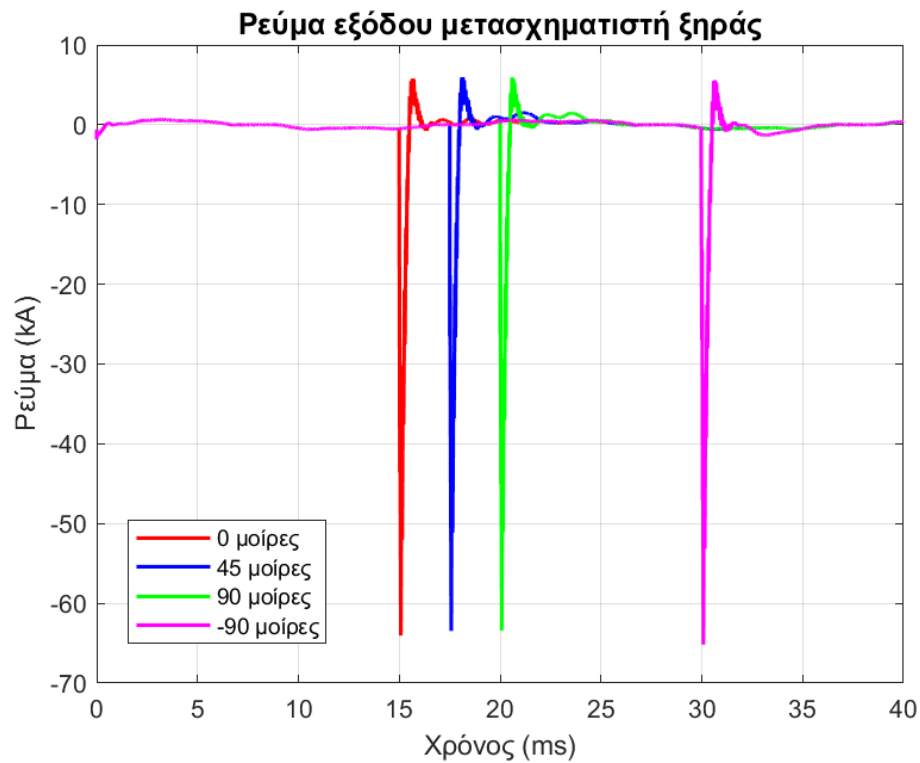
Εικόνα 53. Ρεύματα εισόδου μετασχηματιστή ξηράς, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – αρνητικό πλήγμα.



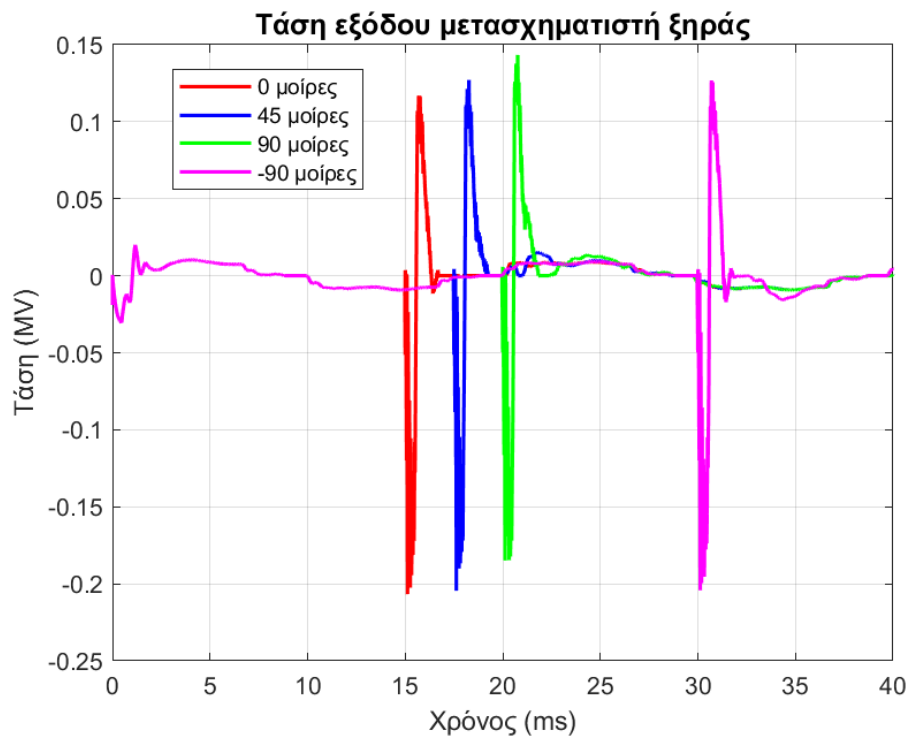
Εικόνα 54. Ρεύματα εισόδου μετασχηματιστή ξηράς με κοινή αρχή, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – αρνητικό πλήγμα..



Εικόνα 55. Τάσεις εισόδου μετασχηματιστή ξηράς, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – αρνητικό πλήγμα.

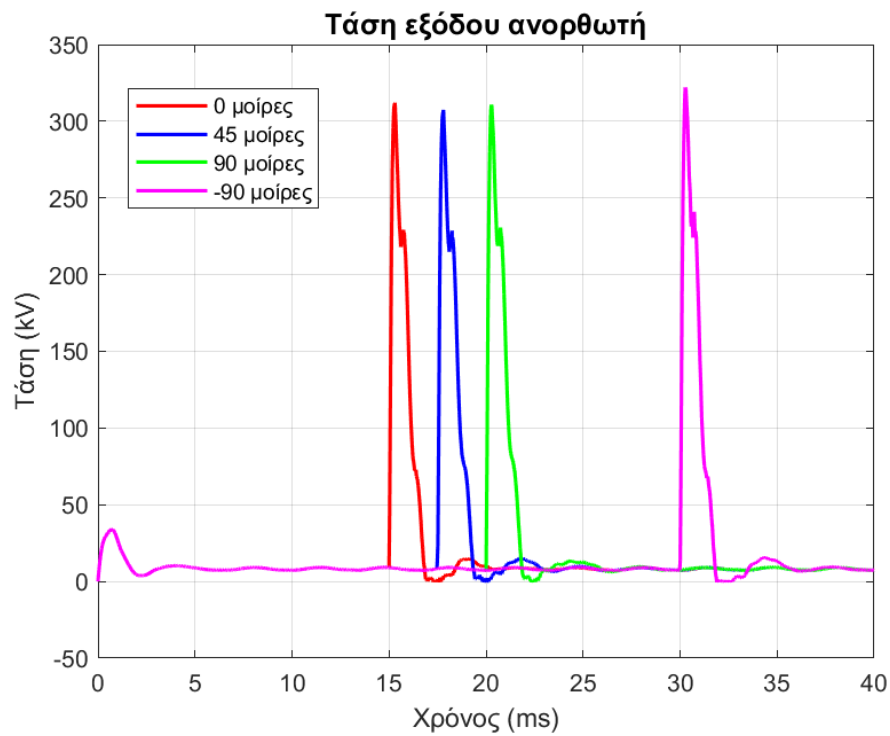


Εικόνα 56. Ρεύματα εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – αρνητικό πλήγμα.

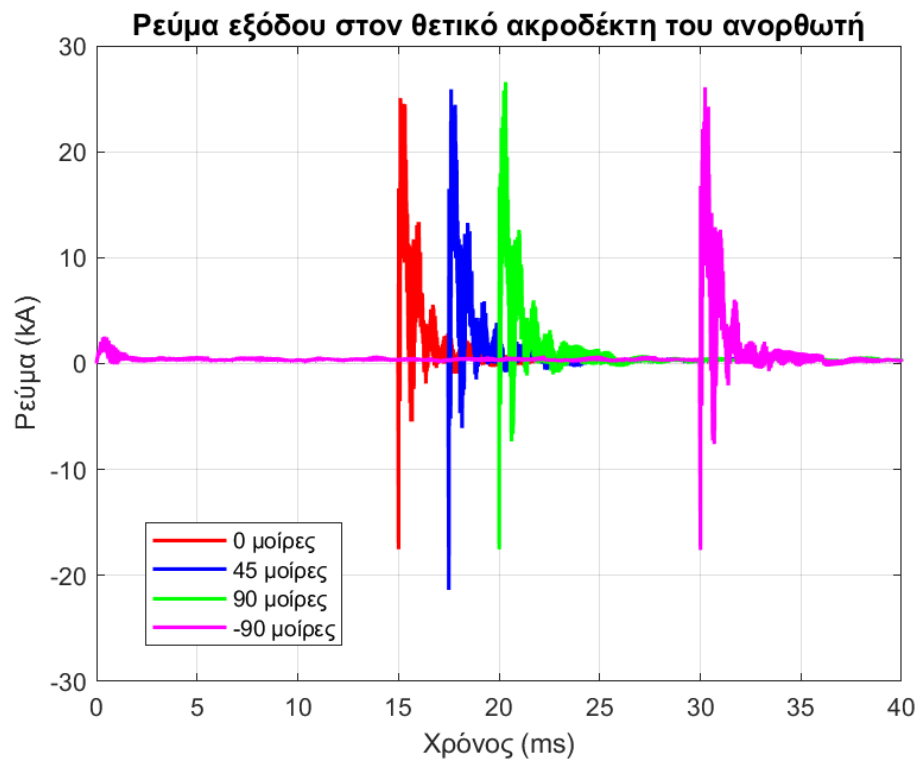


Εικόνα 57. Τάσεις εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – αρνητικό πλήγμα.

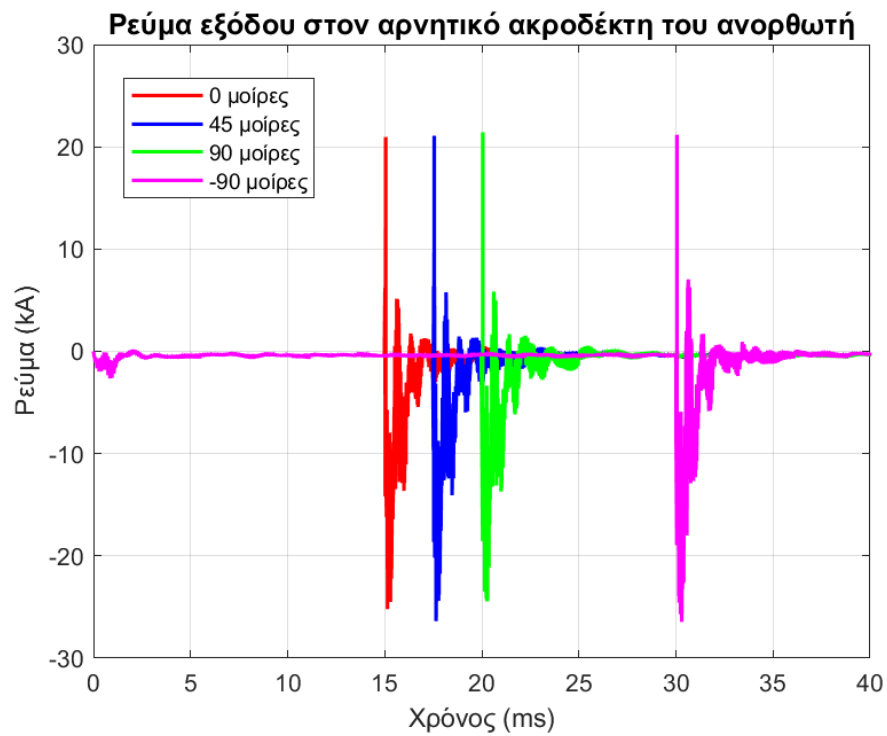




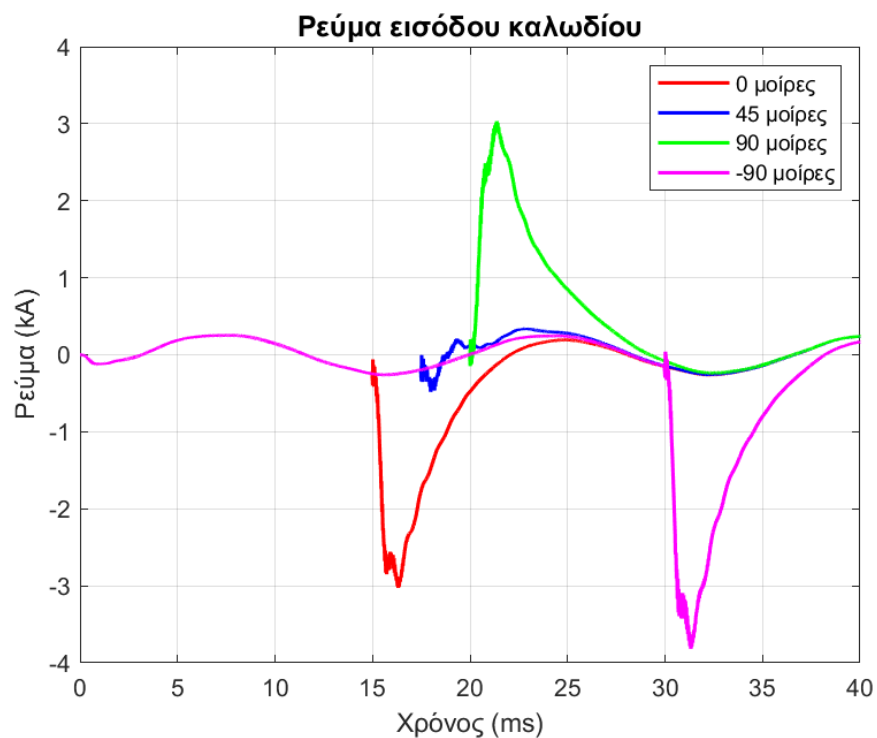
Εικόνα 58. Τάσεις εξόδου ανορθωτή, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – αρνητικό πλήγμα.



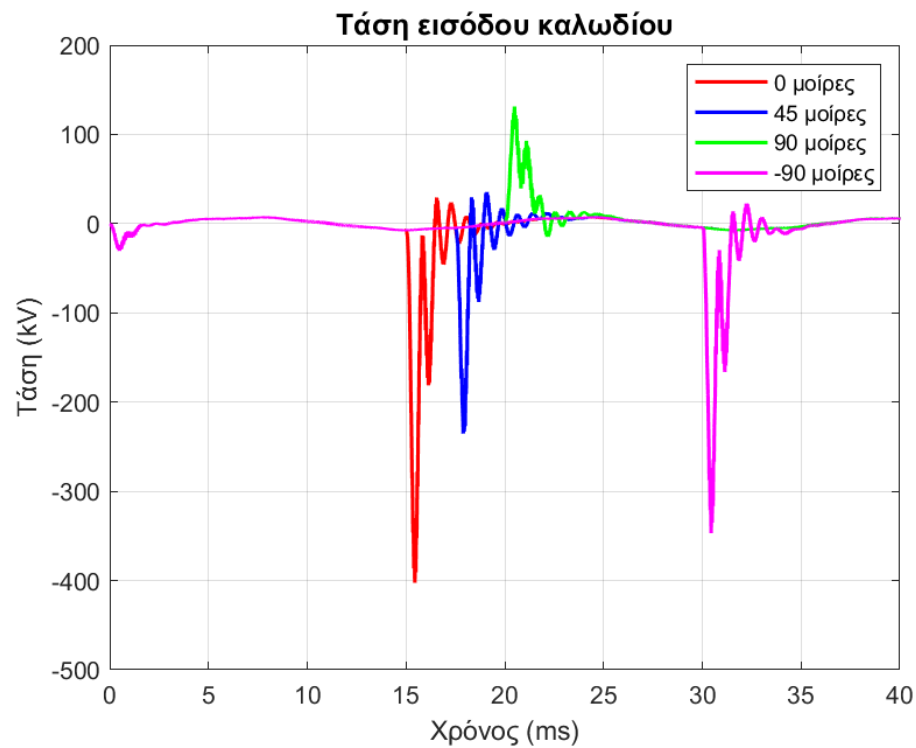
Εικόνα 59. Ρεύματα εξόδου ανορθωτή στον θετικό ακροδέκτη, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – αρνητικό πλήγμα.



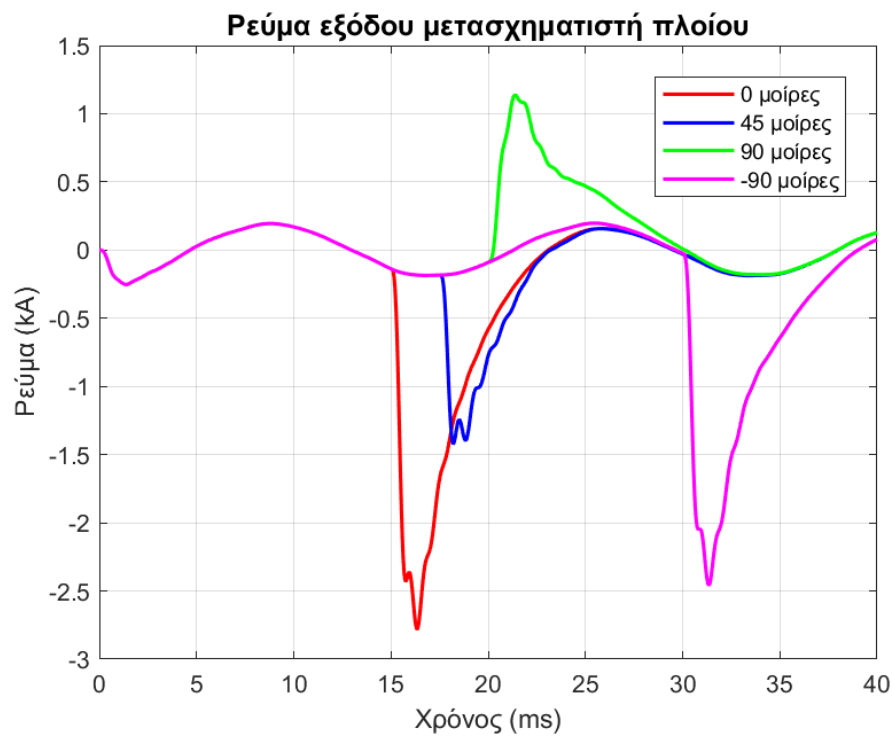
Εικόνα 60. Ρεύματα εξόδου ανορθωτή στον αρνητικό ακροδέκτη, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – αρνητικό πλήγμα.



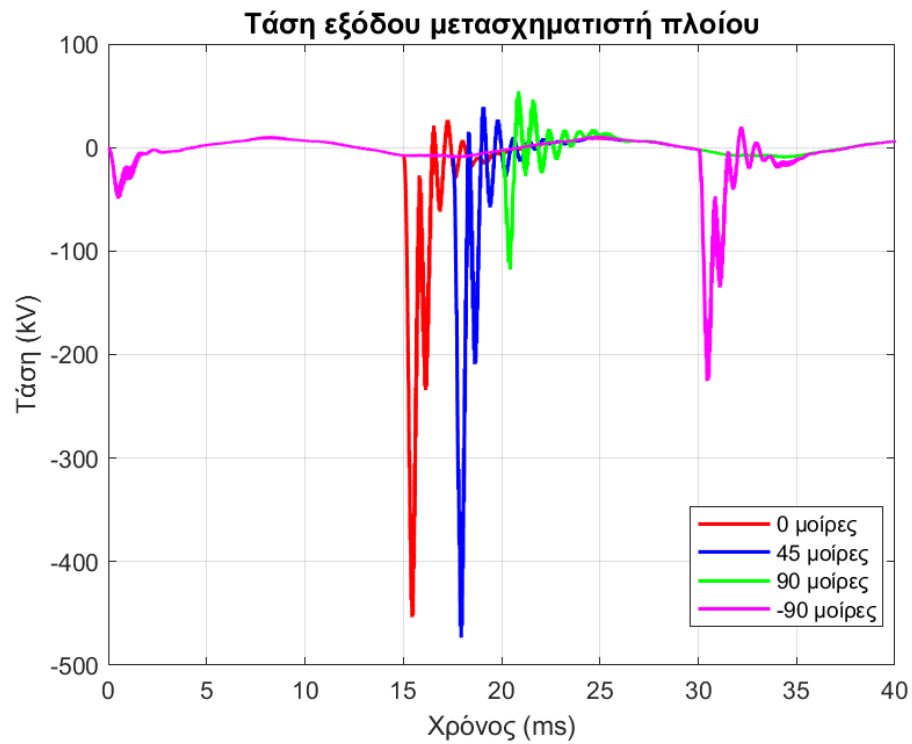
Εικόνα 61. Ρεύματα εισόδου καλωδίου σύνδεσης, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – αρνητικό πλήγμα..



Εικόνα 62. Τάσεις εισόδου καλωδίου σύνδεσης, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – αρνητικό πλήγμα.

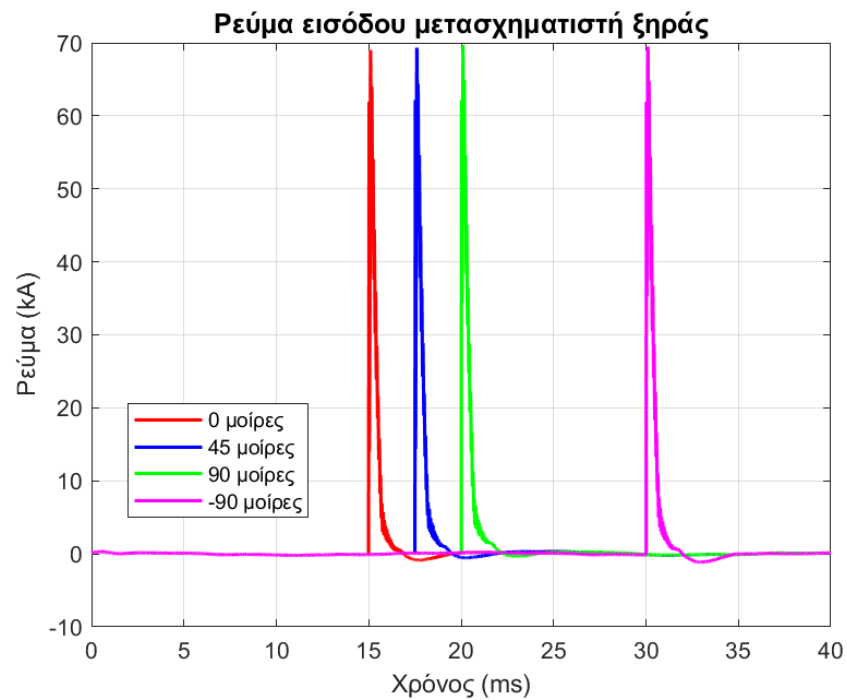


Εικόνα 63. Ρεύματα εξόδου μετασχηματιστή πλοίου, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – αρνητικό πλήγμα.

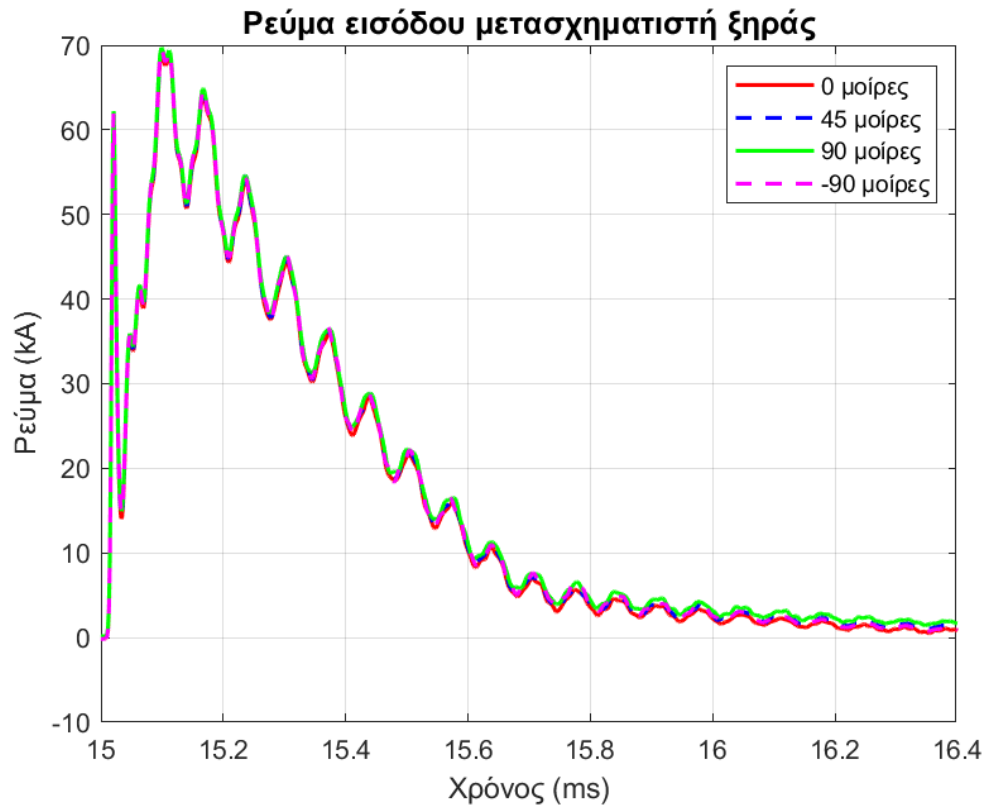


Εικόνα 64. Τάσεις εξόδου μετασχηματιστή πλοίου, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – αρνητικό πλήγμα.

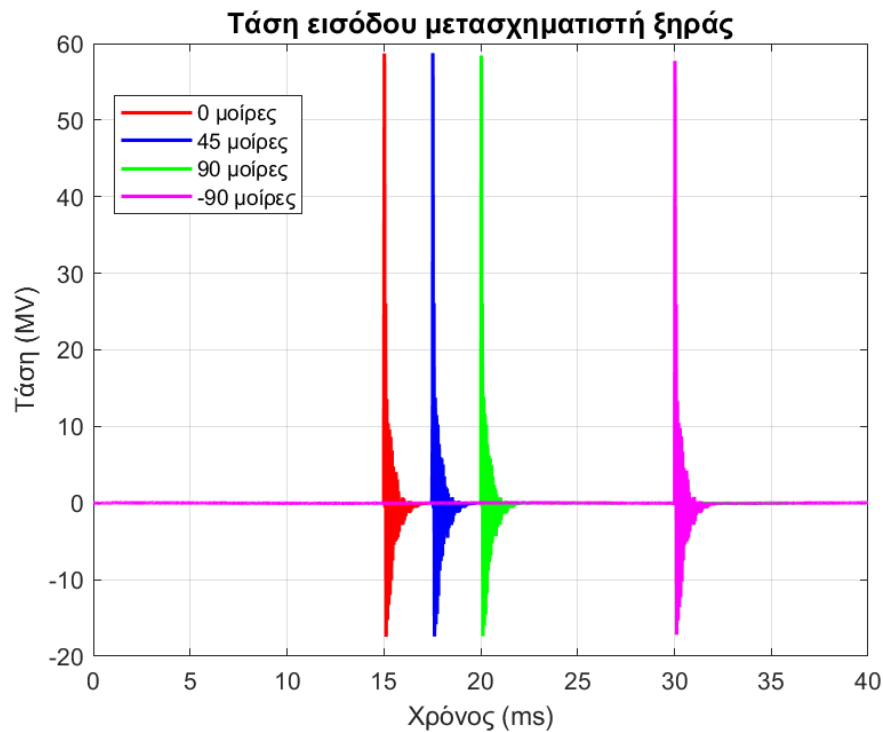
- Θετικό κεραυνικό πλήγμα (Εικόνα 65 – 76):



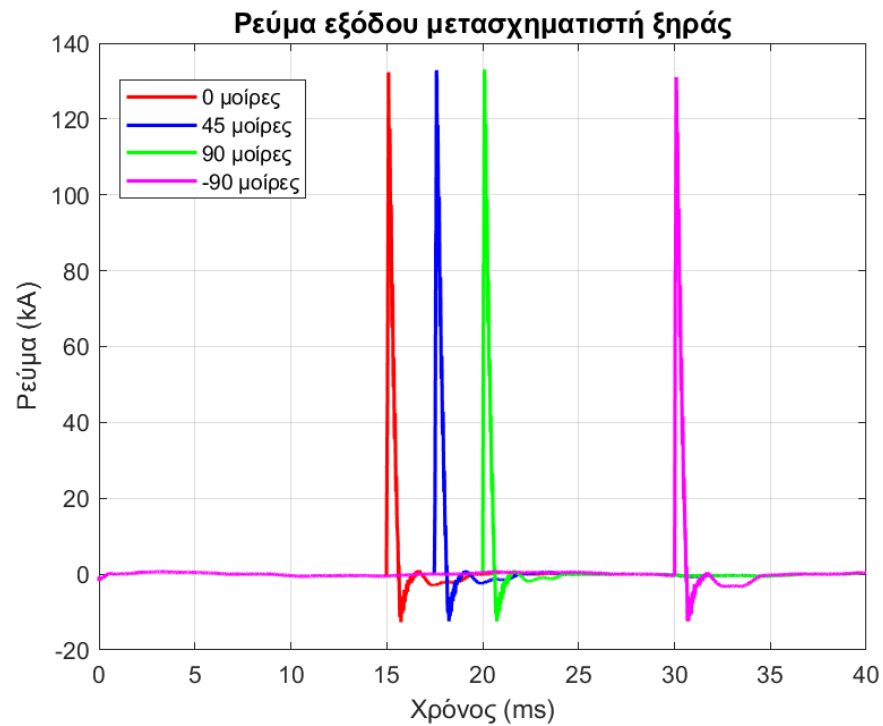
Εικόνα 65. Ρεύματα εισόδου μετασχηματιστή ξηράς, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – θετικό πλήγμα.



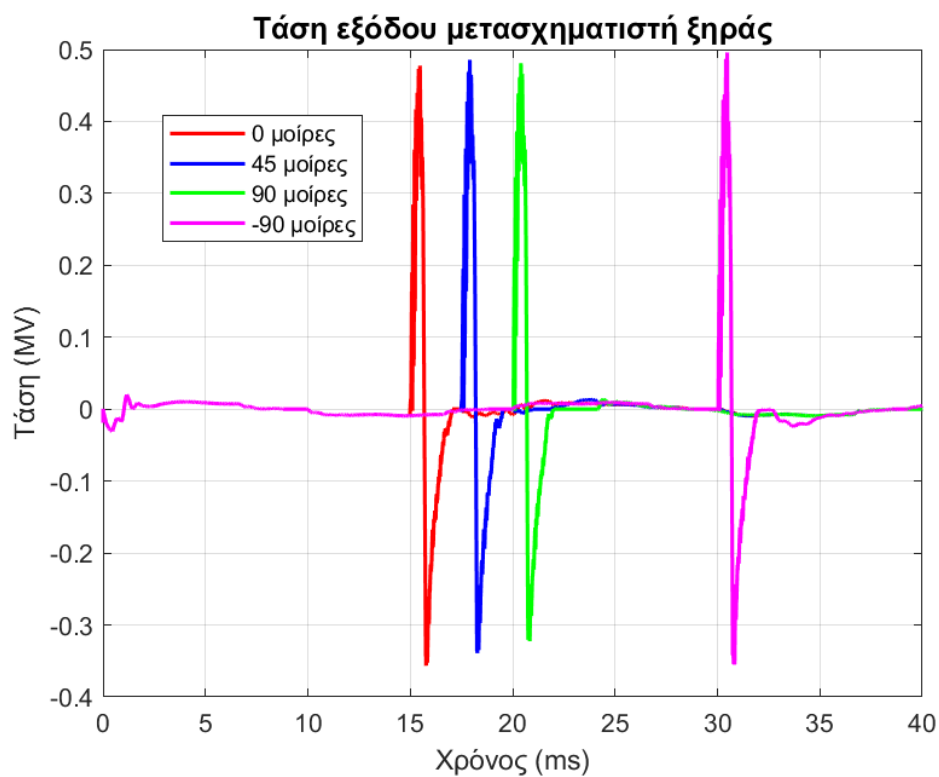
Εικόνα 66. Ρεύματα εισόδου μετασχηματιστή ξηράς με κοινή αρχή, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – θετικό πλήγμα.



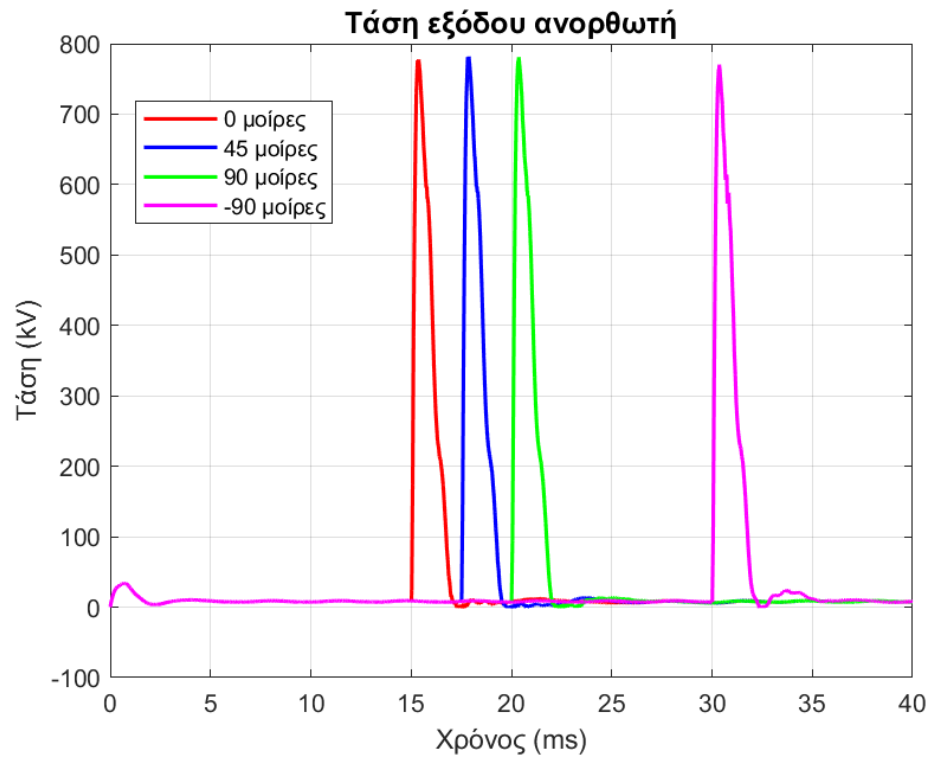
Εικόνα 67. Τάσεις εισόδου μετασχηματιστή ξηράς, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – θετικό πλήγμα.



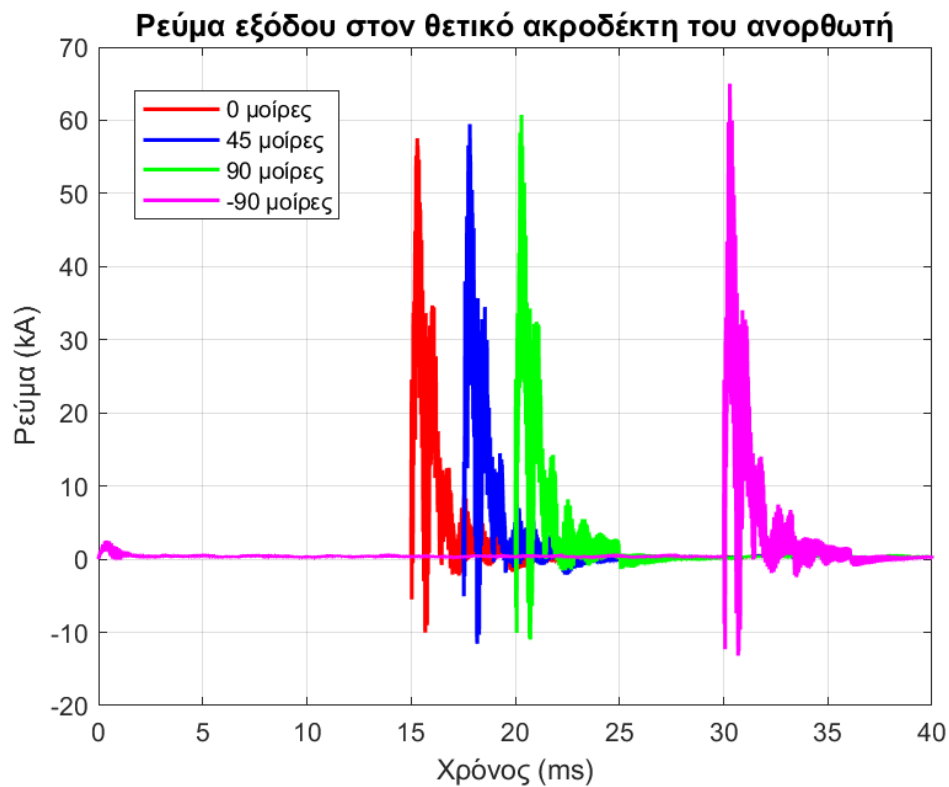
Εικόνα 68. Ρεύματα εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – θετικό πλήγμα.



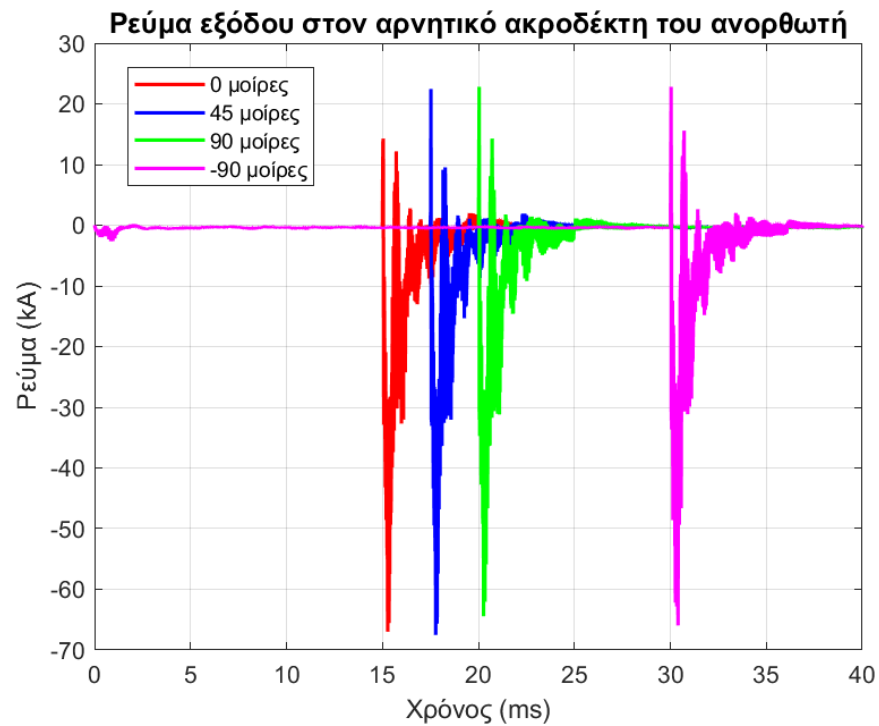
Εικόνα 69. Τάσεις εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – θετικό πλήγμα.



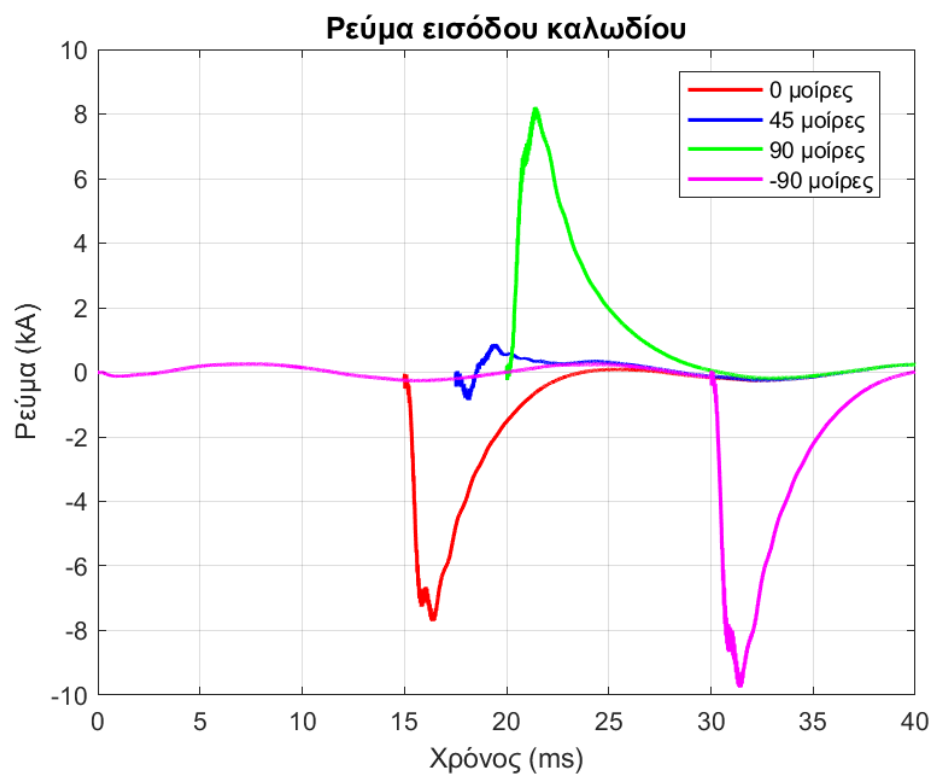
Εικόνα 70. Τάσεις εξόδου ανορθωτή, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – θετικό πλήγμα.



Εικόνα 71. Ρεύματα εξόδου ανορθωτή στον θετικό ακροδέκτη, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – θετικό πλήγμα.

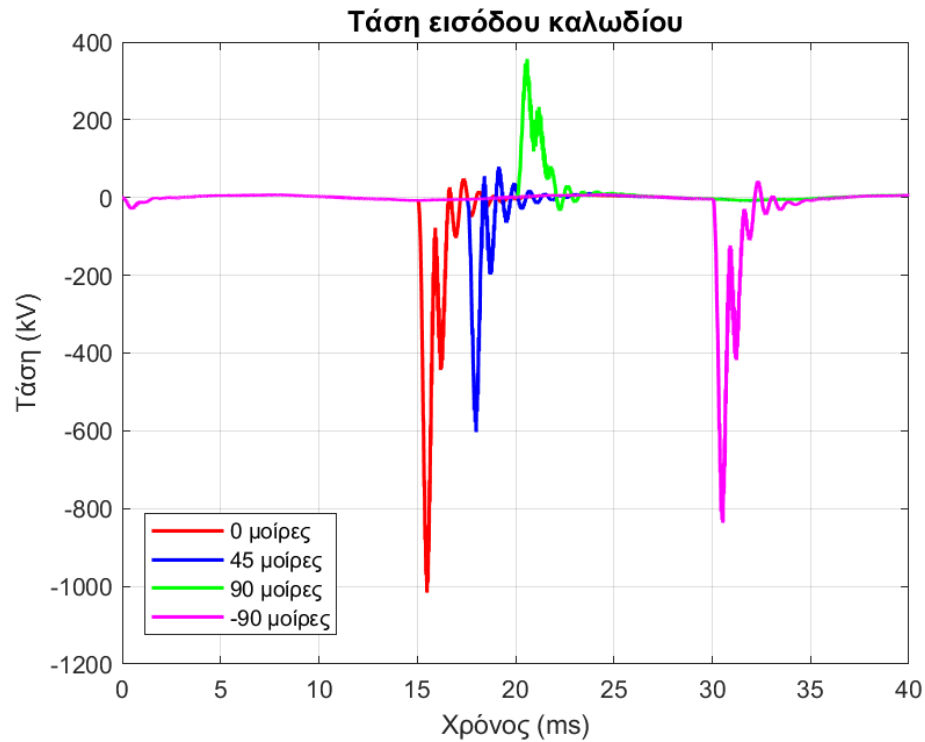


Εικόνα 72. Ρεύματα εξόδου ανορθωτή στον αρνητικό ακροδέκτη, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – θετικό πλήγμα.

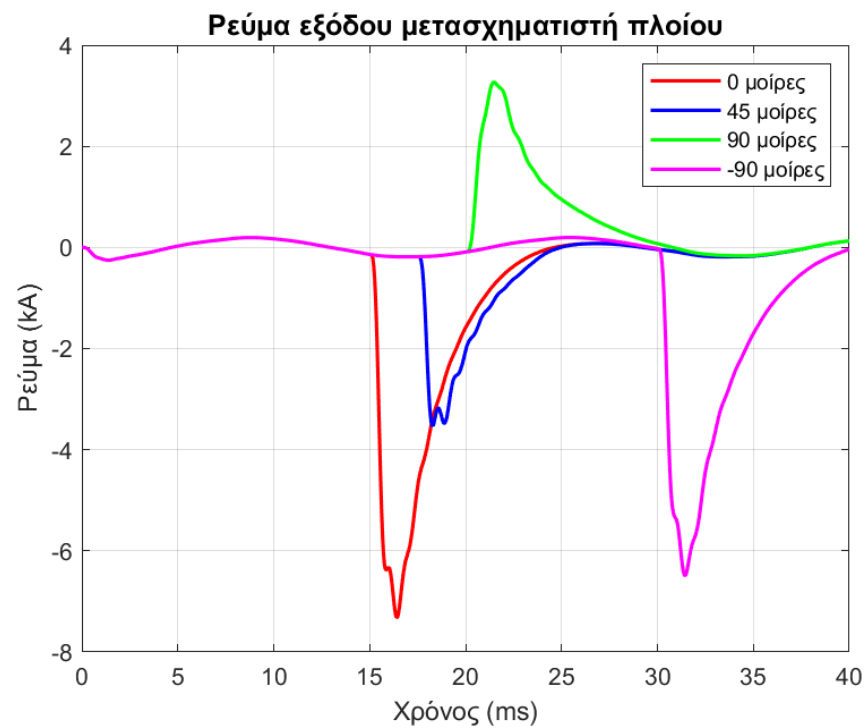


Εικόνα 73. Ρεύματα εισόδου καλωδίου σύνδεσης, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – θετικό πλήγμα.

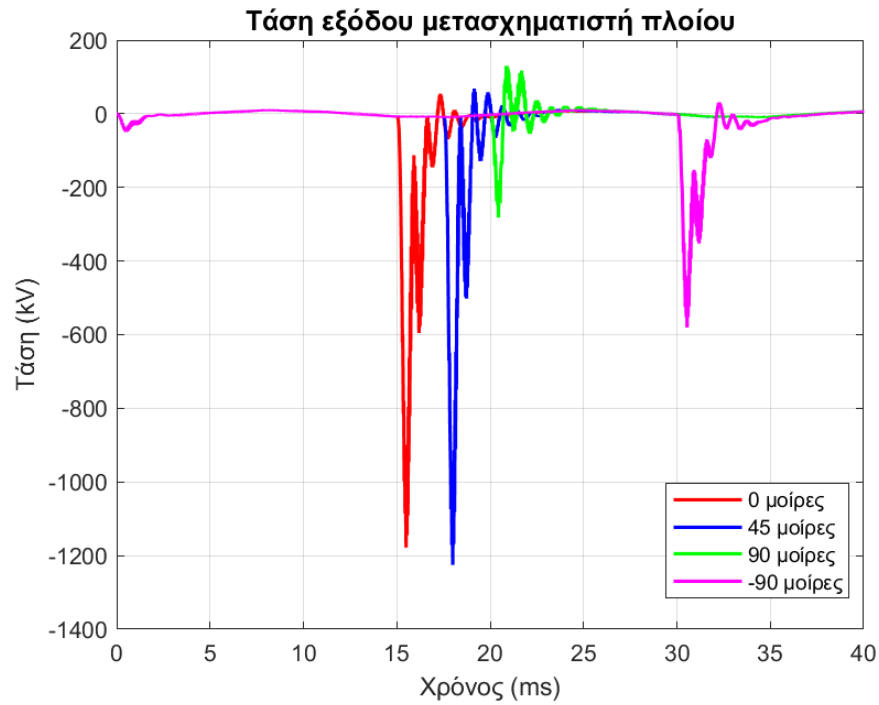




Εικόνα 74. Τάσεις εισόδου καλωδίου σύνδεσης, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – θετικό πλήγμα.

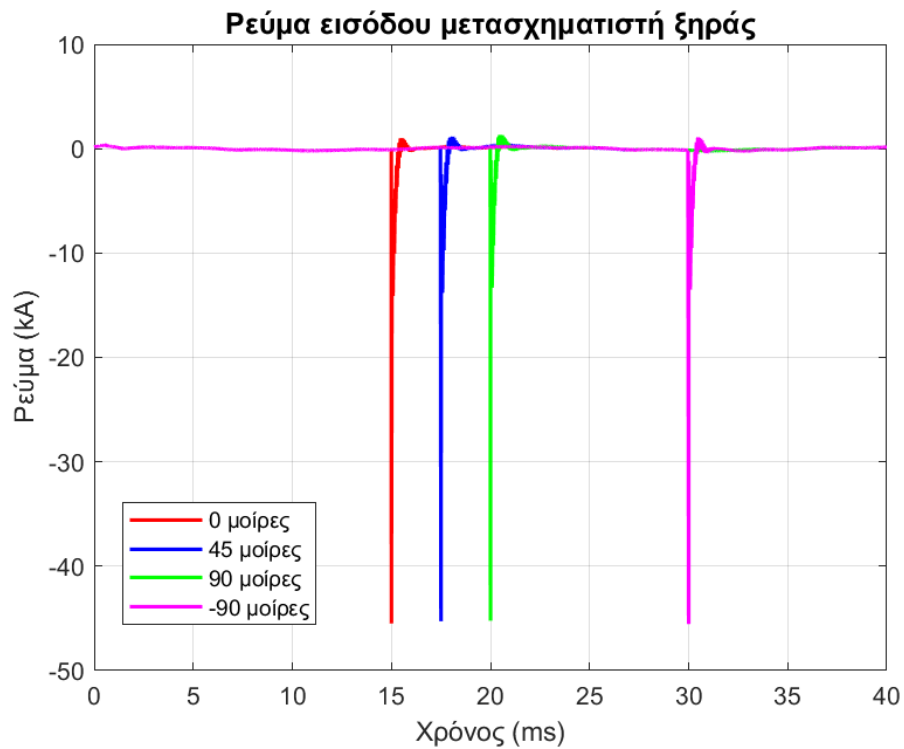


Εικόνα 75. Ρεύματα εξόδου μετασχηματιστή πλοίου, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – θετικό πλήγμα.

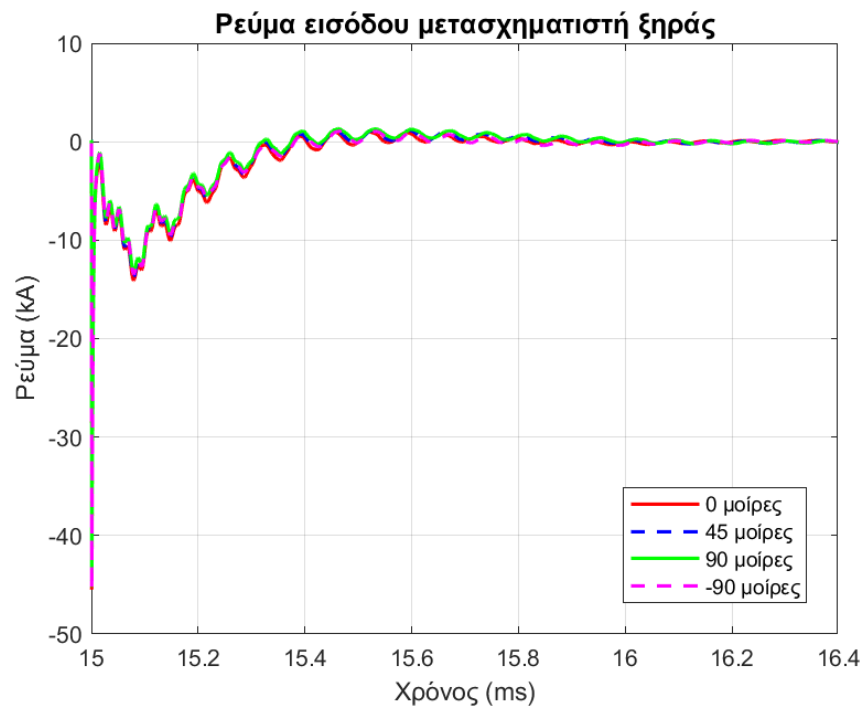


Εικόνα 76. Τάσεις εξόδου μετασχηματιστή πλοίου, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – θετικό πλήγμα.

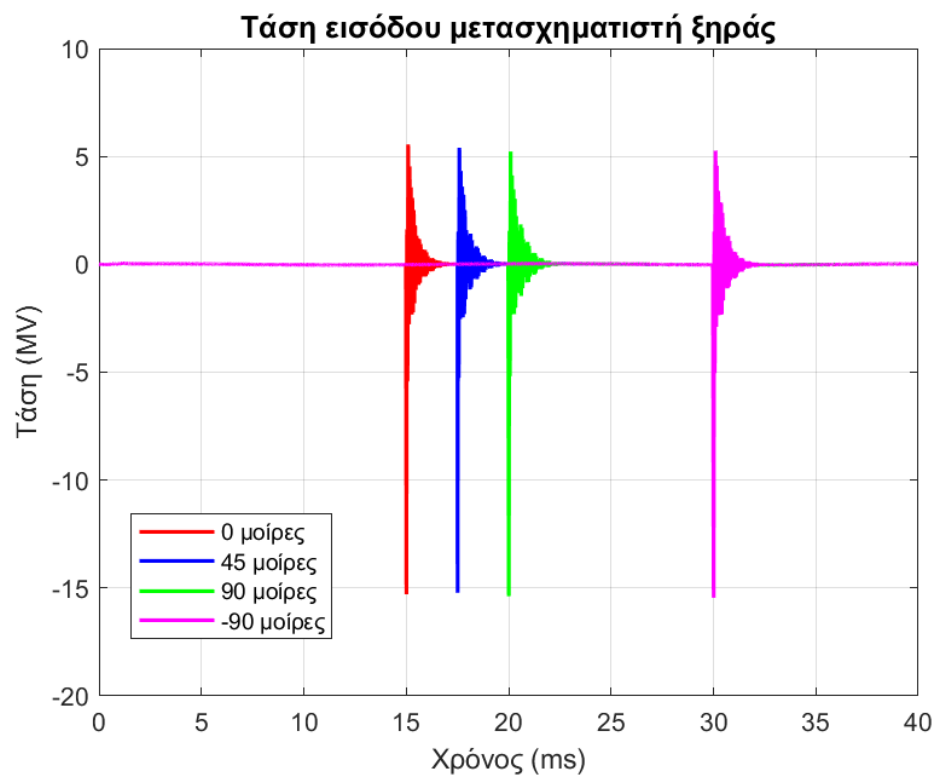
- Επακόλουθο αρνητικό κεραυνικό πλήγμα (Εικόνα 77 – 88):



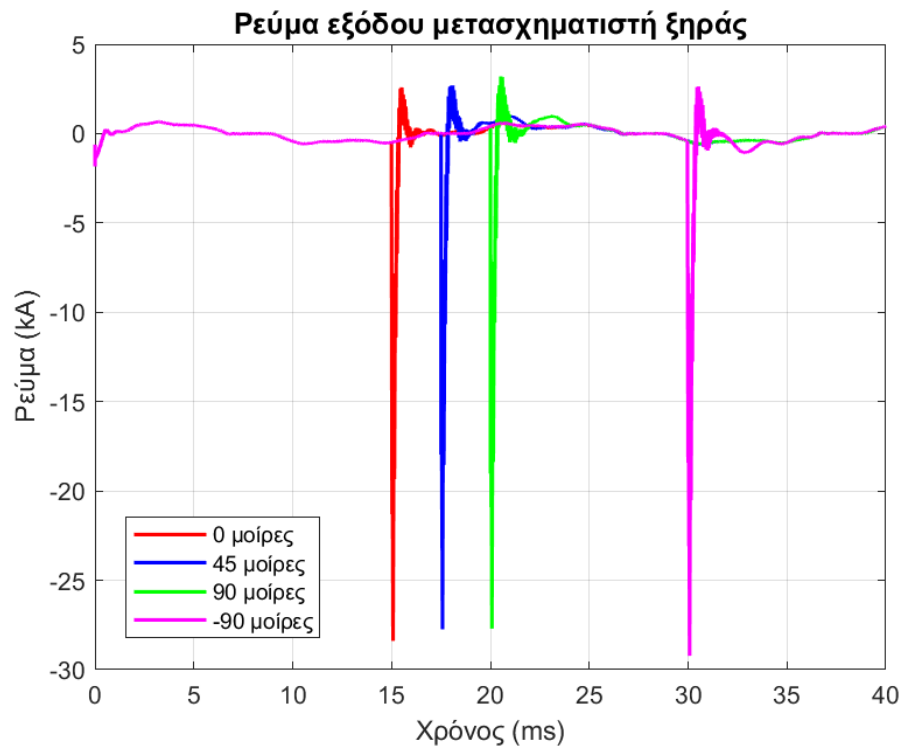
Εικόνα 77. Ρεύματα εισόδου μετασχηματιστή ξηράς, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – επακόλουθο πλήγμα.



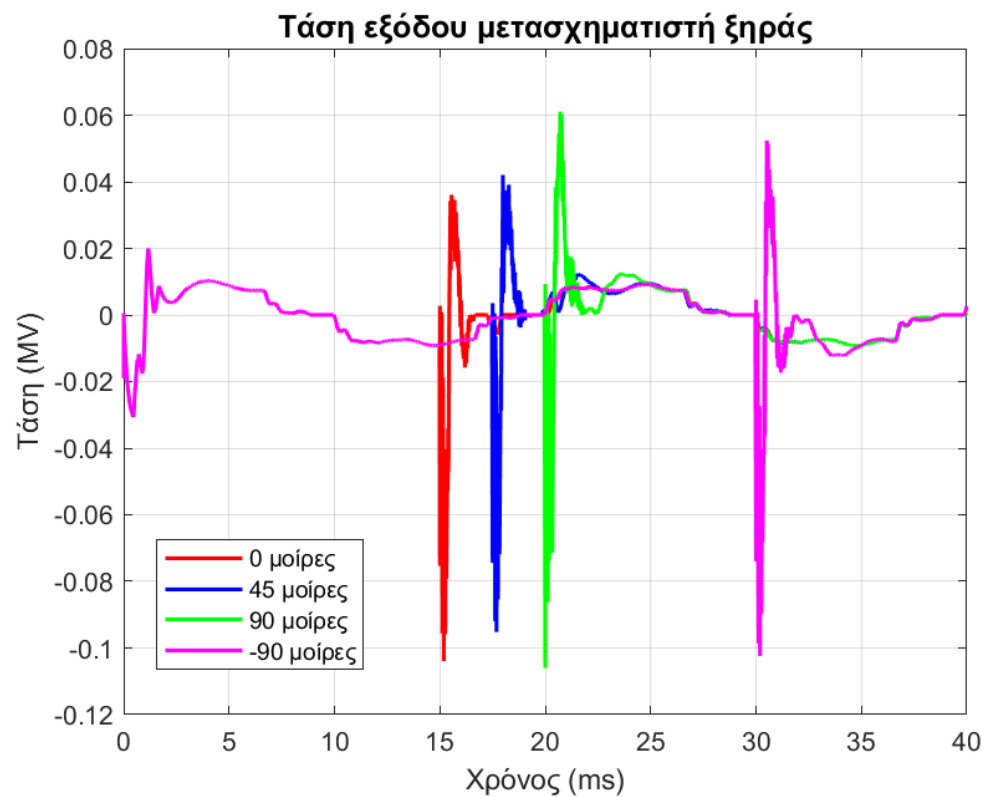
Εικόνα 78. Ρεύματα εισόδου μετασχηματιστή ξηράς με κοινή αρχή, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – επακόλουθο πλήγμα.



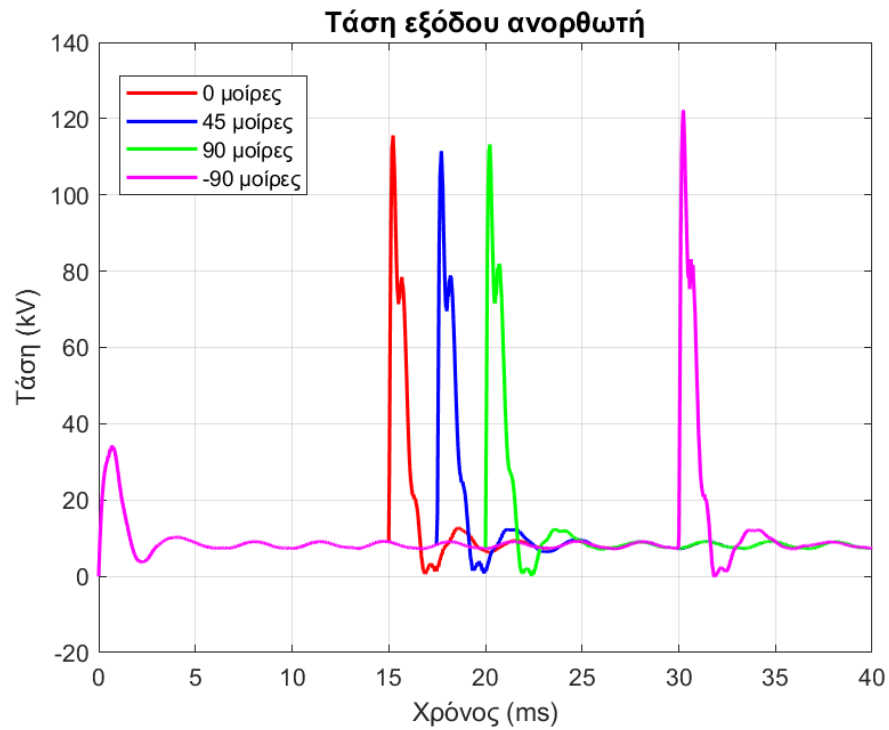
Εικόνα 79. . Τάσεις εισόδου μετασχηματιστή ξηράς, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – επακόλουθο πλήγμα.



Εικόνα 80. Ρεύματα εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – επακόλουθο πλήγμα.



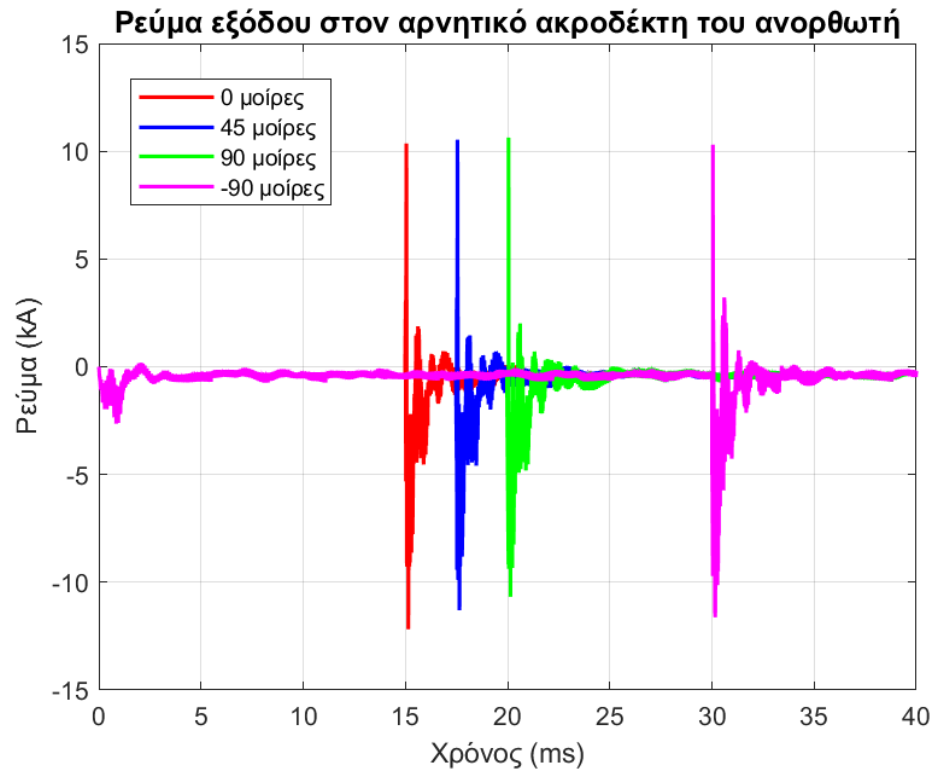
Εικόνα 81. Τάσεις εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – επακόλουθο πλήγμα.



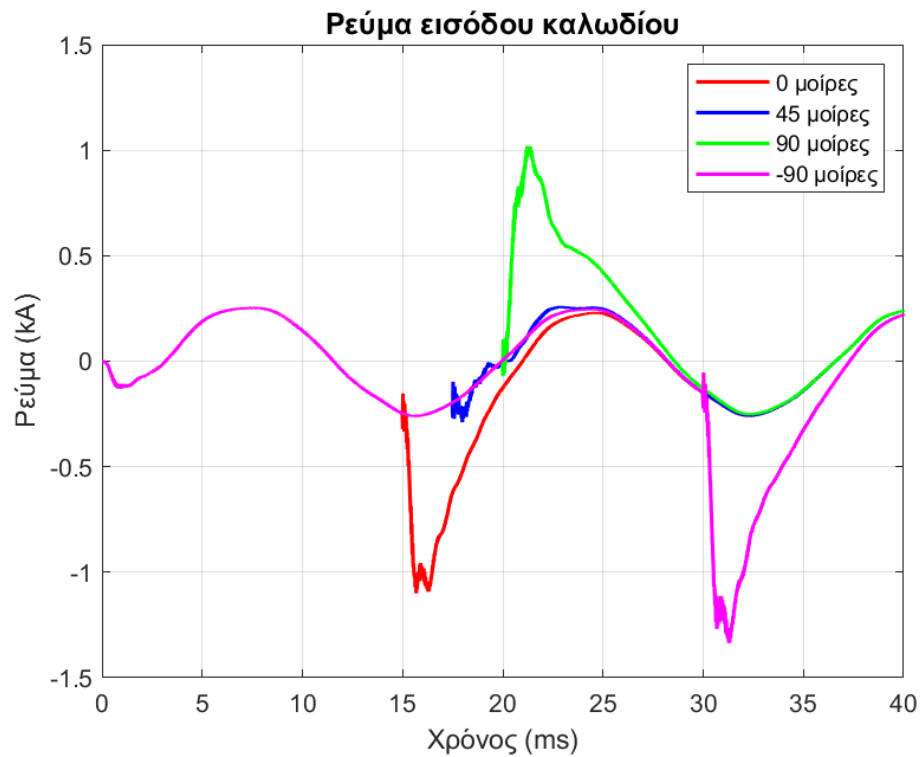
Εικόνα 82. Τάσεις εξόδου ανορθωτή, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – επακόλουθο πλήγμα.



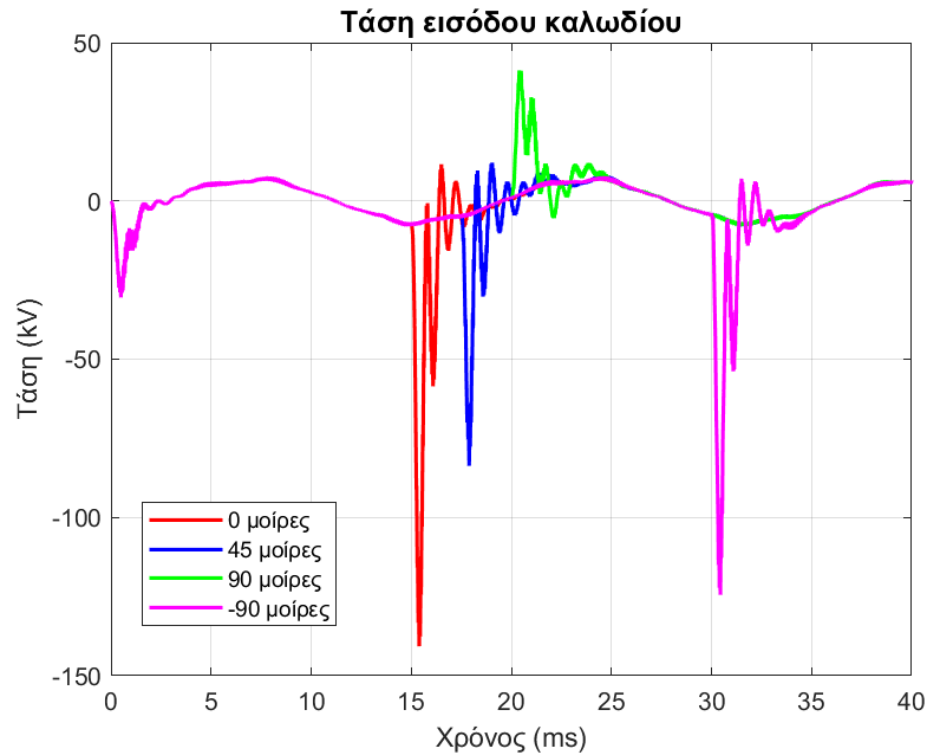
Εικόνα 83. Ρεύματα εξόδου ανορθωτή στον θετικό ακροδέκτη, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – επακόλουθο πλήγμα.



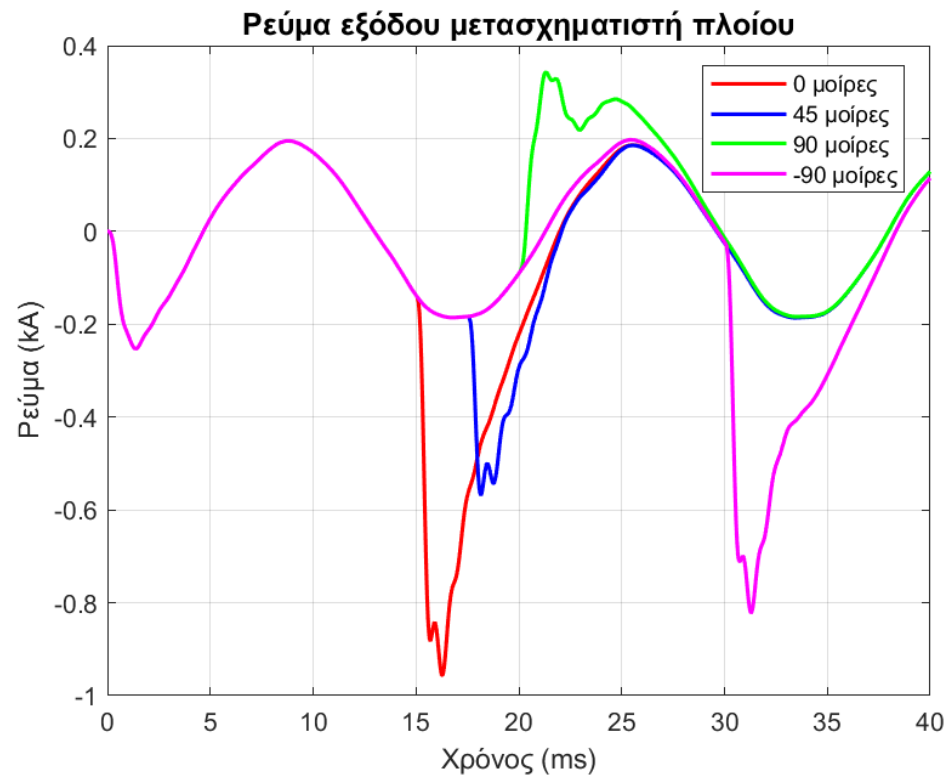
Εικόνα 84. Ρεύματα εξόδου ανορθωτή στον αρνητικό ακροδέκτη, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – επακόλουθο πλήγμα.



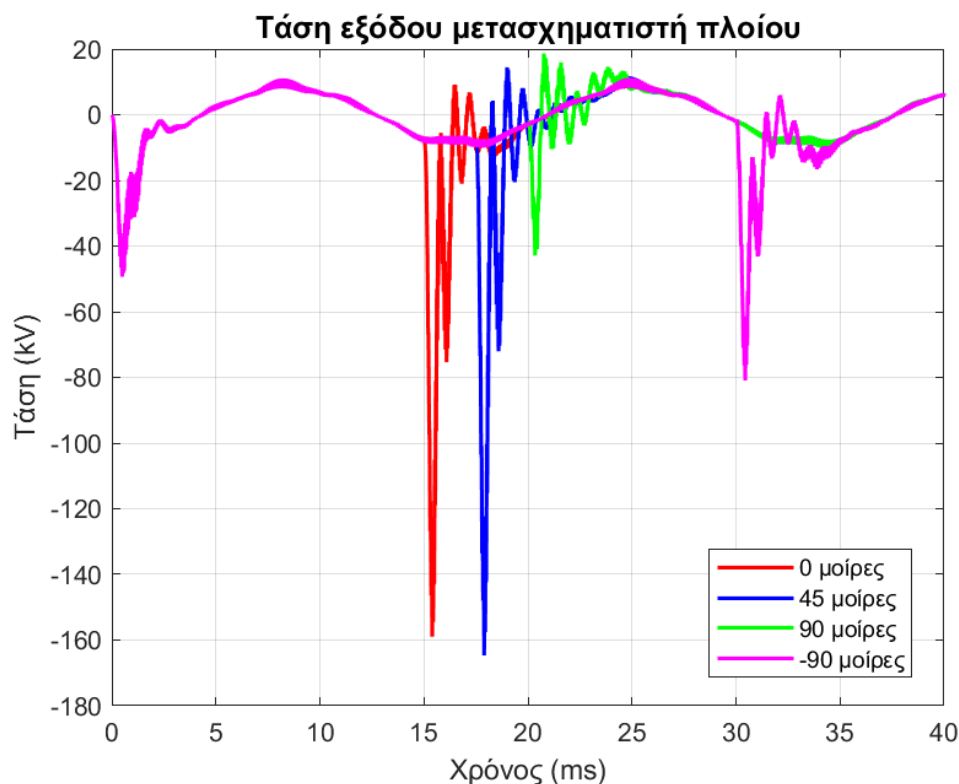
Εικόνα 85. Ρεύματα εισόδου καλωδίου σύνδεσης, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – επακόλουθο πλήγμα



Εικόνα 86. Τάσεις εισόδου καλωδίου σύνδεσης, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – επακόλουθο πλήγμα.



Εικόνα 87. Ρεύματα εξόδου μετασχηματιστή πλοίου, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – επακόλουθο πλήγμα.



Εικόνα 88. Τάσεις εξόδου μετασχηματιστή πλοίου, έπειτα από κεραυνικό πλήγμα σε διαφορετικές γωνίες – επακόλουθο πλήγμα.

Ακολουθεί ο πίνακας με τις απόλυτες μέγιστες μετρούμενες τιμές τάσης εισόδου του μετασχηματιστή ξηράς και του ρεύματος εξόδου του μετασχηματιστή του πλοίου:

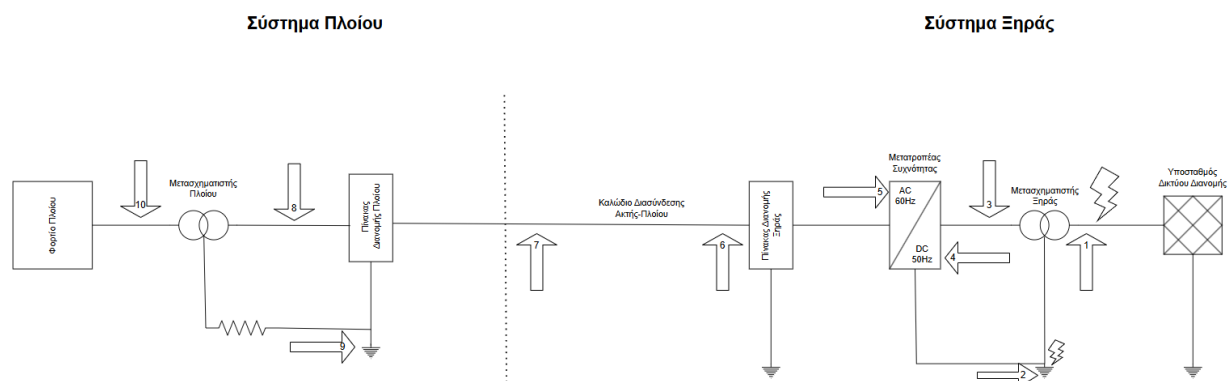
Πίνακας 21. Απόλυτες τιμές των μέγιστων ρευμάτων και τάσεων στις διάφορες γωνίες του εφαρμοζόμενου κεραυνικού πλήγματος.

Γωνίες σε μοίρες	Αρνητικό πλήγμα – LPL I		Θετικό πλήγμα – LPL I		Επακόλουθο πλήγμα – LPL I	
	Τάση (MV)	Ρεύμα (kA)	Τάση (MV)	Ρεύμα (kA)	Τάση (MV)	Ρεύμα (kA)
<b>0</b>	30.88	2.44	59	6.513	15.4	0.863
<b>45</b>	31.3	2.747	58.8	7.297	15.4	0.968
<b>90</b>	31.5	2.777	58.412	7.377	15.5	0.986
<b>-90</b>	31.5	2.475	58.2	6.398	15.4	0.855



Από τον Πίνακα 21, παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες τιμές ρευμάτων και τάσεων στα τρία διαφορετικά είδη κεραυνικών πλήγμάτων, εντοπίζονται κατά πλειοψηφία στις  $90^\circ$ . Για τον λόγο αυτό, θεωρούμε ότι το χειρότερο σενάριο κεραυνικού χτυπήματος είναι αυτό που συμβαίνει σε αυτή τη γωνία, επομένως εξετάζουμε τόσο τα σενάρια προστασίας όσο και τα επιμέρους LPLs, με το σενάριο αυτό. Διασαφηνίζεται ότι επιλέχθηκαν οι μέγιστες τιμές ρεύματος και τάσης, με βάση τη φάση όπου εμφανίζονταν με μεγαλύτερο πλάτος. Τα δε διαγράμματα αποτυπώνουν αποκλειστικά τη φάση Α.

#### 6.4 Επίδραση κεραυνικού πλήγματος σε διάταξη χωρίς προστασία – εφαρμογή όλων των πληγμάτων κατά IEC 62305-1



Εικόνα 89. Σημεία κεραυνικών πληγμάτων και μετρήσεων.

Στην παρούσα υποενότητα, πάρθηκαν μετρήσεις στα σημεία της Εικόνας 89, για τις περιπτώσεις κεραυνικών πληγμάτων όλων των περιπτώσεων LPL (I- II-III), αρνητικών, θετικών και επακόλουθων κεραυνικών πληγμάτων, σε διάταξη χωρίς προστασία έναντι στις υπερτάσεις και τους κεραυνούς. Τα σημεία του συστήματος στα οποία εφαρμόστηκαν τα κεραυνικά πλήγματα είναι η είσοδος του μετασχηματιστή ξηράς, στη φάση Α, αλλά και στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς. Λόγω του ότι η χειρότερη γωνία κεραυνικού χτυπήματος είναι οι  $90^\circ$ , όλες οι περιπτώσεις κεραυνού έγιναν βάσει αυτής. Ακολουθεί επεξηγηματικός πίνακας για τα σημεία μέτρησης στη διάταξη χωρίς προστασία:

Πίνακας 22. Σημεία μέτρησης διάταξης χωρίς προστασία.

<b>Σημείο 1</b>	Ρεύμα που επιστρέφει στην πηγή, ρεύμα και τάση εισόδου Μ/Σ ξηράς
<b>Σημείο 2</b>	Ρεύμα γείωσης Μ/Σ ξηράς
<b>Σημείο 3</b>	Ρεύμα και τάση εξόδου Μ/Σ ξηράς
<b>Σημείο 4</b>	Ρεύμα πυκνωτή φίλτρου ανορθωτή, τάση εξόδου ανορθωτή, ρεύματα εξόδου στον θετικό και αρνητικό ακροδέκτη του ανορθωτή
<b>Σημείο 5</b>	Ρεύμα και τάση αντιστροφέα πριν το φίλτρο, ρεύμα και τάση πυκνωτή φίλτρου αντιστροφέα, τάση αντίστασης φίλτρου αντιστροφέα
<b>Σημείο 6</b>	Ρεύμα και τάση εισόδου καλωδίου, τάσεις μεταξύ αγωγών και μανδύων μόνωσης καλωδίου, τάσεις μεταξύ εξωτερικών και εσωτερικών μανδύων μόνωσης καλωδίου
<b>Σημείο 7</b>	Ρεύμα και τάση εξόδου καλωδίου, τάσεις μεταξύ αγωγών και μανδύων μόνωσης καλωδίου, τάσεις μεταξύ εξωτερικών και εσωτερικών μανδύων μόνωσης καλωδίου
<b>Σημείο 8</b>	Ρεύμα και τάση εισόδου Μ/Σ πλοίου
<b>Σημείο 9</b>	Ρεύμα γείωσης πλοίου
<b>Σημείο 10</b>	Ρεύμα και τάση εξόδου Μ/Σ πλοίου

Ακολουθούν οι αναλυτικοί πίνακες των μετρήσεων των μέγιστων τιμών ρευμάτων και τάσεων, των παραπάνω σημείων, χωρισμένα ανάλογα το κεραυνικό πλήγμα και την κατηγορία LPL.

Πίνακας 23. Μετρήσεις μέγιστων τιμών πολικών τάσεων και ρευμάτων, στη χωρίς προστασία διάταξη, πληγμένη από κεραυνό αρνητικό στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς, LPL-I.

Αρνητικό Κεραυνικό πλήγμα - LPL-I		
Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
51128	18675	19568
Είσοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
-77137	18850	19568
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-3.12E+07	3.15E+07	1.98E+06
Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (A)		
-77052		
Έξοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
-63397	63134	12069
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-1.85E+05	3.11E+05	-2.62E+05
Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (A)	Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)	Ρεύμα στο + (A)
49049	3.11E+05	24984
Ρεύμα στο - (A)		
-24443		
Αντιστροφέας πριν το φίλτρο		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
-8887	-14482	12530
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-2.40E+05	4.00E+05	-3.74E+05
Φίλτρο αντιστροφέα		
Ρεύμα πυκνωτή (A)	Τάση πυκνωτή (V)	Τάση αντίστασης (V)
-13879	-2.07E+05	25507
Είσοδος αγωγών καλωδίων		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
3033.4	-3418.3	762.95
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
1.31E+05	-3.95E+05	2.74E+05
Τάση φ1-4 (V)	Τάση φ2-5 (V)	Τάση φ3-6 (V)
1.77E+05	-2.20E+05	60751
μανδύας 4-7 (V)	μανδύας 5-7 (V)	μανδύας 6-7 (V)
0.0006	-0.0008	0.0002

Έξοδος αγωγών καλωδίων		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
3000.3	-3390.8	733.78
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
1.31E+05	-3.95E+05	2.74E+05
Τάση φ1-4 (V)	Τάση φ2-5 (V)	Τάση φ3-6 (V)
1.77E+05	-2.20E+05	60771
μανδύας 4-7 (V)	μανδύας 5-7 (V)	μανδύας 6-7 (V)
-0.0006	0.0007	-0.0002
Έξοδος ΜΣ πλοίου		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
1138.2	-2789.6	1656.2
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-1.18E+05	-3.87E+05	5.02E+05
Ρεύμα γείωσης πλοίου (Α)		
-0.07		

Πίνακας 24. Μετρήσεις μέγιστων τιμών πολικών τάσεων και ρευμάτων, στη χωρίς προστασία διάταξη, πληγμένη από κεραυνό θετικό στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς, LPL-I.

Θετικό Κεραυνικό πλήγμα - LPL-I		
Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
-1.11E+05	-40447	-41248
Είσοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
69716	-40444	-41248
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
5.84E+07	-5.84E+07	2.26E+06
Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (Α)		
60470		
Έξοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
1.33E+05	-1.33E+05	13052
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
4.81E+05	-7.81E+05	4.79E+05
Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (Α)	Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)	Ρεύμα στο + (Α)

97996	7.81E+05	60734
<b>Ρεύμα στο - (A)</b>		
-64431		
<b>Αντιστροφέας πριν το φίλτρο</b>		
<b>Ρεύμα, φάση A (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση B (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
13561	-36460	25499
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-9.76E+05	1.09E+06	-9870.9
<b>Φίλτρο αντιστροφέα</b>		
<b>Ρεύμα πυκνωτή (A)</b>	<b>Τάση πυκνωτή (V)</b>	<b>Τάση αντίστασης (V)</b>
-34639	-5.53E+05	-63642
<b>Είσοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση A (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση B (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
8218.5	-8805.8	1553.9
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
3.57E+05	-9.99E+05	6.66E+05
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
4.37E+08	-5.70E+05	1.13E+05
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
0.002	-0.002	0.0005
<b>Έξοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση A (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση B (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
8121.4	-8785.8	1525.2
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
3.57E+05	-9.99E+05	6.66E+05
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
4.38E+05	-5.70E+05	1.13E+05
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
-0.002	0.002	-0.0004
<b>Έξοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση A (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση B (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
3272.4	-7375.7	4129.8
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-2.82E+05	-1.01E+06	1.24E+06

Ρεύμα γείωσης πλοίου (A)
0.109

Πίνακας 25. Μετρήσεις μέγιστων τιμών πολικών τάσεων και ρευμάτων, στη χωρίς προστασία διάταξη, πληγμένη από αρνητικό επακόλουθο κεραυνό στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς, LPL-I.

Επακόλουθο Κεραυνικό πλήγμα - LPL-I		
Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
22426	8350.8	8849.4
Είσοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
-45224	8351.2	8847.2
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-1.54E+07	1.54E+07	1.21E+06
Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (A)		
-45424		
Έξοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
-27705	27132	10308
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-1.06E+05	1.13E+05	-1.04E+05
Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (A)	Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)	Ρεύμα στο + (A)
22428	1.13E+05	11700
Ρεύμα στο - (A)		
-10670		
Αντιστροφείας πριν το φίλτρο		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
-4320.2	-5925.1	5012.4
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-1.31E+05	1.44E+05	-1.44E+05
Φίλτρο αντιστροφείας		
Ρεύμα πυκνωτή (A)	Τάση πυκνωτή (V)	Τάση αντίστασης (V)
-5553.4	-10202	-72289

Είσοδος αγωγών καλωδίων		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
1019.6	-1254.8	383.42
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
41261	-1.36E+05	94571
Τάση φ1-4 (V)	Τάση φ2-5 (V)	Τάση φ3-6 (V)
63701	-75481	24476
μανδύας 4-7 (V)	μανδύας 5-7 (V)	μανδύας 6-7 (V)
0.0002	-0.0003	0.0001
Έξοδος αγωγών καλωδίων		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
1014.5	-1245.4	367.92
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
41255	-1.36E+05	94551
Τάση φ1-4 (V)	Τάση φ2-5 (V)	Τάση φ3-6 (V)
64686	-75505	24500
μανδύας 4-7 (V)	μανδύας 5-7 (V)	μανδύας 6-7 (V)
-0.0002	0.0003	0.0001
Έξοδος ΜΣ πλοίου		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
342.78	-987.32	644.11
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-42878	-1.34E+05	1.73E+05
Ρεύμα γείωσης πλοίου (Α)		
-0.04		

Πίνακας 26. Μετρήσεις μέγιστων τιμών πολικών τάσεων και ρευμάτων, στη χωρίς προστασία διάταξη, πληγμένη από κεραυνό αρνητικό στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς, LPL-II.

Αρνητικό Κεραυνικό πλήγμα - LPL-II		
Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
38515	14000	14577
Είσοδος ΜΣ ξηράς		

Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
-57813	14000	14577
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-2.35E+07	2.36E+07	1.59E+06
Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (Α)		
-57787		
Έξοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
-47574	47521	9721.5
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-1.38E+05	2.35E+05	-2.00E+05
Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (Α)	Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)	Ρεύμα στο + (Α)
36829	2.35E+05	18923
Ρεύμα στο - (Α)		
-1.83E+04		
Αντιστροφέας πριν το φίλτρο		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
6678.9	-10894	9439.5
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-2.83E+05	2.46E+05	-2.14E+05
Φίλτρο αντιστροφέα		
Ρεύμα πυκνωτή (Α)	Τάση πυκνωτή (V)	Τάση αντίστασης (V)
-10395	-1.55E+05	-19093
Είσοδος αγωγών καλωδίων		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
2308.3	-2622.6	615.97
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
98951	-2.98E+05	2.06E+05
Τάση φ1-4 (V)	Τάση φ2-5 (V)	Τάση φ3-6 (V)
1.34E+05	-1.65E+05	46434
μανδύας 4-7 (V)	μανδύας 5-7 (V)	μανδύας 6-7 (V)
0.0005	-0.0006	0.0002
Έξοδος αγωγών καλωδίων		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)



2281.9	-2603.6	593.47
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
98935	-2.98E+05	2.06E+05
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
1.34E+05	-1.65E+05	46432
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
-0.0004	0.0005	-0.0001
<b>Έξοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
856.2	-2132	1281
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-88820	-2.92E+05	3.79E+05
<b>Ρεύμα γείωσης πλοίου (A)</b>		
-0.054		

Πίνακας 27. Μετρήσεις μέγιστων τιμών πολικών τάσεων και ρευμάτων, στη χωρίς προστασία διάταξη, πληγμένη από κεραυνό θετικό στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς, LPL-II.

<b>Θετικό Κεραυνικό πλήγμα - LPL-II</b>		
<b>Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
-82910	-30257	-30891
<b>Είσοδος ΜΣ ξηράς</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
52129	-30257	-30890
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
4.41E+07	-4.40E+07	1.71E+06
<b>Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (A)</b>		
45346		
<b>Έξοδος ΜΣ ξηράς</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
1.00E+05	-1.00E+05	9679.2
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
3.62E+05	-5.90E+05	3.60E+05

Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (A)	Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)	Ρεύμα στο + (A)
73742	5.90E+05	45913
Ρεύμα στο - (A)		
-48512		
Αντιστροφέας πριν το φίλτρο		
Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
10280	-27453	19261
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-7.38E+05	8.27E+05	-8.27E+05
Φίλτρο αντιστροφέα		
Ρεύμα πυκνωτή (A)	Τάση πυκνωτή (V)	Τάση αντίστασης (V)
-26027	-4.16E+05	-47810
Είσοδος αγωγών καλωδίων		
Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
6199.4	-6674.6	1212.4
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
2.70E+05	-7.54E+05	5.03E+05
Τάση φ1-4 (V)	Τάση φ2-5 (V)	Τάση φ3-6 (V)
3.31E+05	-4.30E+05	85711
μανδύας 4-7 (V)	μανδύας 5-7 (V)	μανδύας 6-7 (V)
0.0013	0.0014	0.0004
Έξοδος αγωγών καλωδίων		
Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
6136.2	-6657.6	1191
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
2.70E+05	-7.54E+05	5.03E+05
Τάση φ1-4 (V)	Τάση φ2-5 (V)	Τάση φ3-6 (V)
3.31E+05	-4.30E+05	85682
μανδύας 4-7 (V)	μανδύας 5-7 (V)	μανδύας 6-7 (V)
-0.0011	0.0014	0.0004
Έξοδος ΜΣ πλοίου		
Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
2453.6	-5575.9	3140.7
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)

-2.13E+05	-7.65E+05	9.36E+05
<b>Ρεύμα γείωσης πλοίου (A)</b>		
0.08		

Πίνακας 28. Μετρήσεις μέγιστων τιμών πολικών τάσεων και ρευμάτων, στη χωρίς προστασία διάταξη, πληγμένη από αρνητικό επακόλουθο κεραυνό στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς, LPL-II.

<b>Επακόλουθο Κεραυνικό πλήγμα - LPL-II</b>		
<b>Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
16957	6052.6	6530.6
<b>Είσοδος ΜΣ ξηράς</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
-33879	6052.5	6530.7
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-1.16E+07	1.16E+07	9.88E+05
<b>Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (A)</b>		
-34067		
<b>Έξοδος ΜΣ ξηράς</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
-20808	20463	7528.9
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-78681	86329	-83631
<b>Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (A)</b>	<b>Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)</b>	<b>Ρεύμα στο + (A)</b>
16731	86463	8852.1
<b>Ρεύμα στο - (A)</b>		
-7922.5		
<b>Αντιστροφείας πριν το φίλτρο</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
3393.3	-4503.8	3748.6
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-1.04E+05	1.10E+05	-1.10E+05
<b>Φίλτρο αντιστροφείας</b>		
<b>Ρεύμα πυκνωτή (A)</b>	<b>Τάση πυκνωτή (V)</b>	<b>Τάση αντίστασης (V)</b>

-4161.4	-54807	-7644.4
<b>Είσοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
798.51	-1004.1	337.16
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
31271	-1.03E+05	71569
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
49000	-57557	18762
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
0.0002	-0.0002	8.20E-05
<b>Έξοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
793.57	-996.01	319.19
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
31266	-1.03E+05	71552
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
49001	-57559	18778
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
-0.0001	0.0002	-3.57E-05
<b>Έξοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
260.11	-781.6	526.49
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-32583	-1.01E+05	1.31E+05
<b>Ρεύμα γείωσης πλοίου (Α)</b>		
-0.03		

Πίνακας 29. Μετρήσεις μέγιστων τιμών πολικών τάσεων και ρευμάτων, στη χωρίς προστασία διάταξη, πληγμένη από κεραυνό αρνητικό στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς, LPL-III.

<b>Αρνητικό Κεραυνικό πλήγμα - LPL-III</b>		
<b>Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
25895	9111.3	9583.1

Είσοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
-38490	9111.3	9583.2
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-1.57E+07	1.58E+07	-1.25E+06
Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (Α)		
-38523		
Έξοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
-31742	31872	6665.5
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-92867	1.59E+05	-1.36E+05
Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (Α)	Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)	Ρεύμα στο + (Α)
24465	1.60E+05	13692
Ρεύμα στο - (Α)		
-12321		
Αντιστροφέας πριν το φίλτρο		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
-4357.2	-7297.1	6346.5
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-1.92E+05	2.02E+05	-2.02E+05
Φίλτρο αντιστροφέα		
Ρεύμα πυκνωτή (Α)	Τάση πυκνωτή (V)	Τάση αντίστασης (V)
-6888.3	-1.04E+05	-12654
Είσοδος αγωγών καλωδίων		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
1590.5	-1833.7	470.07
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
66657	-2.01E+05	1.40E+05
Τάση φ1-4 (V)	Τάση φ2-5 (V)	Τάση φ3-6 (V)
90885	-1.11E+05	32117
μανδύας 4-7 (V)	μανδύας 5-7 (V)	μανδύας 6-7 (V)
0.0003	-0.0004	0.0001
Έξοδος αγωγών καλωδίων		

Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
1571.2	-1822.7	453.12
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
66650	-2.00E+05	1.39E+05
Τάση φ1-4 (V)	Τάση φ2-5 (V)	Τάση φ3-6 (V)
90858	-1.11E+05	32115
μανδύας 4-7 (V)	μανδύας 5-7 (V)	μανδύας 6-7 (V)
-0.0003	0.0004	-7.00E-05
<b>Έξοδος ΜΣ πλοίου</b>		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
580.3	-1480.3	908.66
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-59849	-1.97E+05	2.55E+05
<b>Ρεύμα γείωσης πλοίου (Α)</b>		
-0.04		

Πίνακας 30. Μετρήσεις μέγιστων τιμών πολικών τάσεων και ρευμάτων, στη χωρίς προστασία διάταξη, πληγμένη από κεραυνό θετικό στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς, LPL-III.

**Θετικό Κεραυνικό πλήγμα -  
LPL-III**

<b>Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή</b>		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
-55443	-20053	-20522
<b>Είσοδος ΜΣ ξηράς</b>		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
34544	-20053	-20522
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
2.96E+07	-2.95E+07	1.11E+06
<b>Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (Α)</b>		
30231		
<b>Έξοδος ΜΣ ξηράς</b>		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
67363	-67236	6274
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)

2.43E+05	-3.99E+05	2.41E+05
<b>Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (A)</b>	<b>Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)</b>	<b>Ρεύμα στο + (A)</b>
49483	3.99E+05	31081
<b>Ρεύμα στο - (A)</b>		
-32582		
<b>Αντιστροφέας πριν το φίλτρο</b>		
<b>Ρεύμα, φάση A (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση B (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
6997.2	-18439	13019
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-5.01E+05	5.60E+05	-5.60E+05
<b>Φίλτρο αντιστροφέα</b>		
<b>Ρεύμα πυκνωτή (A)</b>	<b>Τάση πυκνωτή (V)</b>	<b>Τάση αντίστασης (V)</b>
-17405	-2.80E+05	-31972
<b>Είσοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση A (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση B (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
4181	-4545.2	871.01
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
1.83E+05	-5.09E+05	3.39E+05
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
2.25E+05	-2.90E+05	58683
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
0.0009	-0.001	0.0003
<b>Έξοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση A (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση B (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
4139.2	-4530.4	856.78
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
1.82E+05	-5.09E+05	3.39E+05
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
2.25E+05	-2.90E+05	58661
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
-0.0008	0.001	-0.0002
<b>Έξοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση A (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση B (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>

1635.8	-3780.3	2154.7
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-1.44E+05	-5.17E+05	6.32E+05
<b>Ρεύμα γείωσης πλοίου (A)</b>		
0.053		

Πίνακας 31. Μετρήσεις μέγιστων τιμών πολικών τάσεων και ρευμάτων, στη χωρίς προστασία διάταξη, πληγμένη από αρνητικό επακόλουθο κεραυνό στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς, LPL-III.

<b>Επακόλουθο Κεραυνικό πλήγμα - LPL-III</b>		
<b>Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
11474	3795.1	4219.1
<b>Είσοδος ΜΣ ξηράς</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
-22531	3795.1	4219.1
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-7.70E+06	7.72E+06	9.67E+05
<b>Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (A)</b>		
-22708		
<b>Έξοδος ΜΣ ξηράς</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
-13923	13822	5693.8
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-47914	59659	-58209
<b>Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (A)</b>	<b>Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)</b>	<b>Ρεύμα στο + (A)</b>
11055	59113	6036.9
<b>Ρεύμα στο - (A)</b>		
-5165.9		
<b>Αντιστροφέας πριν το φίλτρο</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
2297.9	-3073.3	2452.3
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>



-68854	75196	-75196
<b>Φίλτρο αντιστροφέα</b>		
<b>Ρεύμα πυκνωτή (A)</b>	<b>Τάση πυκνωτή (V)</b>	<b>Τάση αντίστασης (V)</b>
-2770.3	-37279	-5089.1
<b>Είσοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
572.26	-745.05	281.86
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
21082	-69213	48133
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
32561	-39293	12518
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
0.0001	-0.0001	5.40E-05
<b>Έξοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
565.68	-739.33	270.34
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
21079	-69197	48122
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
32560	-39296	12530
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
-9.75E-05	-0.00014	-2.21E-05
<b>Έξοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
237.73	-569.73	403.45
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-22123	-68156	88161
<b>Ρεύμα γείωσης πλοίου (A)</b>		
-0.02		

Πίνακας 32. Μετρήσεις μέγιστων τιμών πολικών τάσεων και ρευμάτων, στη χωρίς προστασία διάταξη, πληγμένη από κεραυνό αρνητικό στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς, LPL-I.

Αρνητικό Κεραυνικό πλήγμα στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς - LPL-I		
Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
339.69	214.3	953.51
Είσοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
339.57	212.95	954
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
48837	-57285	47292
Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (Α)		
-9.92E+04		
Έξοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
683.69	624.11	3605.6
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-31044	-23417	34394
Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (Α)	Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)	Ρεύμα στο + (Α)
-1863.9	34378	2575.7
Ρεύμα στο - (Α)		
-2601.8		
Αντιστροφείας πριν το φίλτρο		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
1396.2	-745.04	568.61
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
52569	52569	-44062
Φίλτρο αντιστροφείας		
Ρεύμα πυκνωτή (Α)	Τάση πυκνωτή (V)	Τάση αντίστασης (V)
1340.3	25437	24624
Είσοδος αγωγών καλωδίων		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
253.14	-357.95	474.4

<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-30457	7706.8	34845
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
5822.2	-13221	26508
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
0.007	0.007	0.007
<b>Έξοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
-259.49	-356.16	468.29
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-30464	-9457.8	34806
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
5752.2	-13229	26499
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
-0.007	-0.007	-0.007
<b>Έξοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
-254.17	-221.15	358.01
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-49331	20006	30386
<b>Ρεύμα γείωσης πλοίου (A)</b>		
0.019		

Σύμφωνα με τους παραπάνω πίνακες (Πίνακας 23 – 32) κεραυνικών χτυπημάτων, παρατηρούνται τα εξής:

- Το χειρότερο σενάριο κεραυνικού χτυπήματος είναι αυτό του θετικού κεραυνού, καθώς, όταν η διάταξη έχει χτυπηθεί από αυτό, παρουσιάζει στην συντριπτική πλειοψηφία όλων των μεγεθών των μετρούμενων τάσεων και ρευμάτων, τις μεγαλύτερες τιμές. Μάλιστα, στην περίπτωση θετικού κεραυνού LPL-I, σημειώνονται και οι μέγιστες τιμές στα ρεύματα και τις τάσεις της διάταξης. Μερικές εξαιρέσεις σε αυτή την παρατήρηση, αποτελούν αυτές των ρευμάτων γείωσης και εισόδου του Μ/Σ ξηράς στη φάση Α, όπου το αρνητικό κεραυνικό πλήγμα LPL-I παρουσιάζει τις μεγαλύτερες τιμές, όπως επίσης και η

τάση της αντίστασης του φίλτρου του αντιστροφέα, όπου μεγαλύτερη τιμή έχει στην περίπτωση αρνητικού επακόλουθου κεραυνού.

- Στην είσοδο του Μ/Σ ξηράς το ρεύμα σε όλες τις φάσεις είναι της τάξης των kA, ενώ οι μετρούμενες πολικές τάσεις στο σημείο αυτό είναι της τάξης των MV.
- Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στην έξοδο του Μ/Σ ξηράς, όπου επίσης το ρεύμα σε όλες τις φάσεις είναι της τάξης των kA ή και μεγαλύτερο, ενώ οι πολικές τάσεις εξόδου είναι μόλις μία τάξη μεγέθους μικρότερες ( $10^5$ ) από εκείνες της εισόδου του Μ/Σ ξηράς.
- Τα υπερρεύματα και οι υπερτάσεις εντοπίζονται τόσο στον ανορθωτή όσο και στον αντιστροφέα του μετατροπέα συχνότητας. Τα ηλεκτρονικά ισχύος, τα οποία εμπεριέχονται στα κυκλώματα αυτά, όντας ευαίσθητα σε τέτοια υψηλά μεγέθη τάσης και ρεύματος, θα αντιμετώπιζαν σίγουρη μη αναστρέψιμη φθορά.
- Παρόλο που τα ρεύματα εισόδου και εξόδου των αγωγών του καλωδίου, έχουν ως τάξη μεγέθους τα kA, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μετρούμενες τάσεις στα σημεία αυτά, αλλά και οι τάσεις μεταξύ των φάσεων των αγωγών του καλωδίου και του μανδύα του. Οι τιμές αυτές κυμαίνονται από την τάξη μεγέθους των  $10^5 V$  και φτάνουν έως τα  $10^8 V$ . Συνεπώς, η μόνωση των καλωδίων θα αστοχήσει.
- Οι τάσεις μεταξύ των μανδύων του καλωδίου σύνδεσης, μπορούν να φτάσουν στη χειρότερη περίπτωση τα 7 mV, οπότε το σημείο αυτό δεν κινδυνεύει από αστοχία μόνωσης.
- Τέλος, τα ρεύματα εισόδου και εξόδου του Μ/Σ που βρίσκεται εντός του πλοίου, είναι της τάξης των kA για τις περιπτώσεις αρνητικού και θετικού κεραυνού LPL-I, θετικού κεραυνού LPL-II και LPL-III, ενώ στις υπόλοιπες περιπτώσεις οι τιμές αυτές είναι μικρότερες του 1kA. Από την άλλη πλευρά, οι τάσεις είναι της τάξεως των μερικών εκατοντάδων kV. Από το συλλογισμό ότι το φορτίο του πλοίου χρειάζεται μόλις 6.6kV ονομαστικής τάσης για να ικανοποιήσει τις ενεργειακές του ανάγκες του, κρίνεται αναγκαία η χρήση κατάλληλης διάταξης προστασίας στην παρούσα τοπολογία cold-ironing.

Στην περίπτωση όπου έχουμε κεραυνικό πλήγμα στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς, γίνεται αντιληπτό ότι δε δημιουργούνται τόσο μεγάλες υπερτάσεις και υπερρεύματα, μόνο στην είσοδο και έξοδο του μετασχηματιστή ξηράς μπορούν να παρατηρηθούν υψηλότερες τιμές τάσεις σε σχέση με τη μόνιμη κατάσταση. Παρόλα αυτά, όταν τοποθετείται στοιχείο προστασίας, αλλάζει η τοπολογία της διάταξης, οπότε και στο πλήγμα που συμβαίνει στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς, πρέπει να ελεγχθεί η συμπεριφορά του κυκλώματος, ώστε να διαπιστωθεί ότι η προστασία έναντι των υπερτάσεων είναι επιτυχής, καλύπτοντας με αυτό τον τρόπο και τις δύο περιπτώσεις σφάλματος.

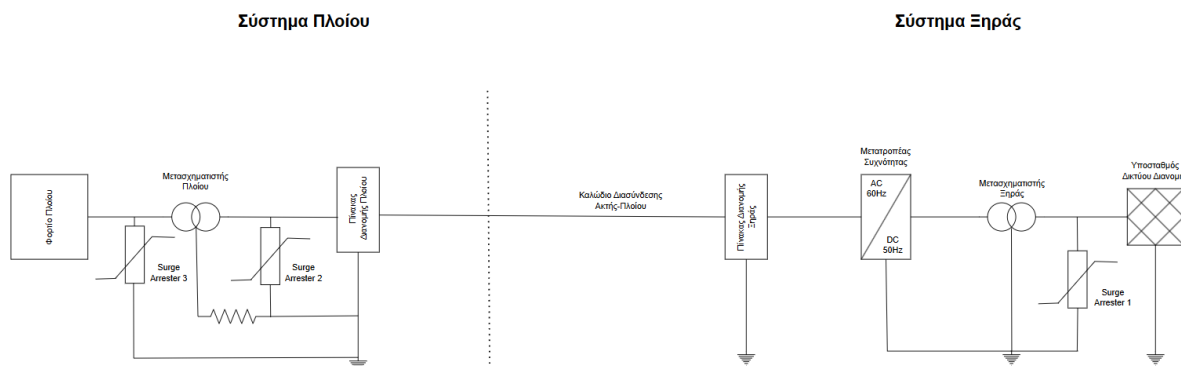
Εν κατακλείδι, λόγω των παρατηρούμενων υπερρευμάτων και υπερτάσεων κατά μήκος της ως προς μελέτη τοπολογίας, κρίνεται απαραίτητη η προστασία έναντι κεραυνικών πληγμάτων και υπερτάσεων. Συγκεκριμένα, θα εξεταστούν στην υποενότητα 6.5 τα σενάρια τοποθέτησης διάταξης προστασίας στην είσοδο και στην έξοδο του μετασχηματιστή ξηράς, αλλά και στην έξοδο του μετασχηματιστή που βρίσκεται εντός του πλοίου.

## 6.5 Προστασία έναντι των υπερτάσεων – σύγκριση διατάξεων προστασίας

Για την προστασία του συστήματος cold-ironing που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία, έγινε η χρήση και τοποθέτηση διατάξεων προστασίας έναντι των υπερτάσεων (surge arresters), βάσει του μοντέλου των επιστημόνων Pinceti-Giannettoni [67], όπως αναλύθηκε εκτενώς και στο Κεφάλαιο 5.

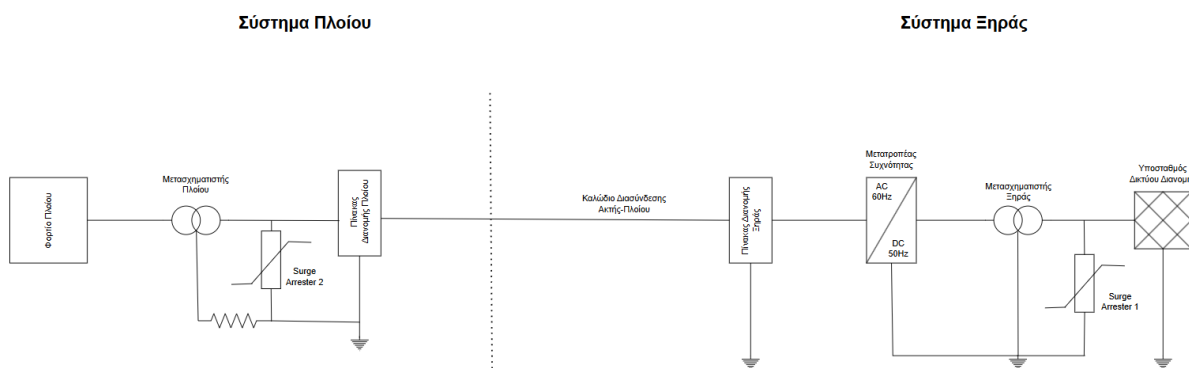
Συγκεκριμένα, λήφθηκαν υπόψιν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις τοποθέτησης των διατάξεων προστασίας, οι οποίες συγκρίνονται μεταξύ τους, αλλά και με το κεραυνικό πλήγμα στη χωρίς προστασία διάταξη, ώστε να αποφανθεί η καταλληλότερη για τον σκοπό της προστασίας της.

Κατά την πρώτη περίπτωση τοποθέτησης στοιχείων προστασίας, επιλέχθηκαν τρεις surge arresters, ο καθένας από τους οποίους φαίνονται στην Εικόνα 90. Οι arresters, τοποθετούνται στην είσοδο του μετασχηματιστή ξηράς, με ονομαστική φασική τάση arrester τα 12.5kV, όπως επίσης και στην είσοδο και την έξοδο του μετασχηματιστή του πλοίου, με ίδια ονομαστική φασική τάση τα 5kV.



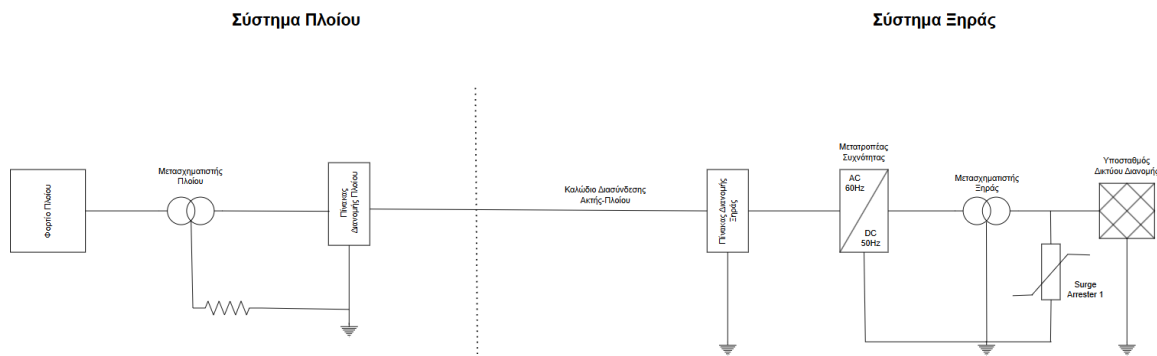
Εικόνα 90. Πρώτη περίπτωση τρόπου τοποθέτησης στοιχείων προστασίας στη διάταξη.

Κατά τη δεύτερη περίπτωση, τα στοιχεία προστασίας τοποθετούνται σε δύο σημεία εντός της τοπολογίας (Εικόνα 91), τα οποία είναι στην είσοδο του μετασχηματιστή ξηράς και την είσοδο του μετασχηματιστή του πλοίου, φέροντας ως ονομαστική φασική τάση τα 12.5kV και τα 5kV αντίστοιχα.



Εικόνα 91. Δεύτερη περίπτωση τρόπου τοποθέτησης στοιχείων προστασίας στη διάταξη.

Η τρίτη και τελευταία περίπτωση που εξετάζεται, αφορά την τοποθέτηση surge arrester στην είσοδο του μετασχηματιστή ξηράς (Εικόνα 92), με ονομαστική φασική τάση τα 12.5kV.

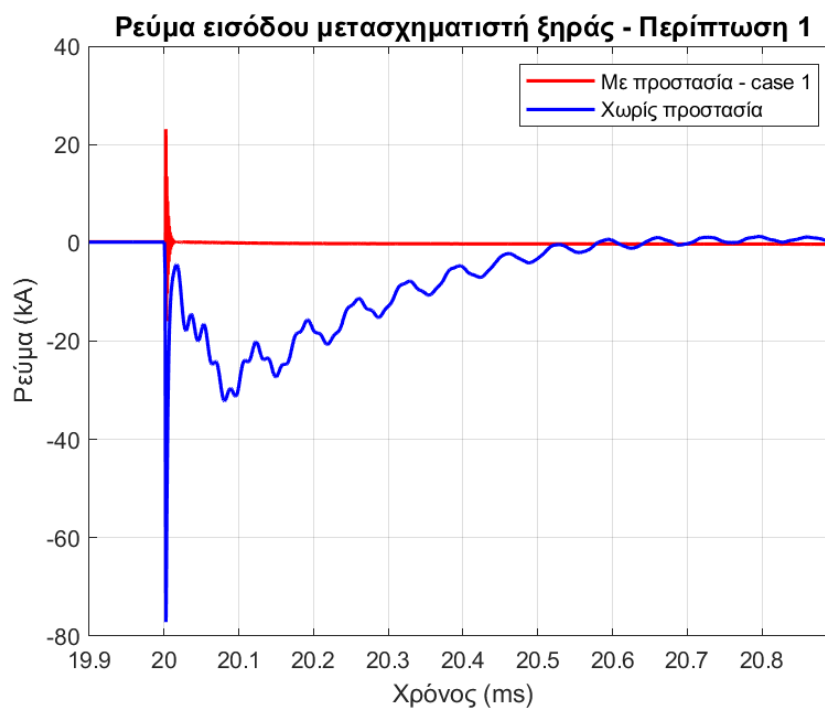


Εικόνα 92. Τρίτη περίπτωση τρόπου τοποθέτησης στοιχείου προστασίας στη διάταξη.

Η αρχική σύγκριση των τριών περιπτώσεων, γίνεται με την αποτύπωση σε κοινούς άξονες της εκάστοτε περίπτωσης προστασίας με την περίπτωση κεραυνικού πλήγματος χωρίς προστασία, όταν ο κεραυνός χτυπάει την είσοδο του μετασχηματιστή ξηράς, στη φάση Α, με αρνητικό κεραυνό LPL-I, στις  $90^\circ$ . Οι μετρήσεις των μεγεθών, γίνονται σύμφωνα με την Εικόνα 51 και τον Πίνακα 20.

Ακολουθούν τα συγκριτικά διαγράμματα:

- Διαγράμματα σε κοινούς άξονες (Εικόνα 93 – 103), κεραυνικού πλήγματος αρνητικού κεραυνού LPL-I, για την πρώτη περίπτωση προστασίας έναντι των υπερτάσεων και την περίπτωση χωρίς προστασία:

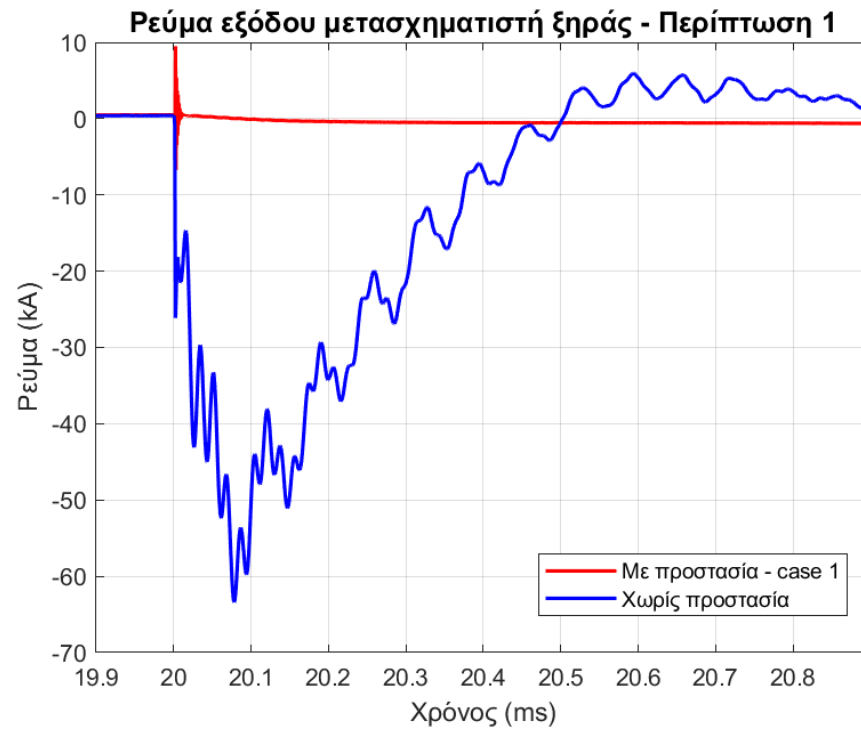


Εικόνα 93. Ρεύμα εισόδου μετασχηματιστή ξηράς, για την πρώτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.

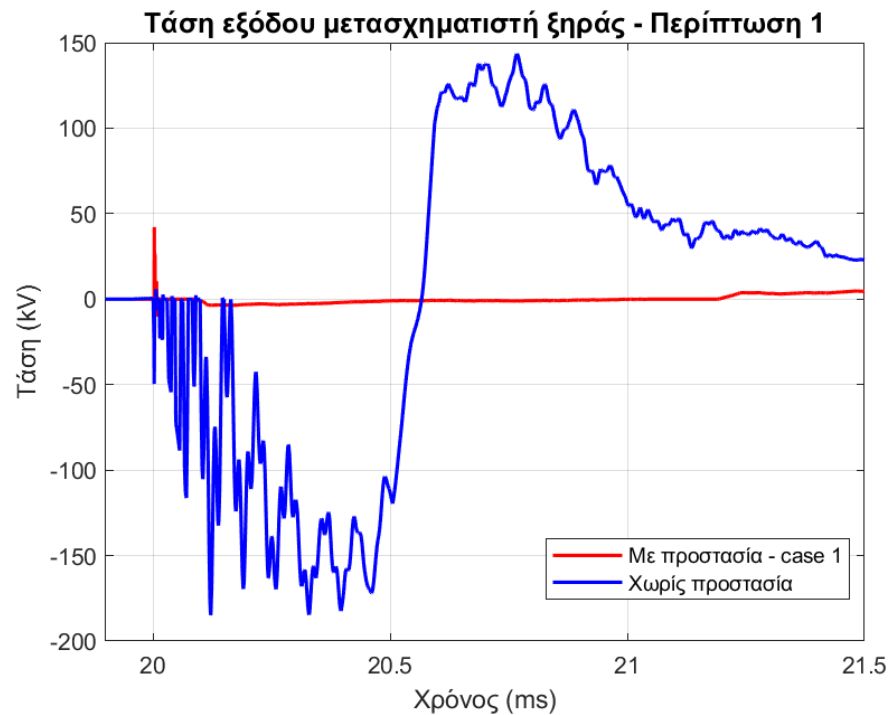


Εικόνα 94. Τάση εισόδου μετασχηματιστή ξηράς, για την πρώτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.

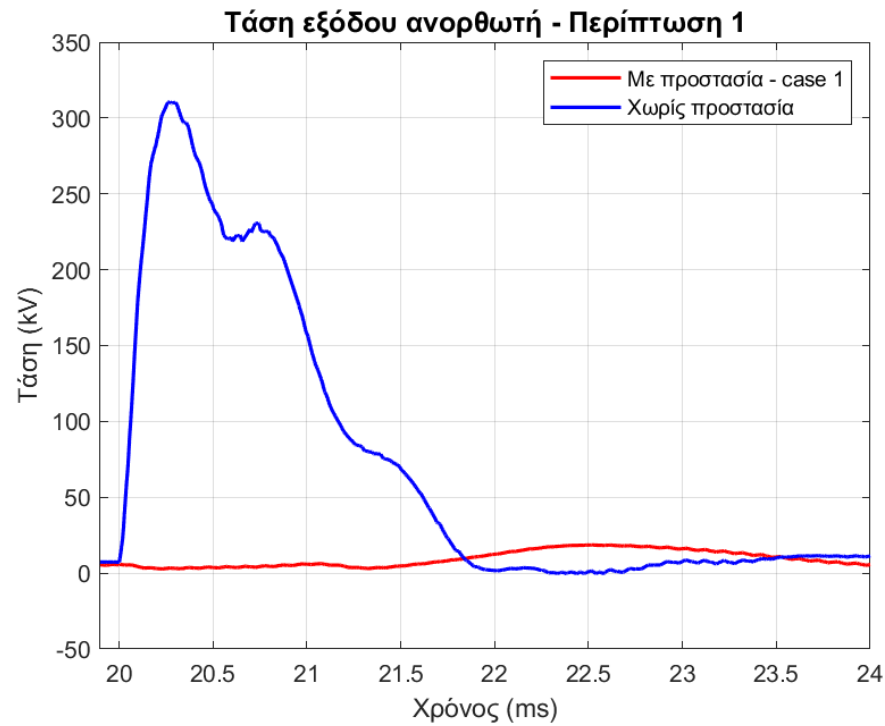




Εικόνα 95. Ρεύμα εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, για την πρώτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.



Εικόνα 96. Τάση εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, για την πρώτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.

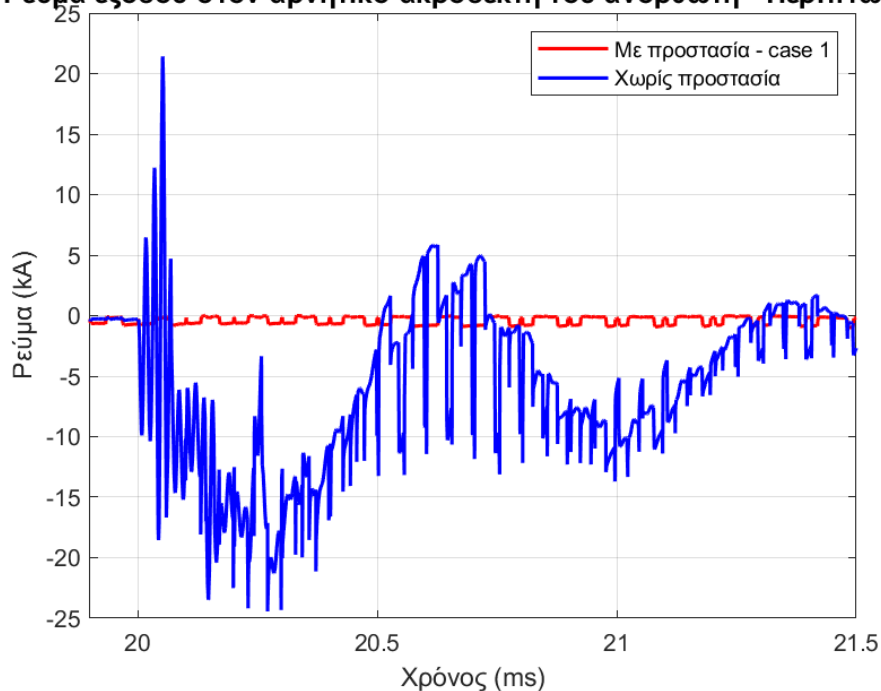


Εικόνα 97. Τάση εξόδου ανορθωτή, για την πρώτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.



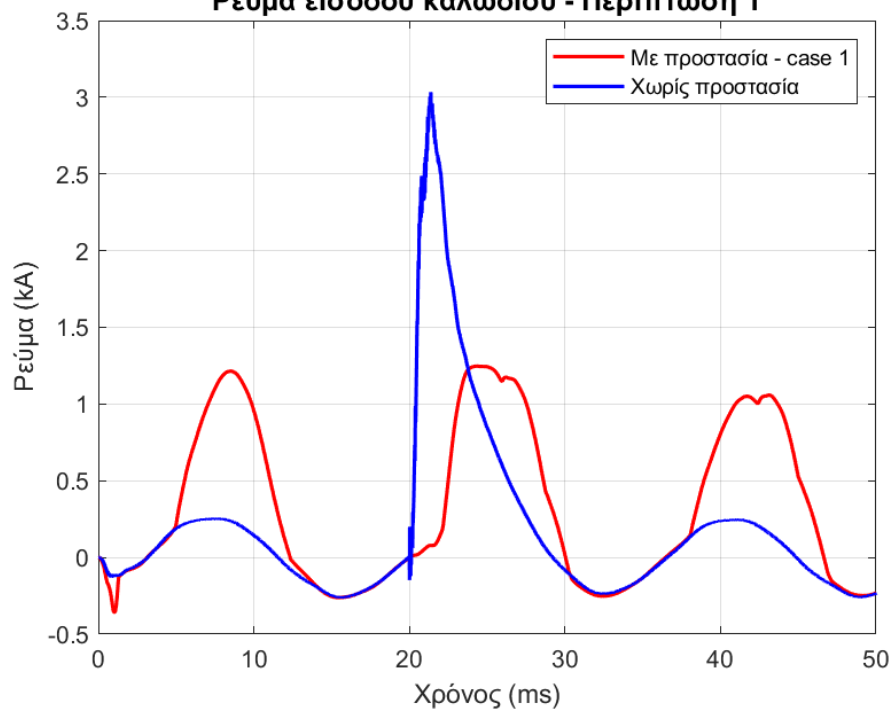
Εικόνα 98. Ρεύμα εξόδου ανορθωτή στον θετικό ακροδέκτη, για την πρώτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.

### Ρεύμα εξόδου στον αρνητικό ακροδέκτη του ανορθωτή - Περίπτωση 1

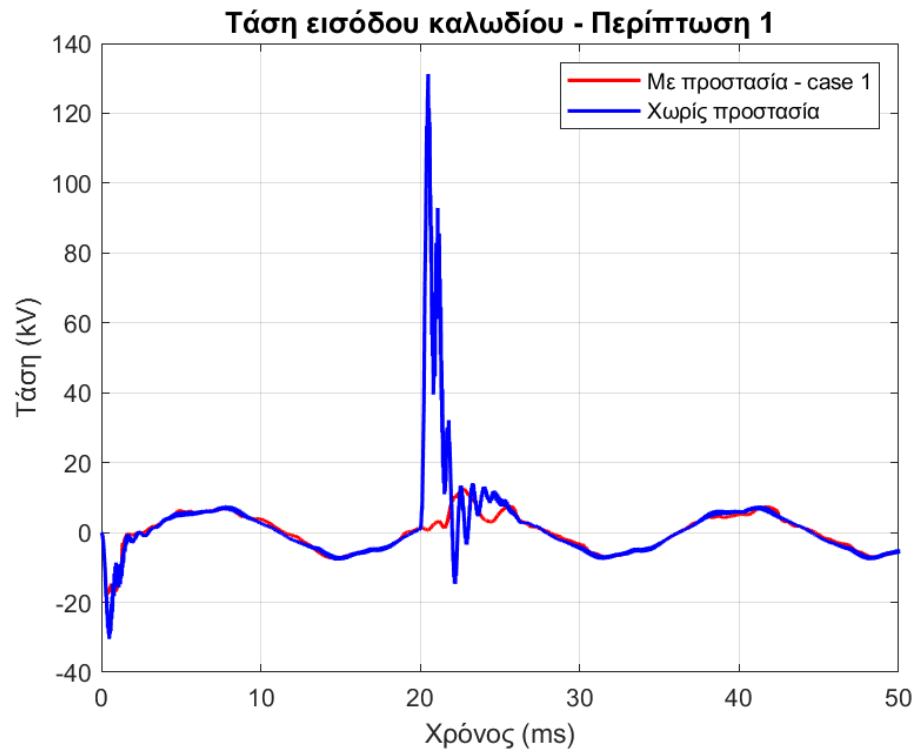


Εικόνα 99. Ρεύμα εξόδου ανορθωτή στον αρνητικό ακροδέκτη, για την πρώτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.

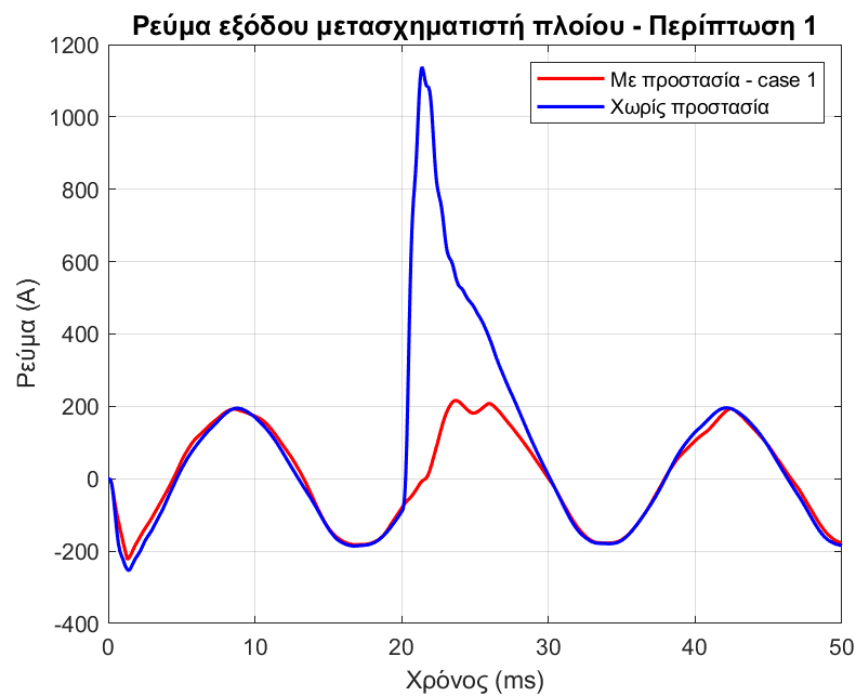
### Ρεύμα εισόδου καλωδίου - Περίπτωση 1



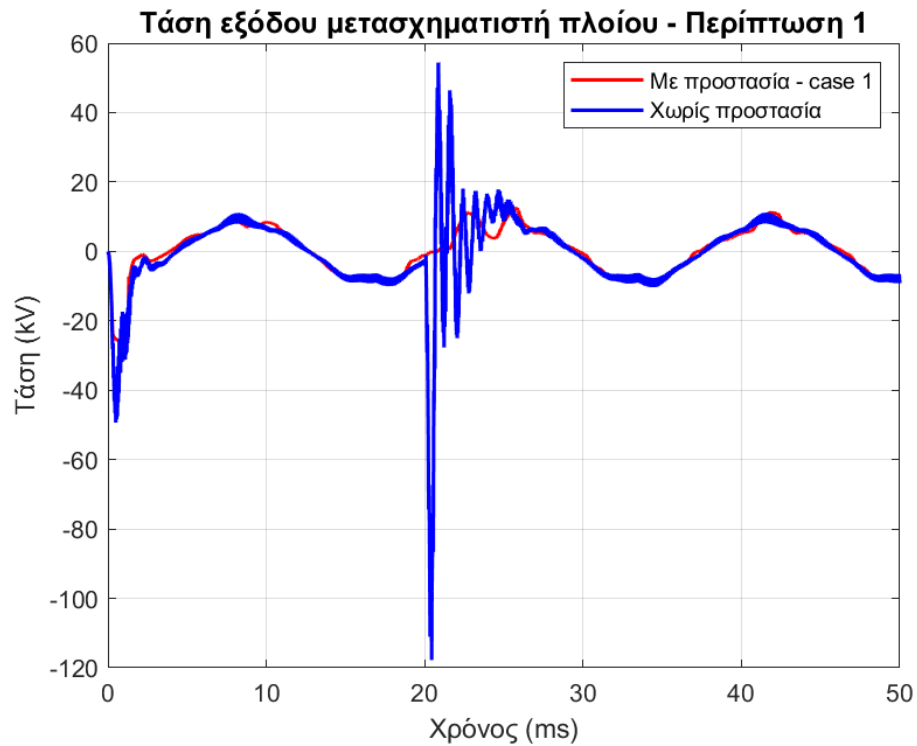
Εικόνα 100. Ρεύμα εισόδου καλωδίου, για την πρώτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.



Εικόνα 101. Τάση εισόδου καλωδίου, για την πρώτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.

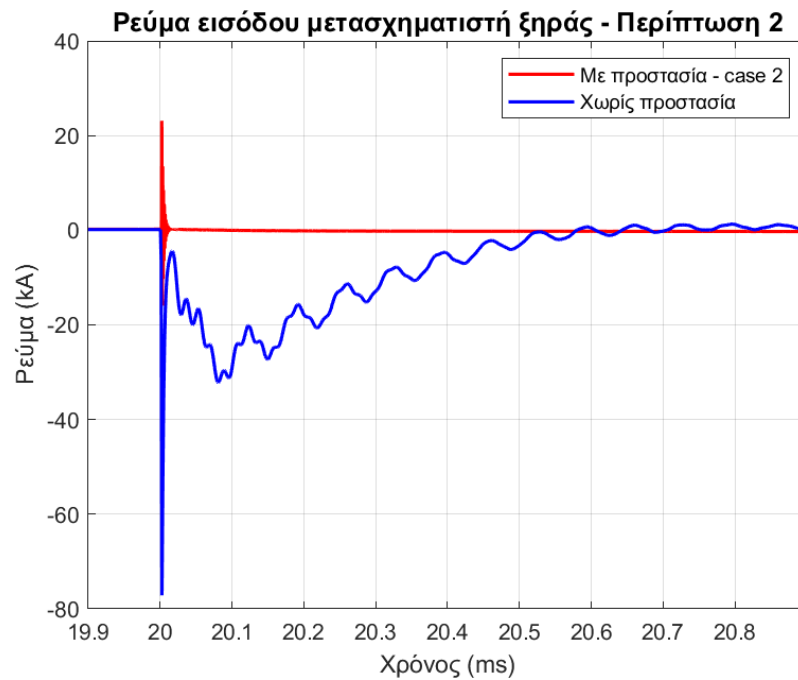


Εικόνα 102. Ρεύμα εξόδου μετασχηματιστή πλοίου, για την πρώτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.



Εικόνα 103. Τάση εξόδου μετασχηματιστή πλοίου, για την πρώτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.

- Διαγράμματα σε κοινούς άξονες (Εικόνα 104 – 114), κεραυνικού πλήγματος αρνητικού κεραυνού LPL-I, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας έναντι των υπερτάσεων και την περίπτωση χωρίς προστασία:



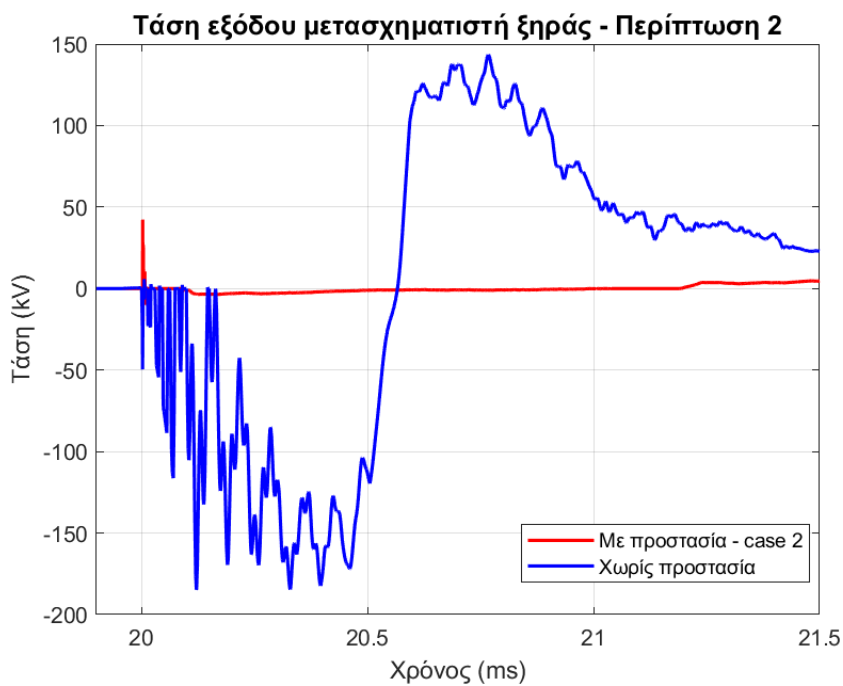
Εικόνα 104. Ρεύμα εισόδου μετασχηματιστή ξηράς, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.



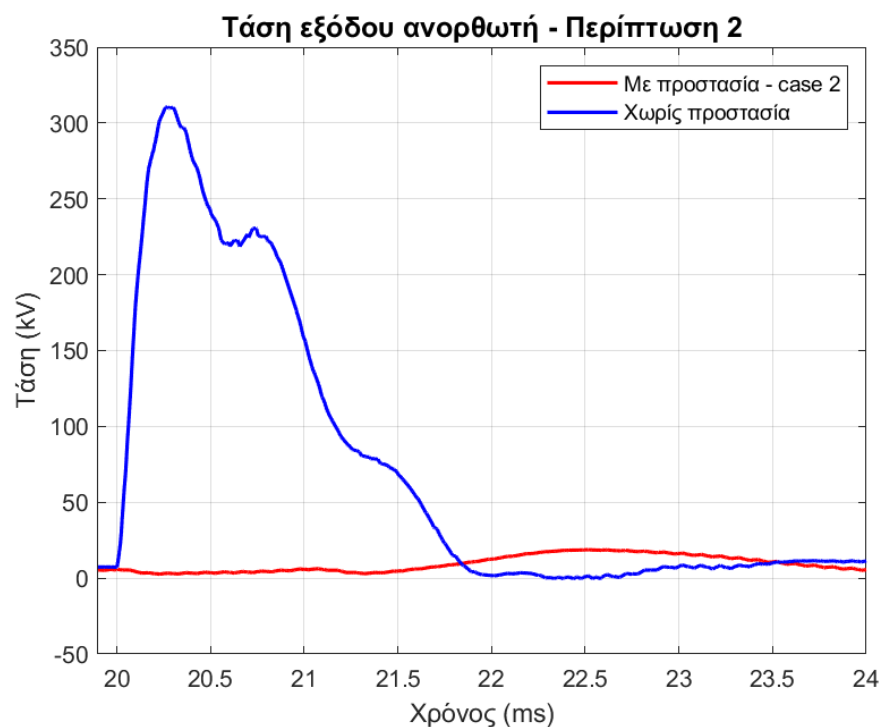
Εικόνα 105. Τάση εισόδου μετασχηματιστή ξηράς, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.



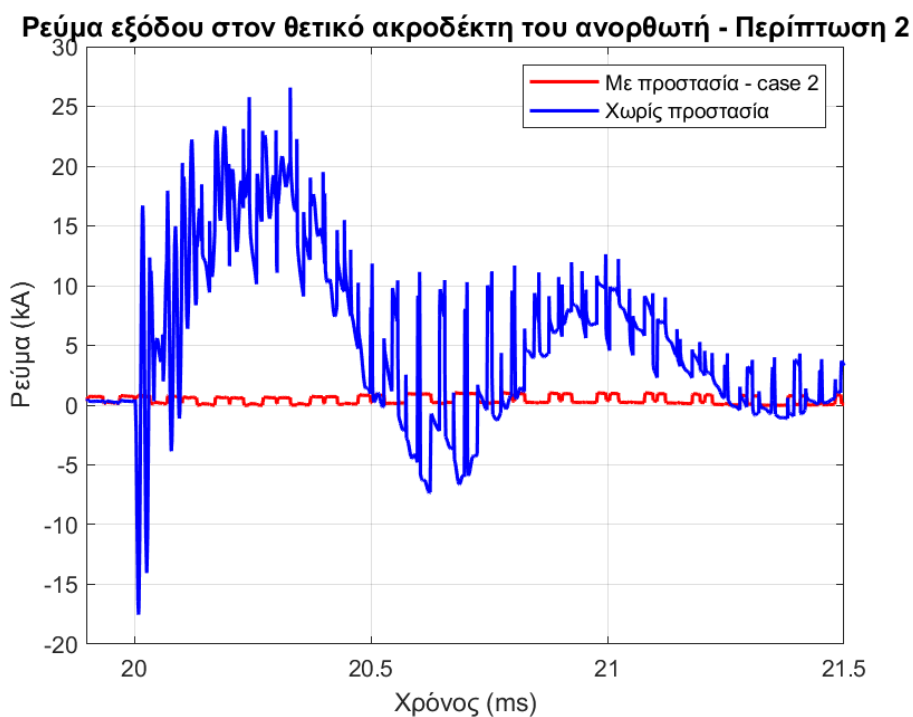
Εικόνα 106. Ρεύμα εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.



Εικόνα 107. Τάση εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.

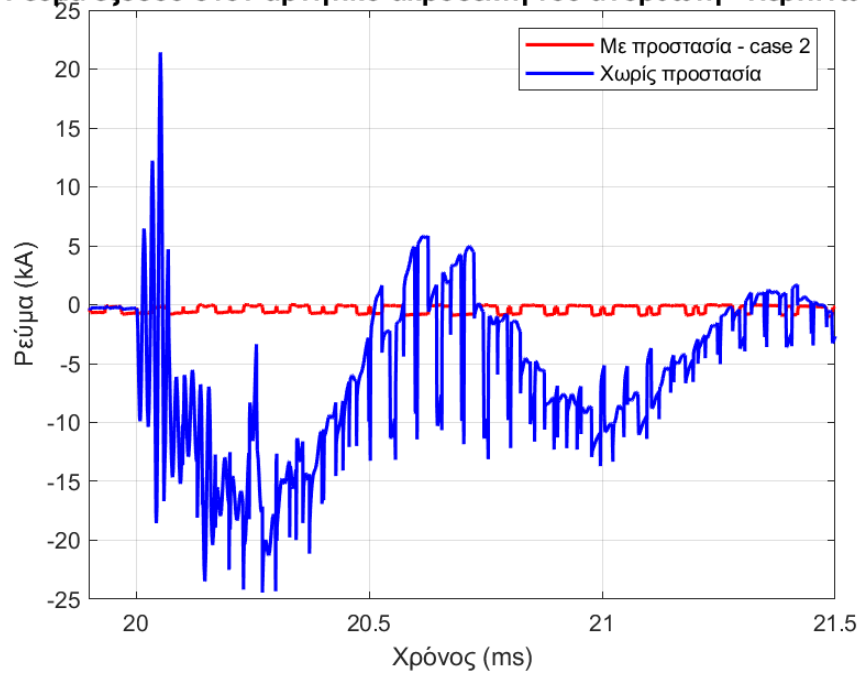


Εικόνα 108. Τάση εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.

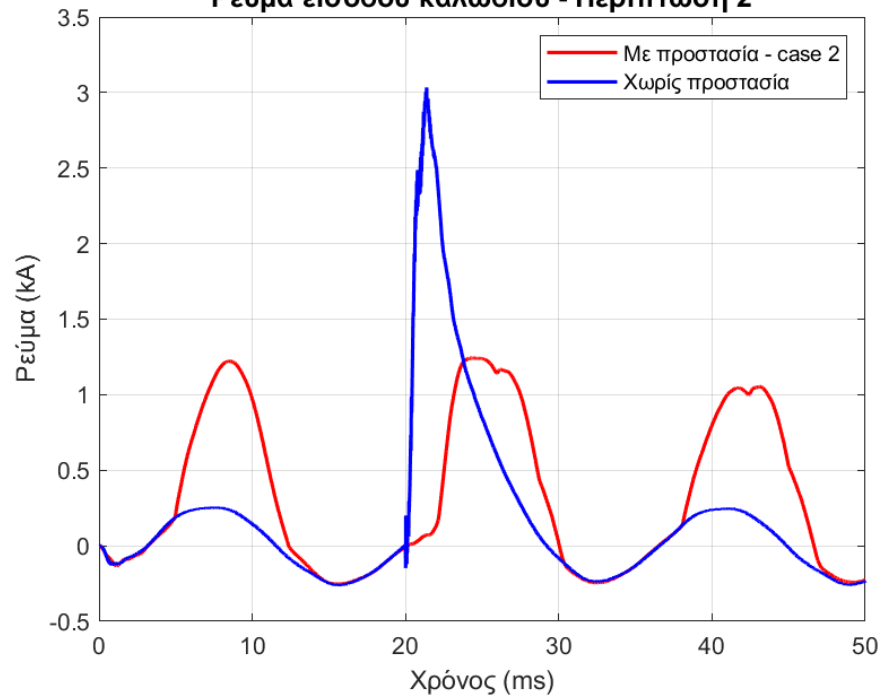


Εικόνα 109. Ρεύμα εξόδου ανορθωτή στον θετικό ακροδέκτη, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.

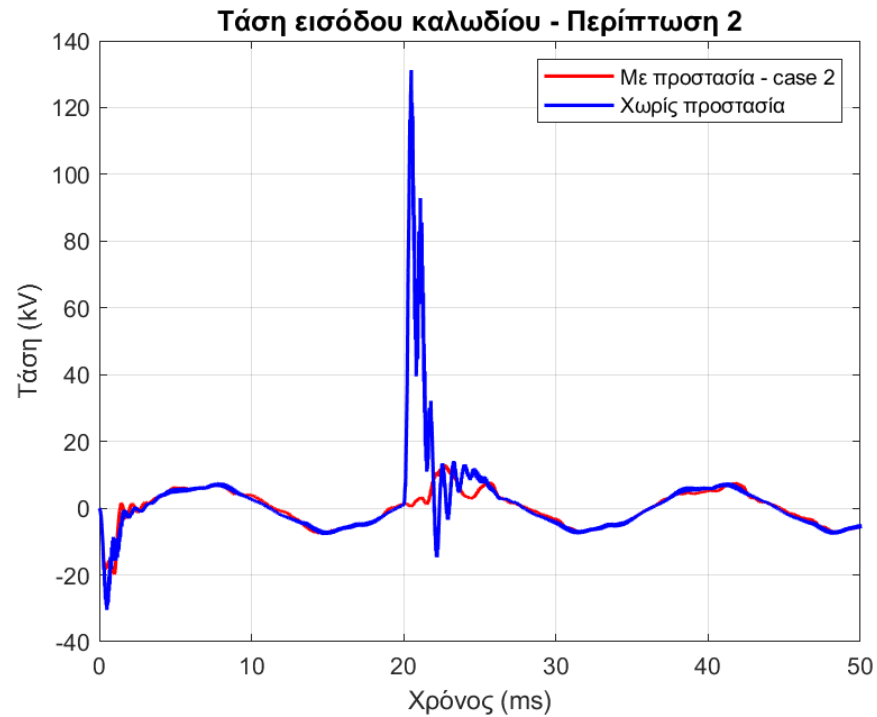


**Ρεύμα εξόδου στον αρνητικό ακροδέκτη του ανορθωτή - Περίπτωση 2**

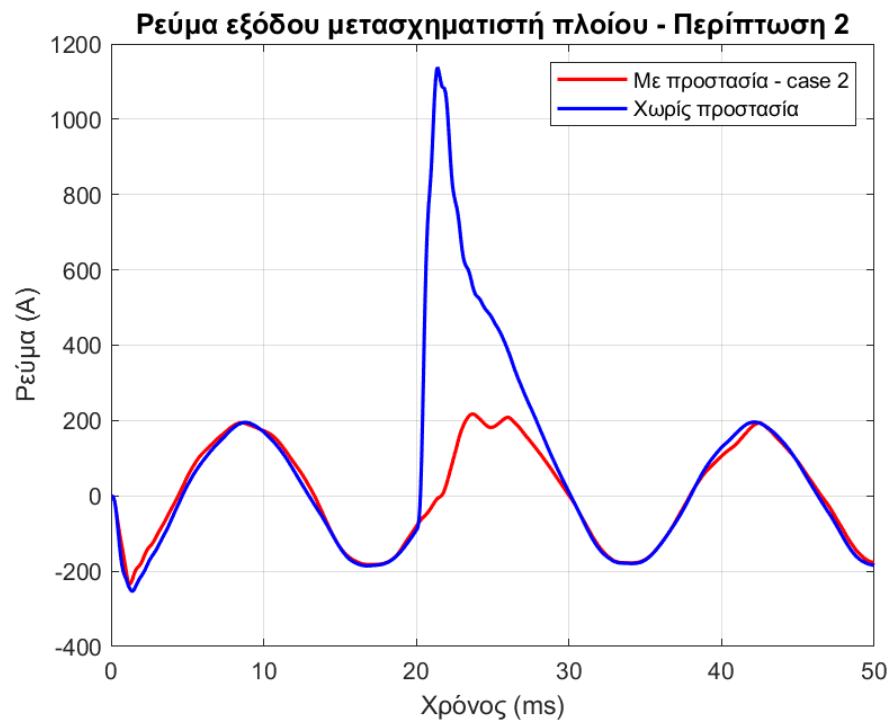
Εικόνα 110. Ρεύμα εξόδου ανορθωτή στον αρνητικό ακροδέκτη, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.

**Ρεύμα εισόδου καλωδίου - Περίπτωση 2**

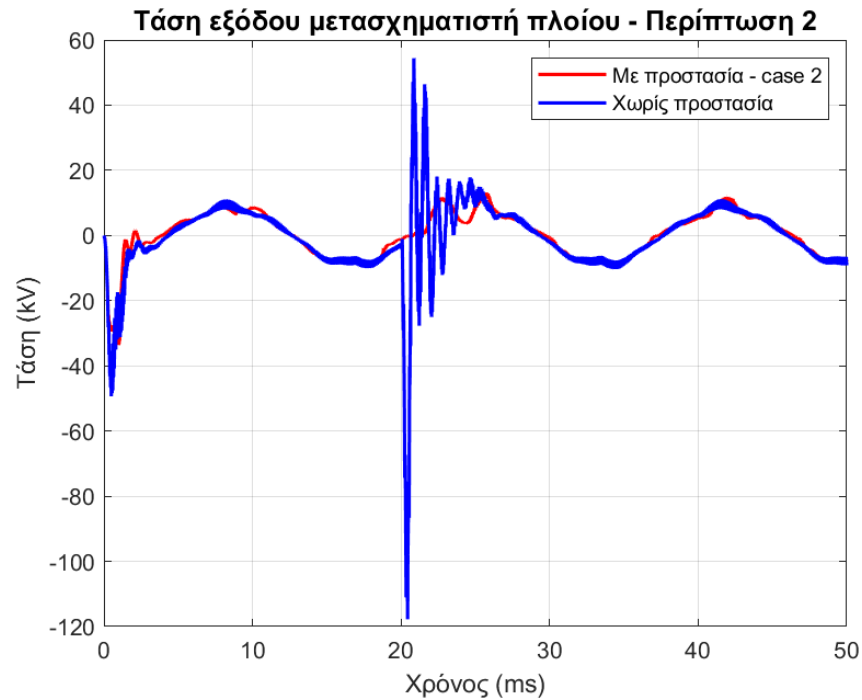
Εικόνα 111. Ρεύμα εισόδου καλωδίου, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.



Εικόνα 112. Τάση εισόδου καλωδίου, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.

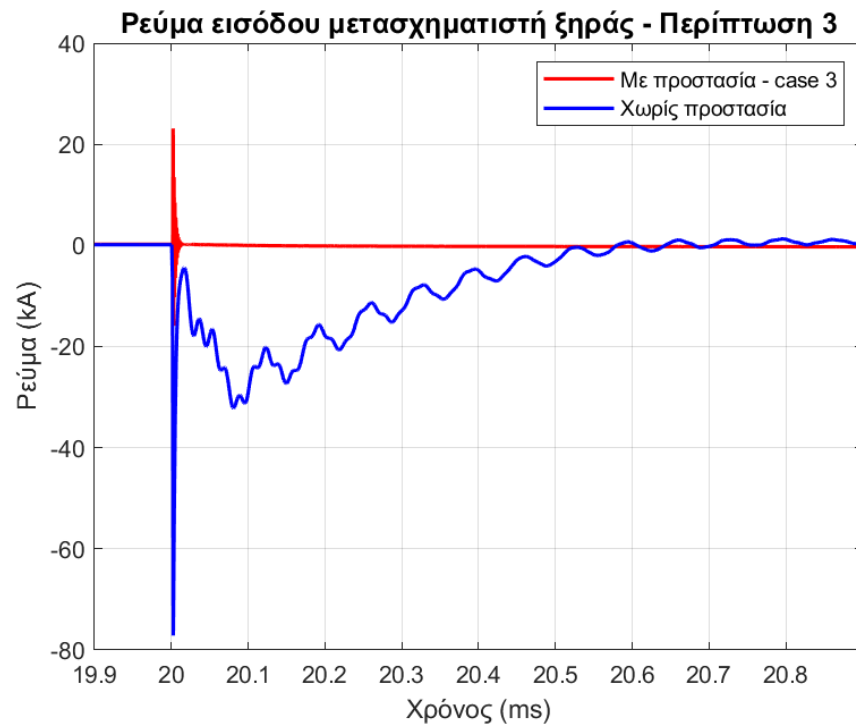


Εικόνα 113. Ρεύμα εξόδου μετασχηματιστή πλοίου, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.



*Εικόνα 114. Τάση εξόδου μετασχηματιστή πλοίου, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.*

- Διαγράμματα σε κοινούς άξονες (Εικόνα 115 – 125), κεραυνικού πλήγματος αρνητικού κεραυνού LPL-I, για την τρίτη περίπτωση προστασίας έναντι των υπερτάσεων και την περίπτωση χωρίς προστασία:



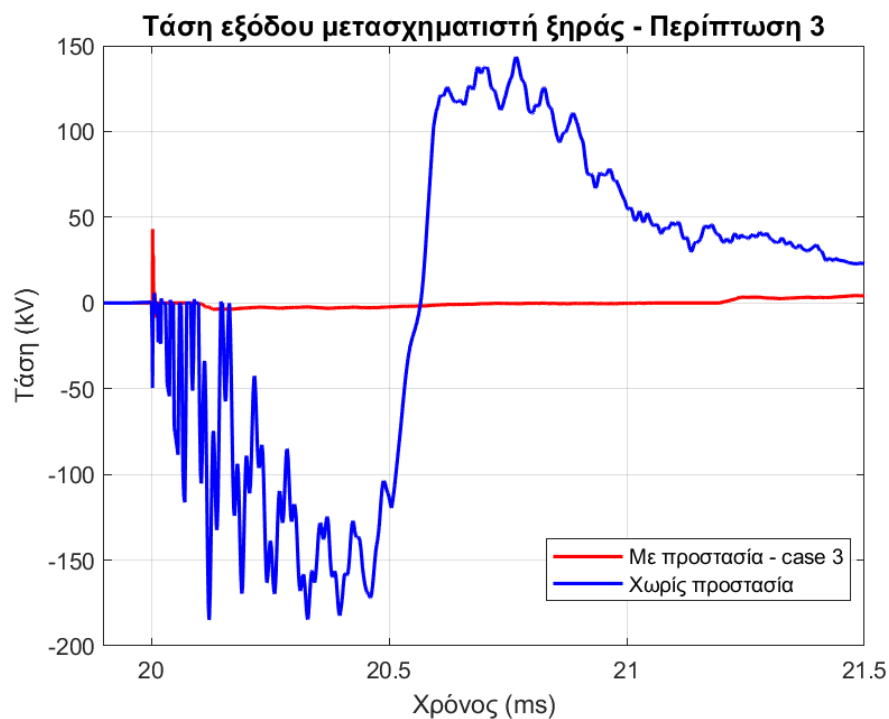
Εικόνα 115. Ρεύμα εισόδου μετασχηματιστή ξηράς, για την τρίτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.



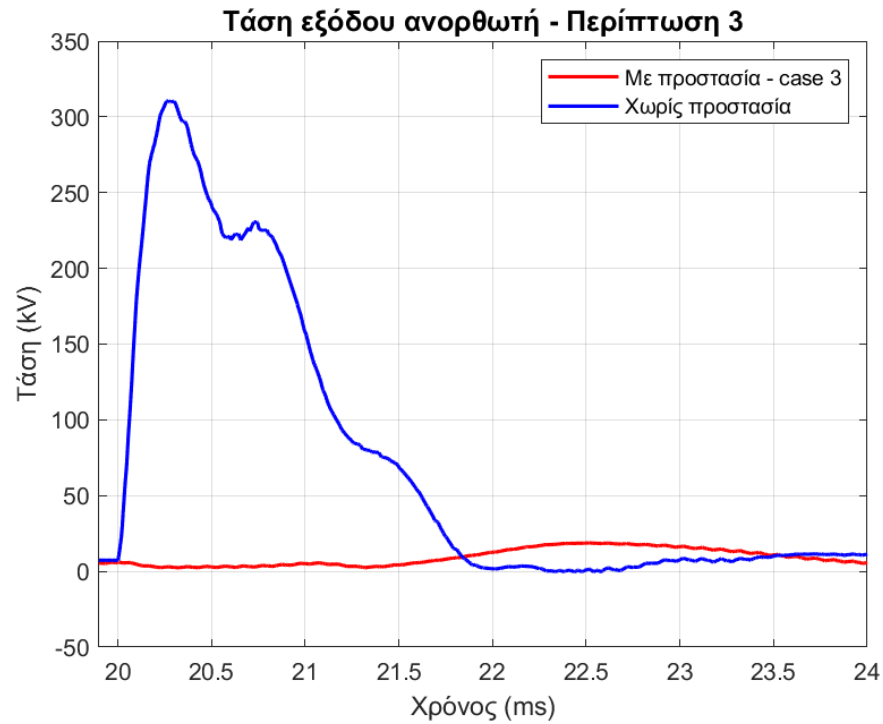
Εικόνα 116. Τάση εισόδου μετασχηματιστή ξηράς, για την τρίτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.



Εικόνα 117. Ρεύμα εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, για την τρίτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.



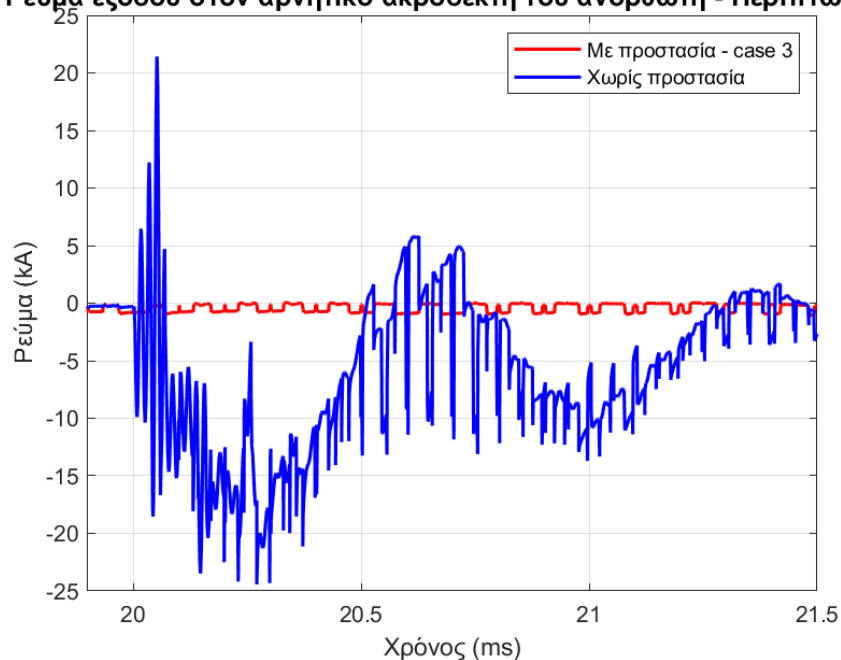
Εικόνα 118. Τάση εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, για την τρίτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.



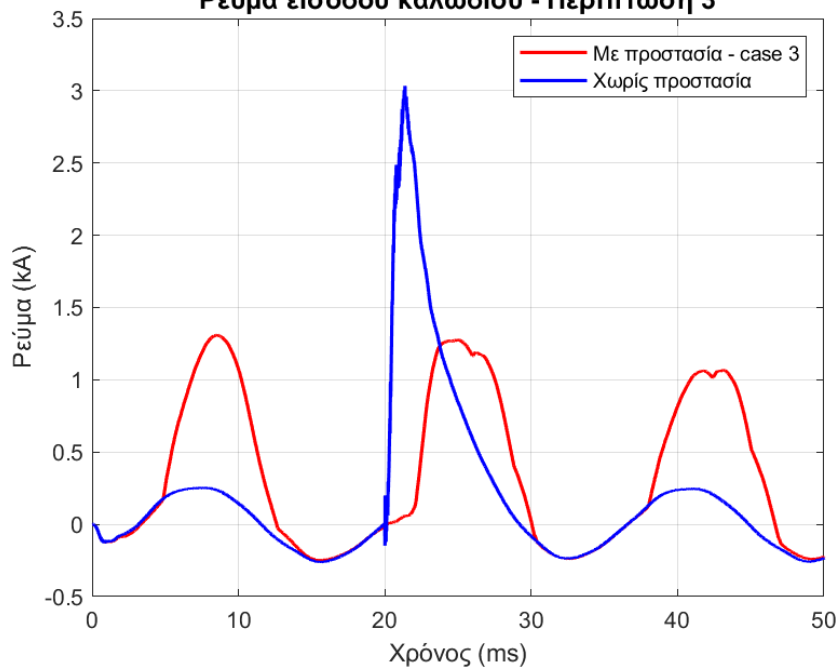
Εικόνα 119. Τάση εξόδου ανορθωτή, για την τρίτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.



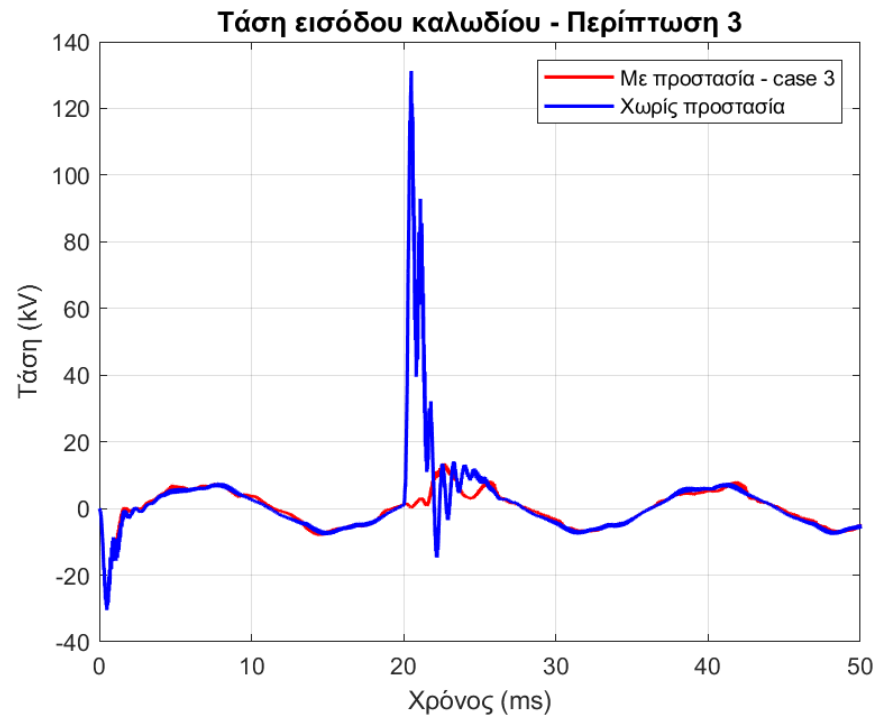
Εικόνα 120. Ρεύμα εξόδου ανορθωτή στον θετικό ακροδέκτη, για την τρίτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.

**Ρεύμα εξόδου στον αρνητικό ακροδέκτη του ανορθωτή - Περίπτωση 3**

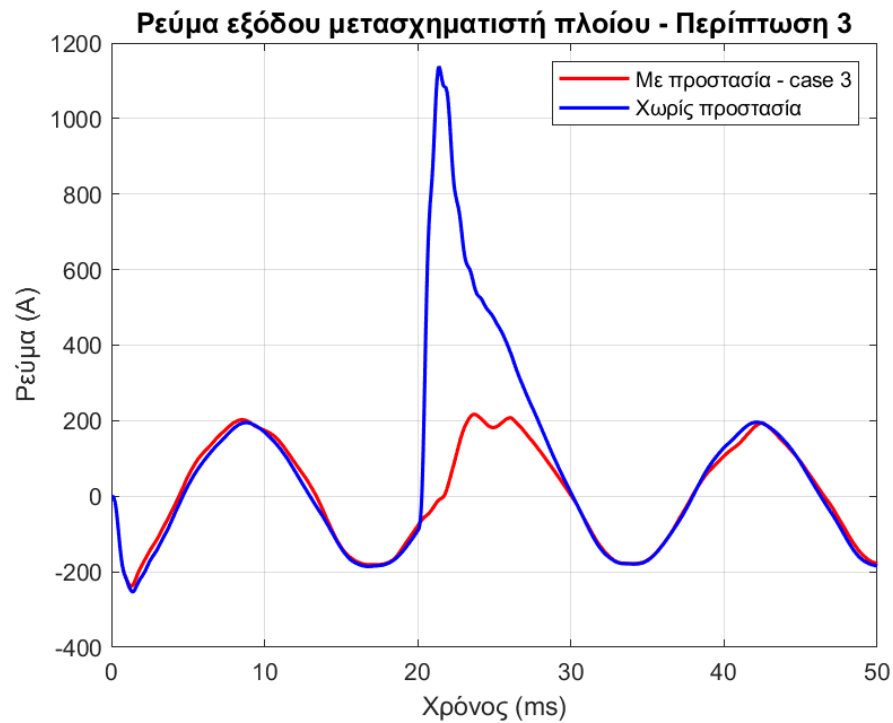
Εικόνα 121. Ρεύμα εξόδου ανορθωτή στον αρνητικό ακροδέκτη, για την τρίτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.

**Ρεύμα εισόδου καλωδίου - Περίπτωση 3**

Εικόνα 122. Ρεύμα εισόδου καλωδίου, για την τρίτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.

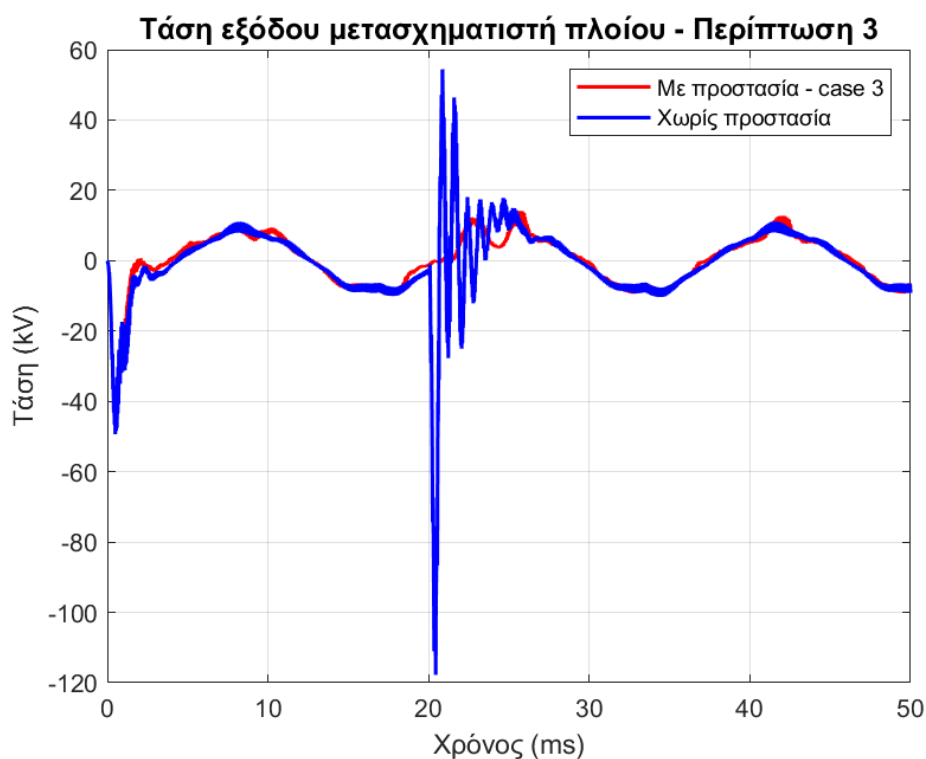


Εικόνα 123. Τάση εισόδου καλωδίου, για την τρίτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.



Εικόνα 124. Ρεύμα εξόδου μετασχηματιστή πλοίου, για την τρίτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.





Εικόνα 125. Τάση εξόδου μετασχηματιστή πλοίου, για την τρίτη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό κεραυνό LPL-I.

Από τα παραπάνω διαγράμματα, γίνεται αντιληπτό ότι οι διατάξεις προστασίας μειώνουν δραματικά τα υπερρεύματα και τις υπερτάσεις που δημιουργούνται εξαιτίας του κεραυνικού πλήγματος στη φάση Α του μετασχηματιστή ξηράς. Για να εκτιμηθεί καλύτερα ποια διάταξη προστασίας είναι η καταλληλότερη για το σύστημα cold-ironing, ακολουθούν πίνακες οι οποίοι περιέχουν τις μέγιστες τιμές ρευμάτων κι τάσεων, ανάλογα με την κάθε περίπτωση προστασίας και την περίπτωση κεραυνικού πλήγματος, είτε όταν αυτό εφαρμόζεται στην είσοδο του μετασχηματιστή ξηράς, είτε όταν εφαρμόζεται στη γείωση του μετασχηματιστή, χρησιμοποιώντας αρνητικό κεραυνικό πλήγμα LPL-I.

Ακολουθεί ο Πίνακας 33 για την περίπτωση κεραυνικού πλήγματος στην είσοδο του μετασχηματιστή ξηράς.

Πίνακας 33. Μέγιστες τιμές ρευμάτων και πολικών τάσεων, για περίπτωση κεραυνικού πλήγματος αρνητικού κεραυνού LPL-I, στην είσοδο του μετασχηματιστή ξηράς, για τις τρεις περιπτώσεις προστασίας έναντι των υπερτάσεων και την περίπτωση χωρίς προστασία.

Αρνητικό Κεραυνικό πλήγμα στην είσοδο του Μ/Σ ξηράς - LPL-I			
Περιπτώσεις	Είσοδος ΜΣ ξηράς		
	Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
Περίπτωση 1	23109	740.36	-966.24
Περίπτωση 2	23116	-1080.9	-968.898
Περίπτωση 3	23132	-1095.3	-963.43
Χωρίς προστασία	-77137	18850	19568
	Τάση ΑΓ (V)	Τάση ΒΑ (V)	Τάση ΓΒ (V)
Περίπτωση 1	-8.21E+05	8.21E+05	1.78E+04
Περίπτωση 2	-8.21E+05	8.21E+05	19285
Περίπτωση 3	-8.21E+05	8.20E+05	-34643
Χωρίς προστασία	-3.12E+07	3.15E+07	1.98E+06
Είσοδος καλωδίου			
	Τάση Φ1-4 (V)	Τάση Φ2-5 (V)	Τάση Φ3-6 (V)
Περίπτωση 1	10432	5208.9	-7420
Περίπτωση 2	10682	5235.9	-7479.8
Περίπτωση 3	11355	5518.7	-7557
Χωρίς προστασία	1.77E+05	-2.20E+05	60751
Έξοδος καλωδίου			
	Τάση Φ1-4 (V)	Τάση Φ2-5 (V)	Τάση Φ3-6 (V)
Περίπτωση 1	10414	5204	-7416.3
Περίπτωση 2	10676	5231.3	-7479.8
Περίπτωση 3	11340	5507.5	-7475.2
Χωρίς προστασία	1.77E+05	-2.20E+05	60771
Είσοδος ΜΣ πλοίου			

	Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
Περίπτωση 1	1244.1	215.26	737.09
Περίπτωση 2	1239.6	228.65	762.75
Περίπτωση 3	1274.6	226.87	834.26
Χωρίς προστασία	3000.3	-3390.8	733.78
	Τάση ΑΓ (V)	Τάση ΒΑ (V)	Τάση ΓΒ (V)
Περίπτωση 1	12723	-10686	-9593.5
Περίπτωση 2	13048	-10965	-9777.6
Περίπτωση 3	13529	-11643	13487
Χωρίς προστασία	1.31E+05	-3.95E+05	2.74E+05
<b>Είσοδος φορτίου</b>			
	Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
Περίπτωση 1	216.34	-207.78	190.01
Περίπτωση 2	216.97	-207.9	190.27
Περίπτωση 3	216.75	-202.37	-192.42
Χωρίς προστασία	1138.2	-2789.6	1656.2
	Τάση ΑΓ (V)	Τάση ΒΑ (V)	Τάση ΓΒ (V)
Περίπτωση 1	12767	-16879	-8774.5
Περίπτωση 2	13148	-17609	9077.1
Περίπτωση 3	14147	-18244	9336
Χωρίς προστασία	-1.18E+05	-3.87E+05	5.02E+05
<b>Surge arrester ξηράς</b>			
	Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
Περίπτωση 1	-1.16E+05	940.08	892.81
Περίπτωση 2	-1.16E+05	940.47	893.44
Περίπτωση 3	-1.16E+05	927.26	887.81
	Φορτίο, A	Φορτίο, B	Φορτίο, Γ
Περίπτωση 1	27.673	0.36	0.339

Περίπτωση 2	27.81	0.361	0.339
Περίπτωση 3	27.826	0.363	0.342
	<b>W/R, A</b>	<b>W/R, B</b>	<b>W/R, Γ</b>
Περίπτωση 1	1.368	3.864	3.672
Περίπτωση 2	1.368	3.884	3.675
Περίπτωση 3	1.368	3.98	3.718
	<b>Τάση, A (V)</b>	<b>Τάση, B (V)</b>	<b>Τάση, Γ (V)</b>
Περίπτωση 1	-68079	34064	-33905
Περίπτωση 2	-68080	34065	33981
Περίπτωση 3	-68087	34043	33787
<b>Surge arrester πλοίου 5kV</b>			
	<b>Ρεύμα, φάση A (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση B (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
Περίπτωση 1	17.281	8.63	7.195
Περίπτωση 2	17.684	8.675	8.292
	<b>Φορτίο, A (A·s)</b>	<b>Φορτίο, B (A·s)</b>	<b>Φορτίο, Γ (A·s)</b>
Περίπτωση 1	0.209	0.206	0.666
Περίπτωση 2	0.21	0.216	0.792
	<b>W/R, A</b>	<b>W/R, B</b>	<b>W/R, Γ</b>
Περίπτωση 1	1.267	1.204	414.26
Περίπτωση 2	1.29	1.99	591.37
	<b>Τάση, A (V)</b>	<b>Τάση, B (V)</b>	<b>Τάση, Γ (V)</b>
Περίπτωση 1	10424	5203.8	-7416.3
Περίπτωση 2	10673	5231.1	-7482.2
<b>Surge arrester πλοίου 6.6kV</b>			
	<b>Ρεύμα, φάση A (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση B (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
Περίπτωση 1	15.567	-12.994	-11.797
	<b>Φορτίο, A (A·s)</b>	<b>Φορτίο, B (A·s)</b>	<b>Φορτίο, Γ (A·s)</b>
Περίπτωση 1	0.442	0.243	0.434
	<b>W/R, A</b>	<b>W/R, B</b>	<b>W/R, Γ</b>

Περίπτωση 1	49.331	1.516	53.09
	Τάση, A (V)	Τάση, B (V)	Τάση, Γ (V)
Περίπτωση 1	9385.5	-7814.2	-7119.3

Από τον Πίνακα 33, μπορούν να παρατηρηθούν τα εξής:

- Η καλύτερη περίπτωση προστασίας είναι η πρώτη, δηλαδή με τους τρεις surge arrester. Ακολουθεί με μικρή απόκλιση η δεύτερη περίπτωση προστασίας με τους δύο surge arrester, ενώ η λιγότερο αποδοτική είναι η τρίτη περίπτωση προστασίας, με τον έναν surge arrester.
- Παρόλα αυτά, όταν γίνεται η σύγκριση του κεραυνικού πλήγματος στην είσοδο του μετασχηματιστή ξηράς και των τριών περιπτώσεων προστασίας με την περίπτωση χωρίς προστασία, φαίνεται ξεκάθαρα ότι μειώνονται τα υπερρεύματα και οι υπερτάσεις. Επομένως, για το κεραυνικό χτύπημα στην είσοδο του μετασχηματιστή, η διάταξη προστατεύεται με επιτυχία.

Ακολουθεί ο Πίνακας 34 για την περίπτωση κεραυνικού πλήγματος στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς:

*Πίνακας 34. Μέγιστες τιμές ρευμάτων και πολικών τάσεων, για περίπτωση κεραυνικού πλήγματος αρνητικού κεραυνού LPL-I, στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς, για τις τρεις περιπτώσεις προστασίας έναντι των υπερτάσεων και την περίπτωση χωρίς προστασία.*

### Αρνητικό Κεραυνικό πλήγμα στη γείωση του Μ/Σ ξηράς - LPL-I

Περιπτώσεις	Είσοδος ΜΣ ξηράς		
	Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
Περίπτωση 1	331.55	193.13	202.2
Περίπτωση 2	335.94	-270.48	-200.59
Περίπτωση 3	351.54	-280.76	-202.41
Χωρίς προστασία	339.57	212.95	954
	Τάση ΑΓ (V)	Τάση ΒΑ (V)	Τάση ΓΒ (V)
Περίπτωση 1	43136	28925	29292

Περίπτωση 2	43163	-41500	-31091
Περίπτωση 3	42732	-42822	-31686
Χωρίς προστασία	48837	-57285	47292
<b>Είσοδος καλωδίου</b>			
	<b>Τάση Φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση Φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση Φ3-6 (V)</b>
Περίπτωση 1	6715.6	5578.8	5584.5
Περίπτωση 2	6930.6	5675.8	-6215.8
Περίπτωση 3	7405.1	5943.1	-6486.2
Χωρίς προστασία	5822.2	-13221	26508
<b>Έξοδος καλωδίου</b>			
	<b>Τάση Φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση Φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση Φ3-6 (V)</b>
Περίπτωση 1	6685.2	5572.1	5579.9
Περίπτωση 2	6898.9	5668.6	-6203.8
Περίπτωση 3	7361.1	5937.8	-6502.2
Χωρίς προστασία	5752.2	-13229	26499
<b>Είσοδος ΜΣ πλοίου</b>			
	<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
Περίπτωση 1	1110.8	1244.8	856.17
Περίπτωση 2	1116.9	-1428.7	884.15
Περίπτωση 3	1203.2	-1587.2	978.32
Χωρίς προστασία	-259.49	-356.16	468.29
	<b>Τάση ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση ΓΒ (V)</b>
Περίπτωση 1	6612.9	-8471.2	7520.9
Περίπτωση 2	7064.5	-8703.9	7501.5
Περίπτωση 3	-7817	-8795.8	8019.1
Χωρίς προστασία	-30464	-9457.8	34806
<b>Είσοδος φορτίου</b>			
	<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>

Περίπτωση 1	189.66	178.9	-190.13
Περίπτωση 2	190.22	179.53	-191.2
Περίπτωση 3	190.56	178.54	-194.17
Χωρίς προστασία	-254.17	-221.15	358.01
	<b>Τάση ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση ΓΒ (V)</b>
Περίπτωση 1	10480	-11302	8818.3
Περίπτωση 2	10700	-11779	9033.4
Περίπτωση 3	11638	-11852	9525.1
Χωρίς προστασία	-49331	20006	30386
<b>Surge arrester ξηράς</b>			
	<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
Περίπτωση 1	355	117.86	147.98
Περίπτωση 2	355	118.03	147.97
Περίπτωση 3	360	116.38	147.94
	<b>Φορτίο, Α</b>	<b>Φορτίο, Β</b>	<b>Φορτίο, Γ</b>
Περίπτωση 1	0.414	0.368	0.355
Περίπτωση 2	0.416	0.366	0.355
Περίπτωση 3	0.417	0.37	0.359
	<b>W/R, Α</b>	<b>W/R, Β</b>	<b>W/R, Γ</b>
Περίπτωση 1	28.349	4.585	5.414
Περίπτωση 2	28.449	4.606	5.418
Περίπτωση 3	29.068	4.654	5.479
	<b>Τάση, Α (V)</b>	<b>Τάση, Β (V)</b>	<b>Τάση, Γ (V)</b>
Περίπτωση 1	32694	31630	31846
Περίπτωση 2	32696	31643	31857
Περίπτωση 3	32704	31614	31854
<b>Surge arrester πλοίου 5kV</b>			
	<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
Περίπτωση 1	11.087	9.243	9.241

Περίπτωση 2	11.444	9.404	-9.479
	<b>Φορτίο, A (A·s)</b>	<b>Φορτίο, B (A·s)</b>	<b>Φορτίο, Γ (A·s)</b>
Περίπτωση 1	0.2039	0.206	0.656
Περίπτωση 2	0.205	0.222	0.782
	<b>W/R, A</b>	<b>W/R, B</b>	<b>W/R, Γ</b>
Περίπτωση 1	1.109	1.212	403.57
Περίπτωση 2	1.131	3.098	579.08
	<b>Τάση, A (V)</b>	<b>Τάση, B (V)</b>	<b>Τάση, Γ (V)</b>
Περίπτωση 1	6682.5	5574.2	5581.9
Περίπτωση 2	6900.6	5670.4	-5089.4
<b>Surge arrester πλοίου 6.6kV</b>			
	<b>Ρεύμα, φάση A (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση B (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
Περίπτωση 1	8.611	8.042	9.238
	<b>Φορτίο, A (A·s)</b>	<b>Φορτίο, B (A·s)</b>	<b>Φορτίο, Γ (A·s)</b>
Περίπτωση 1	0.45	0.241	0.436
	<b>W/R, A</b>	<b>W/R, B</b>	<b>W/R, Γ</b>
Περίπτωση 1	52.7	1.457	56.698
	<b>Τάση, A (V)</b>	<b>Τάση, B (V)</b>	<b>Τάση, Γ (V)</b>
Περίπτωση 1	5225.9	-6269.1	5580.6

Από τον Πίνακα 34, παρατηρούνται τα εξής:

- Στην περίπτωση κεραυνικού πλήγματος στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς, η αποδοτικότερη διάταξη προστασίας είναι η πρώτη, ενώ ακολουθεί η δεύτερη με μικρή απόκλιση. Η λιγότερο αποδοτική διάταξη είναι η τρίτη.
- Ακόμη, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι τιμές των τάσεων και των ρευμάτων στην είσοδο και έξοδο του καλωδίου σύνδεσης, αλλά και τα ρεύματα στην είσοδο του μετασχηματιστή του πλοίου, στην περίπτωση όπου το κεραυνικό πλήγμα αφορά τη διάταξη χωρίς προστασία, διότι παρουσιάζουν μικρότερες τιμές σε σχέση με τις περιπτώσεις όπου η διάταξη προστατεύεται.

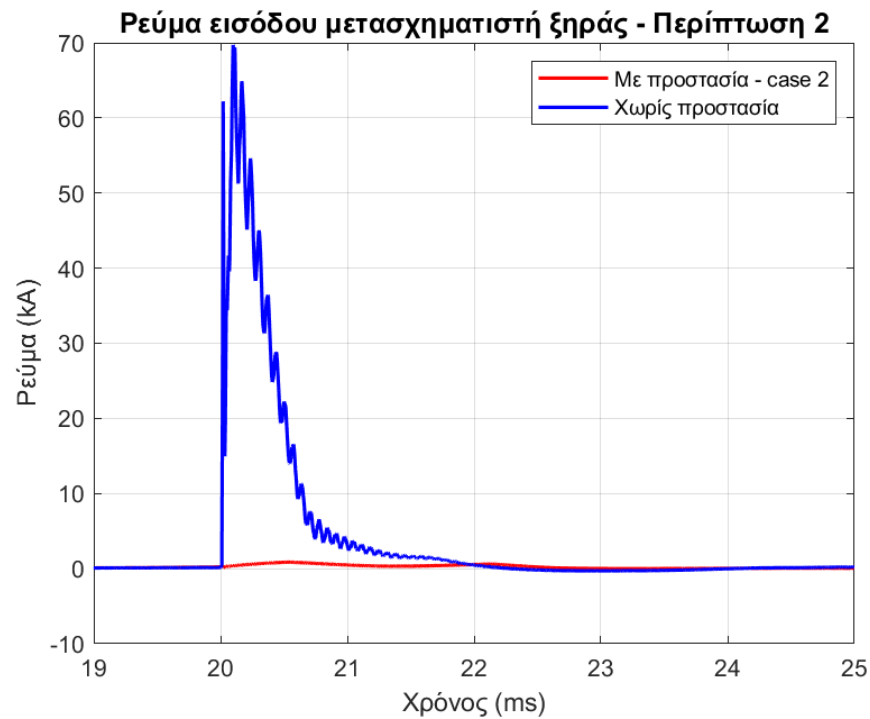


Αυτό συμβαίνει, διότι οι surge arrester συνδέουν τη γείωση του υποσταθμού με τον μεταλλικό σκελετό του πλοίου μέσω της θάλασσας. Αυτό σημαίνει ότι το κεραυνικό ρεύμα αντί να καταλήξει όλο στη γη από τη γη του υποσταθμού, μοιράζεται μεταξύ των δύο γειώσεων λόγω της πολύ μικρής αντίστασης γείωσης του πλοίου. Αυτό δημιουργεί υπερτάσεις στο κύκλωμα οι οποίες πρέπει να μελετηθούν και οφείλονται στην εγκατάσταση των surge arrester.

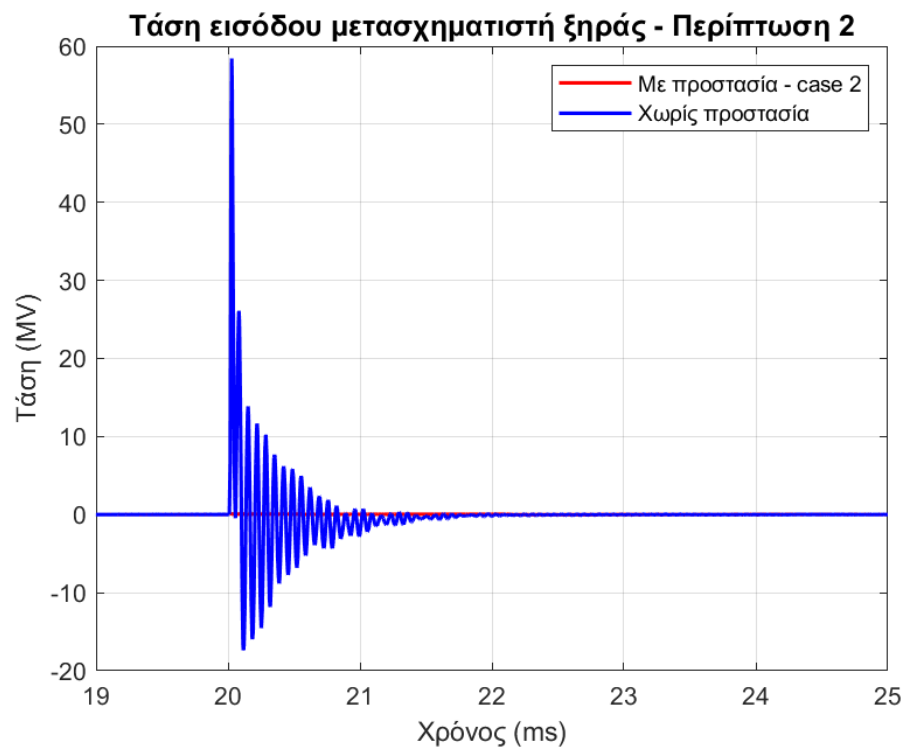
Συμπερασματικά, οι δύο καλύτερες διατάξεις προστασίας είναι η πρώτη, η οποία χρησιμοποιεί τρεις surge arrester, και η δεύτερη η οποία χρησιμοποιεί δύο surge arrester. Επειδή οι τιμές απόκλισης των μέγιστων ρευμάτων και τάσεων στις δύο αυτές περιπτώσεις προστασίας, έχουν μικρές διαφορές, επιλέγεται η δεύτερη περίπτωση προστασίας ως λύση για την προστασία του συστήματος, εφόσον χρησιμοποιεί ένα λιγότερο στοιχείο προστασίας και πετυχαίνει εξίσου αποτελεσματικά την επιθυμητή προστασία έναντι στις υπερτάσεις.

Σε δεύτερο και τρίτο στάδιο, ακολουθούν τα διαγράμματα, σε κοινούς άξονες, θετικού και αρνητικού επακόλουθου κεραυνικού αντίστοιχα, με τη δεύτερη περίπτωση προστασίας.

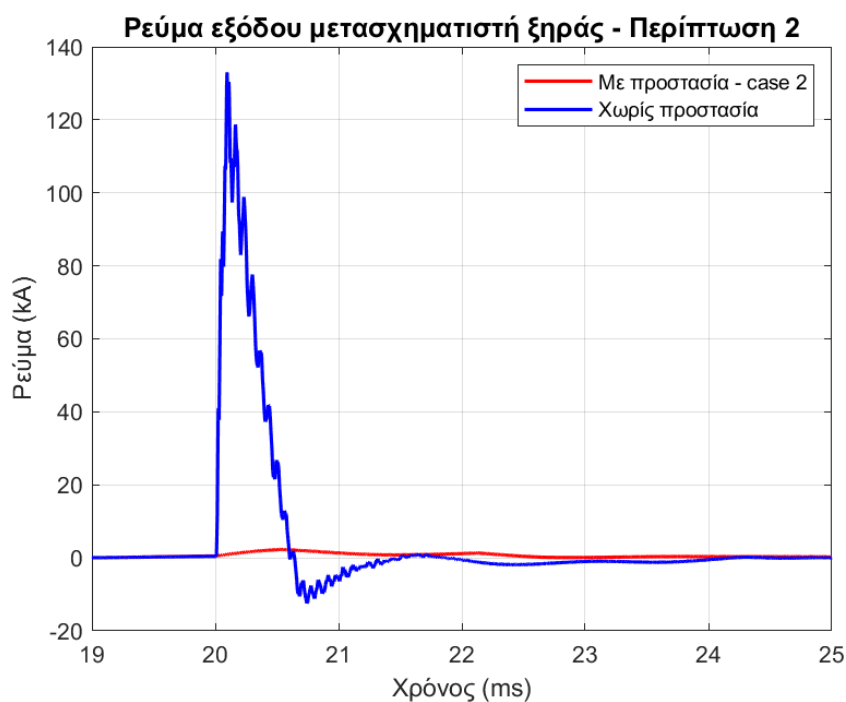
Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα, σε κοινούς άξονες (Εικόνα 126 – 136), στα σημεία μέτρησης του Πίνακα 20, για το θετικό κεραυνικό πλήγμα, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία:



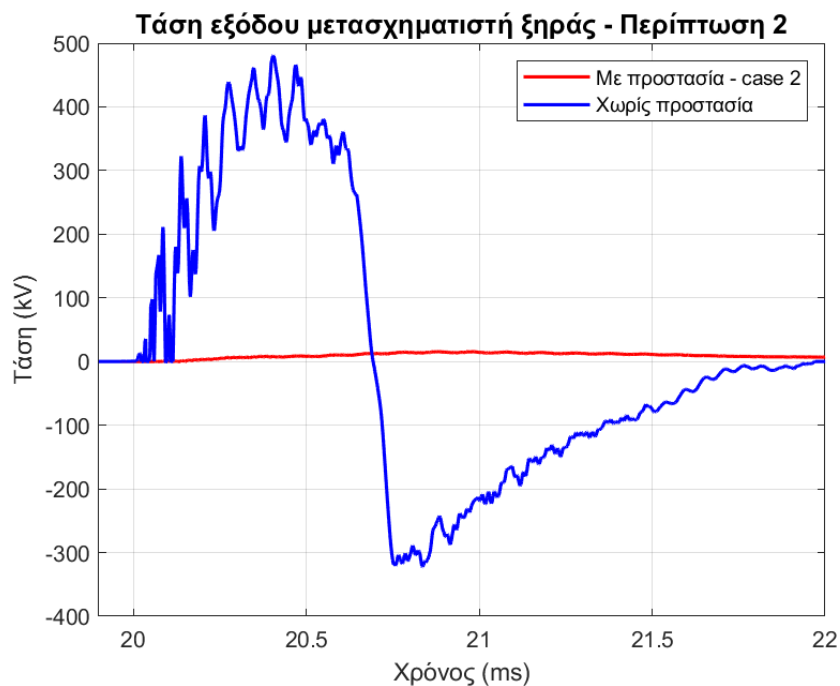
Εικόνα 126. Ρεύμα εισόδου μετασχηματιστή ξηράς, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για θετικό κεραυνό LPL-I.



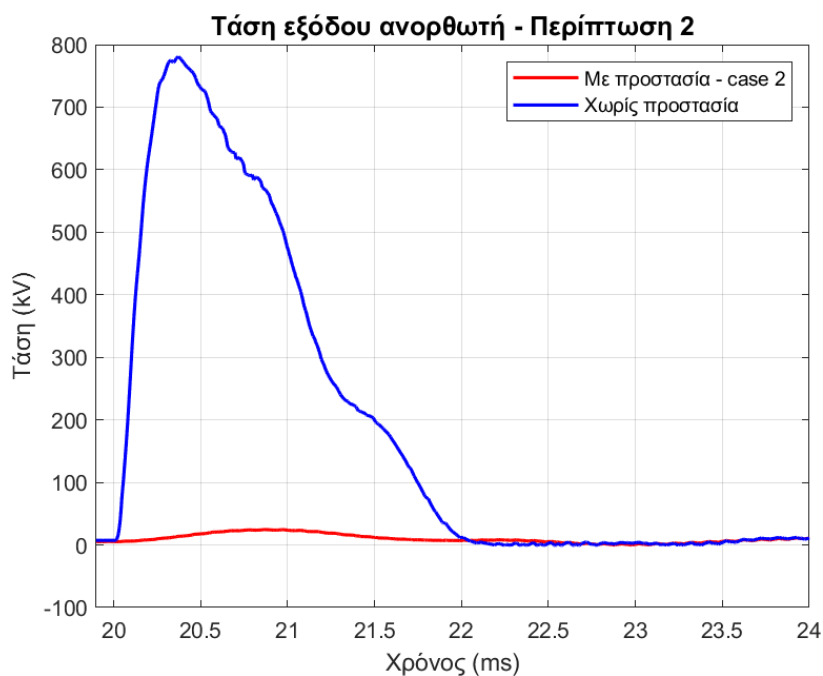
Εικόνα 127. Τάση εισόδου μετασχηματιστή ξηράς, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για θετικό κεραυνό LPL-I.



Εικόνα 128. Ρεύμα εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για θετικό κεραυνό LPL-I.



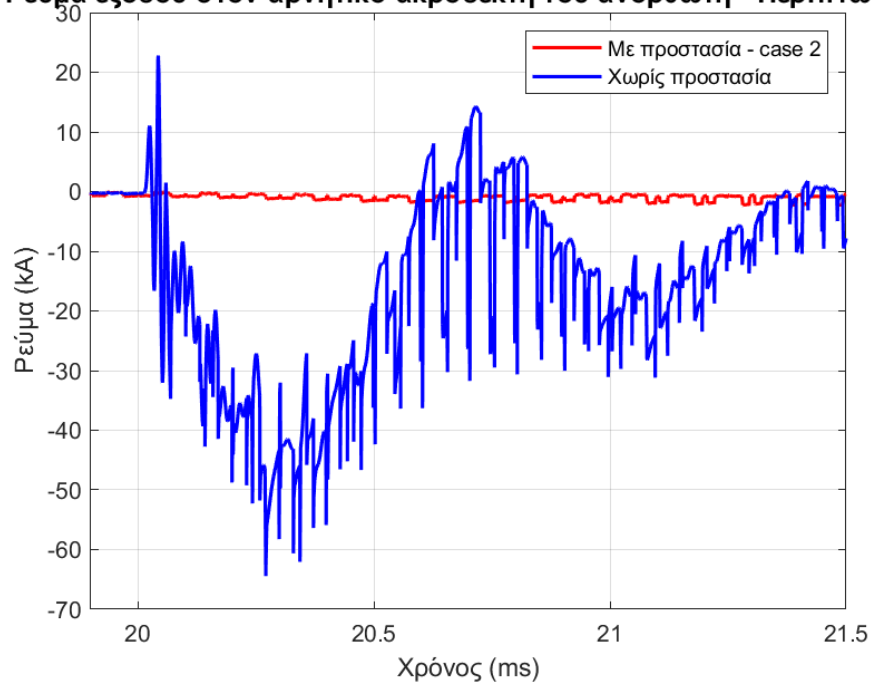
Εικόνα 129. Τάση εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για θετικό κεραυνό LPL-I.



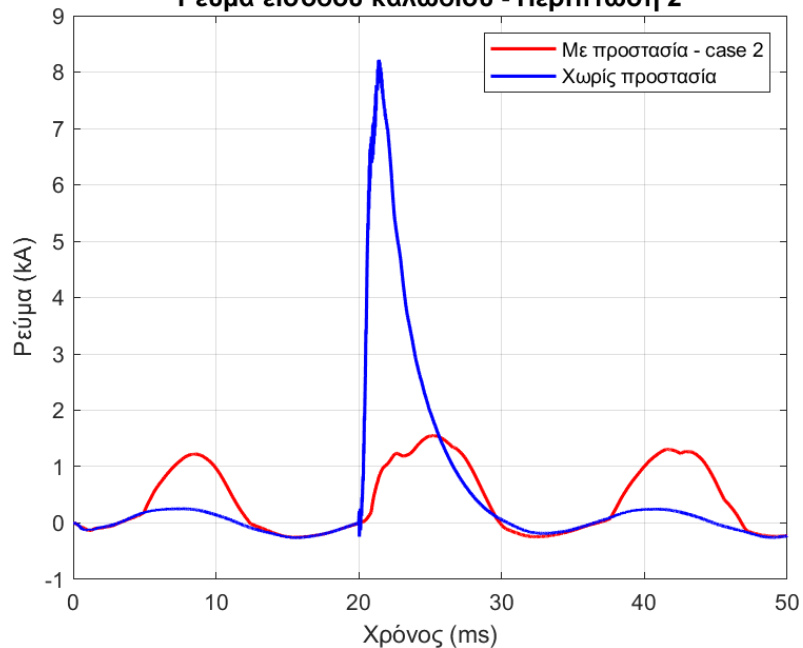
Εικόνα 130. Τάση εξόδου ανορθωτή, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για θετικό κεραυνό LPL-I.



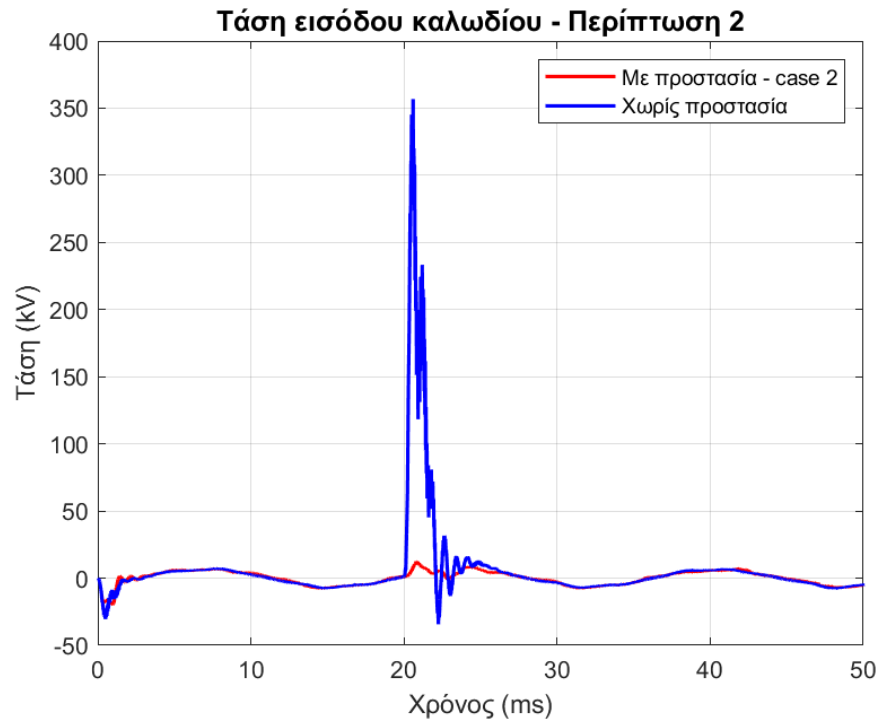
Εικόνα 131. Ρεύμα εξόδου ανορθωτή στον θετικό ακροδέκτη, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για θετικό κεραυνό LPL-I.

**Ρεύμα εξόδου στον αρνητικό ακροδέκτη του ανορθωτή - Περίπτωση 2**

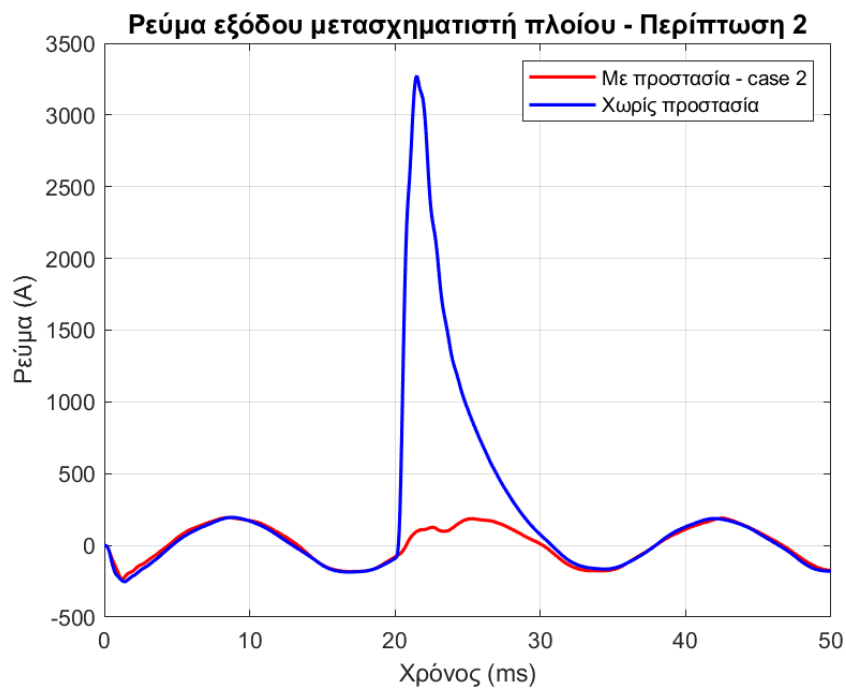
Εικόνα 132. Ρεύμα εξόδου ανορθωτή στον αρνητικό ακροδέκτη, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για θετικό κεραυνό LPL-I.

**Ρεύμα εισόδου καλωδίου - Περίπτωση 2**

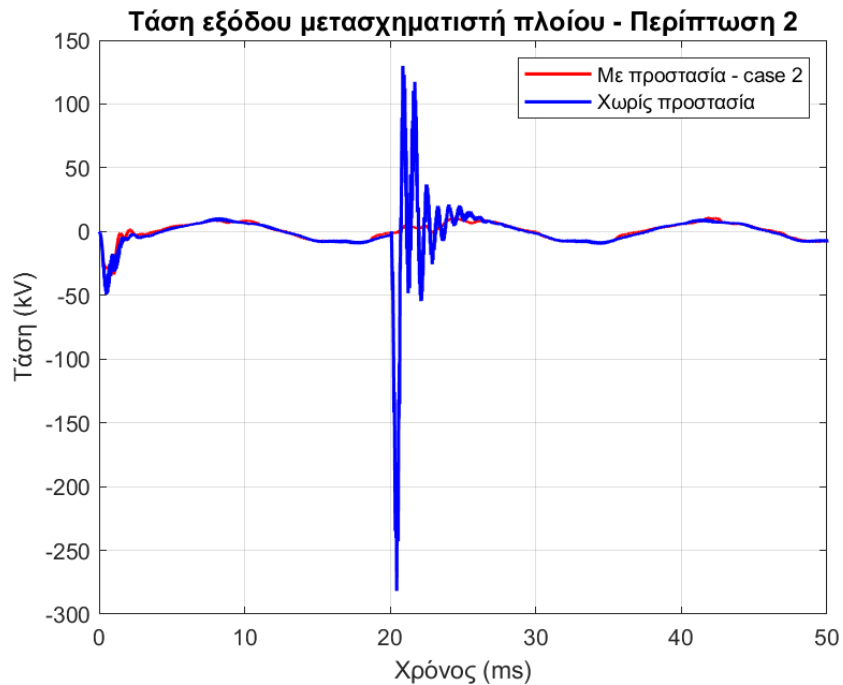
Εικόνα 133. Ρεύμα εισόδου καλωδίου, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για θετικό κεραυνό LPL-I.



Εικόνα 134. Τάση εισόδου καλωδίου, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για θετικό κεραυνό LPL-I.

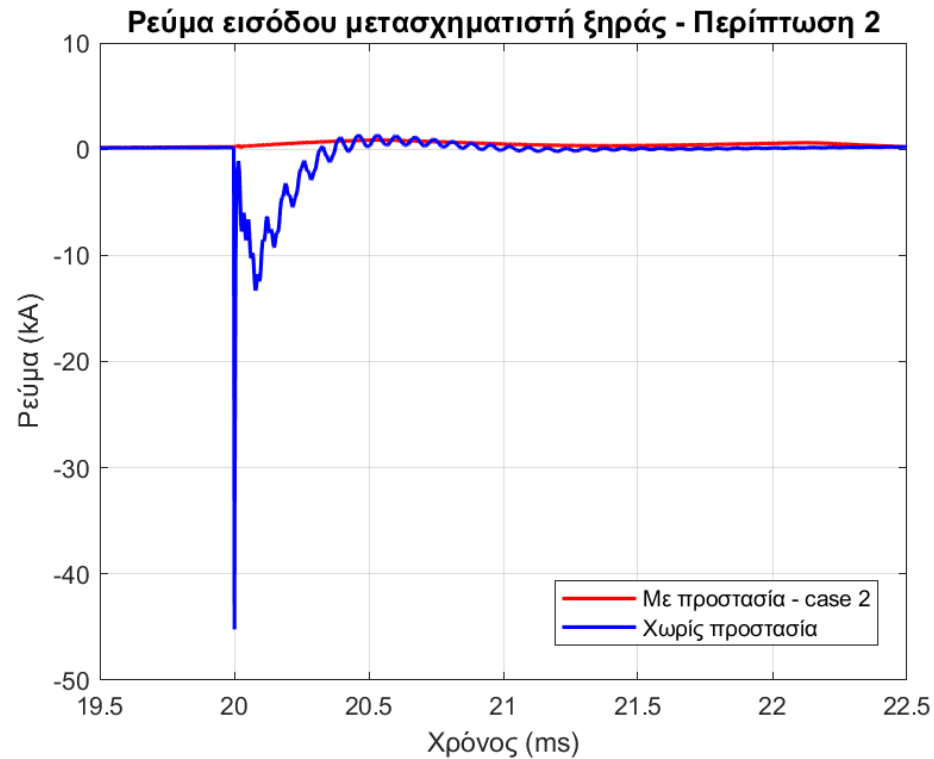


Εικόνα 135. Ρεύμα εξόδου μετασχηματιστή πλοίου, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για θετικό κεραυνό LPL-I.

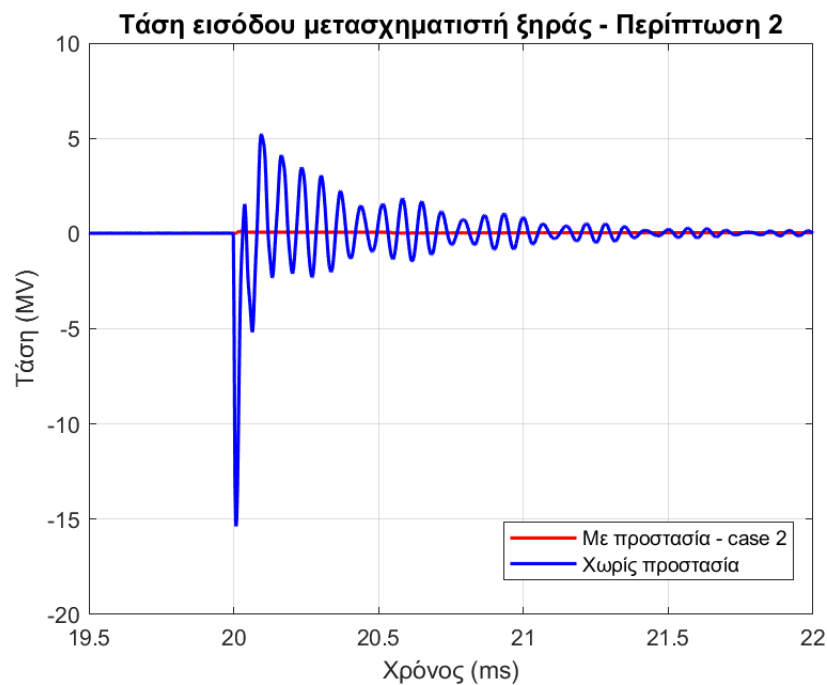


Εικόνα 136. Τάση εξόδου μετασχηματιστή πλοίου, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για θετικό κεραυνό LPL-I.

Διαγράμματα, σε κοινούς άξονες (Εικόνα 137 – 147), στα σημεία του μέτρησης του Πίνακα 22, για το αρνητικό επακόλουθο κεραυνικό πλήγμα, για τις περιπτώσεις προστασίας και μη, χρησιμοποιώντας τη δεύτερη περίπτωση προστασίας:

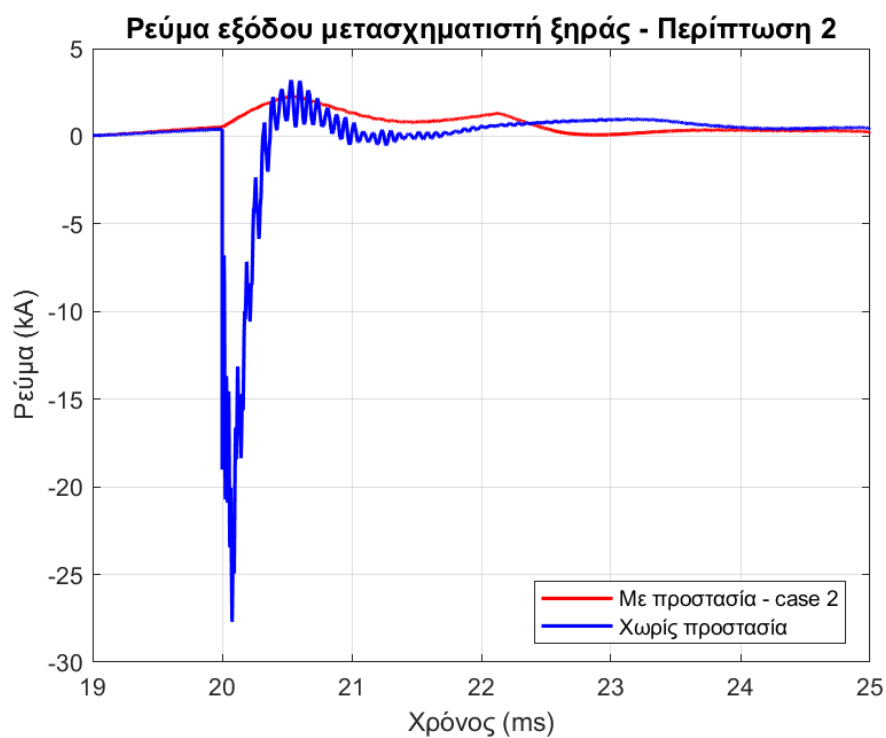


Εικόνα 137. Ρεύμα εισόδου μετασχηματιστή ξηράς, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό επακόλουθο κεραυνό LPL-I.

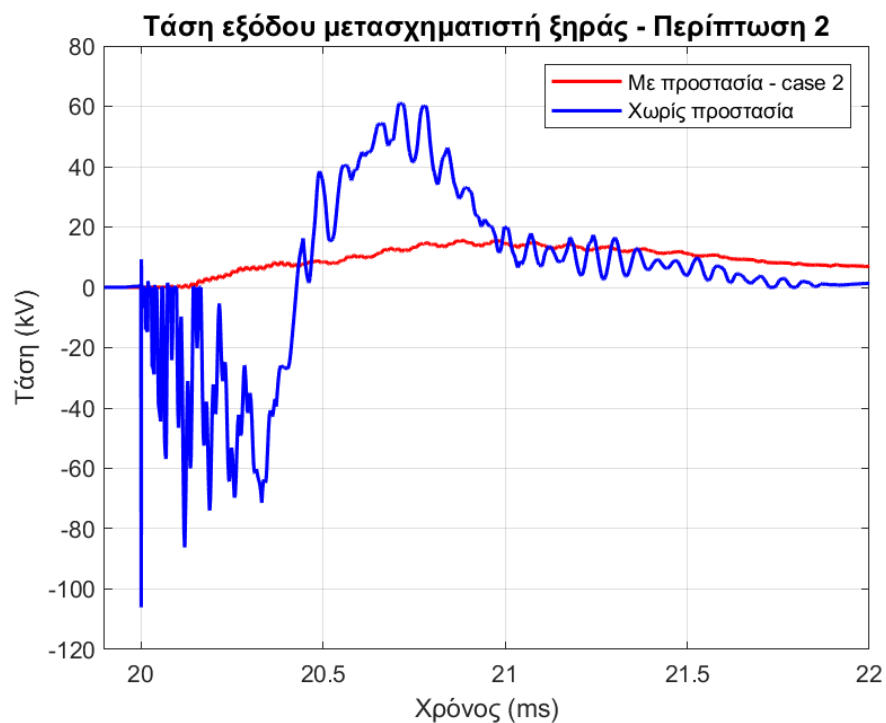


Εικόνα 138. Τάση εισόδου μετασχηματιστή ξηράς, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό επακόλουθο κεραυνό LPL-I.

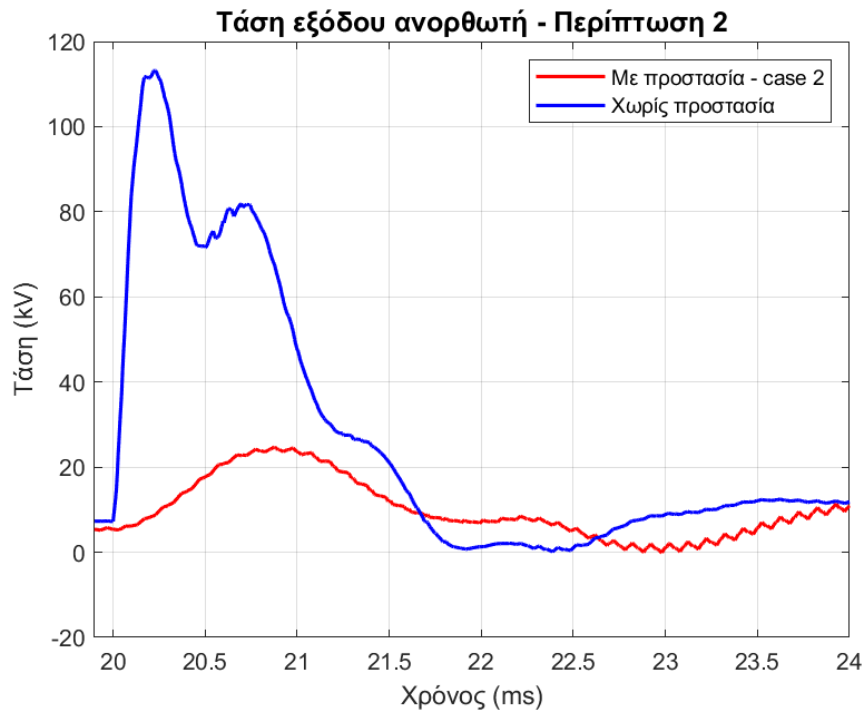




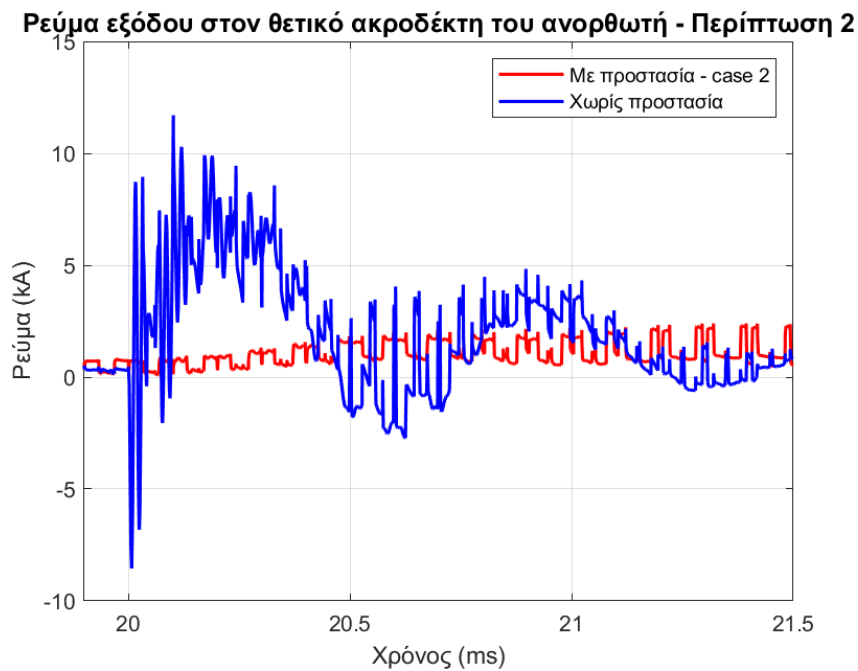
Εικόνα 139. Ρεύμα εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό επακόλουθο κεραυνό LPL-I.



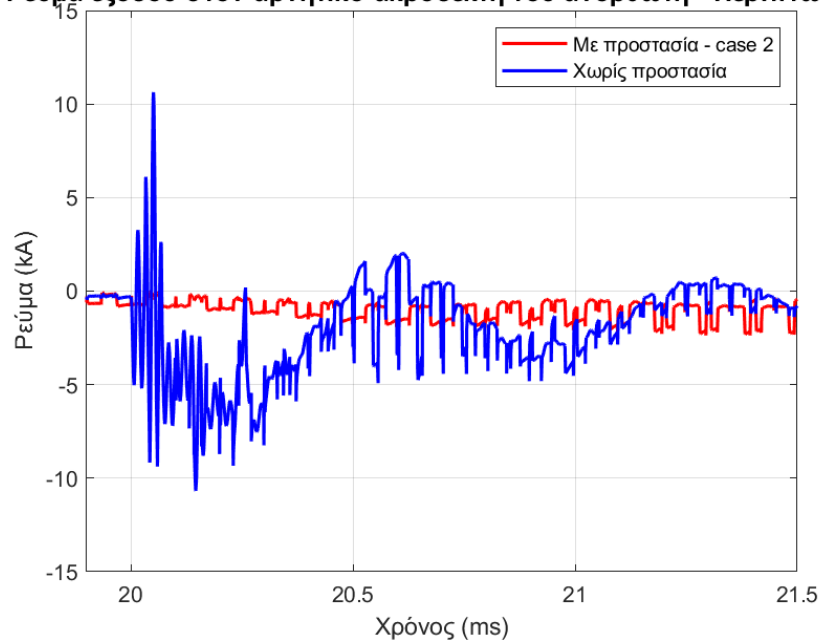
Εικόνα 140. Τάση εξόδου μετασχηματιστή ξηράς, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό επακόλουθο κεραυνό LPL-I.



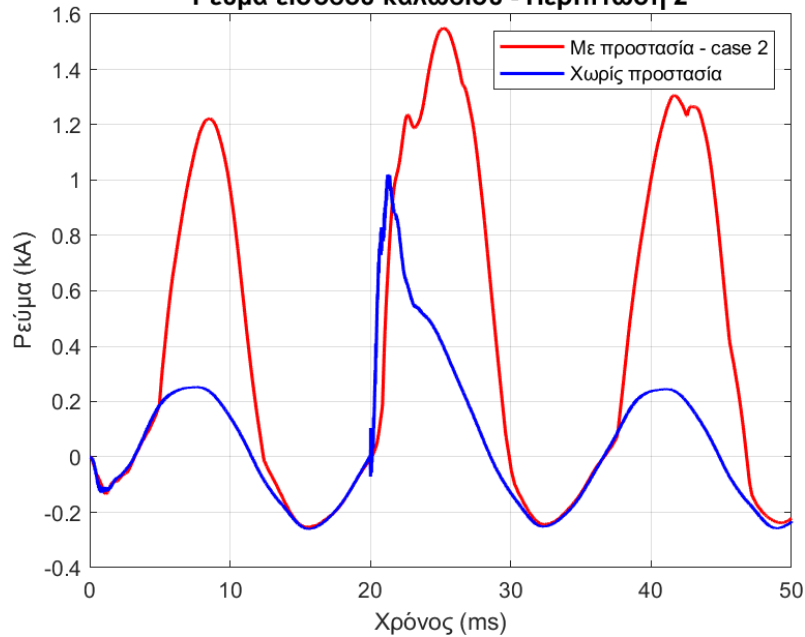
Εικόνα 141. Τάση εξόδου ανορθωτή, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό επακόλουθο κεραυνό LPL-I.



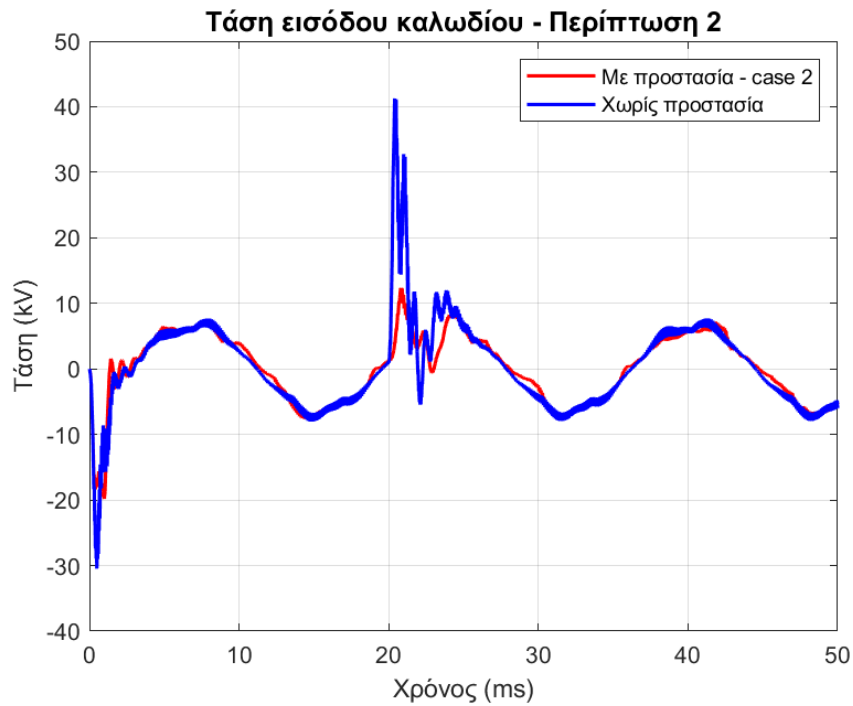
Εικόνα 142. Ρεύμα εξόδου ανορθωτή στον θετικό ακροδέκτη, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό επακόλουθο κεραυνό LPL-I.

**Ρεύμα εξόδου στον αρνητικό ακροδέκτη του ανορθωτή - Περίπτωση 2**

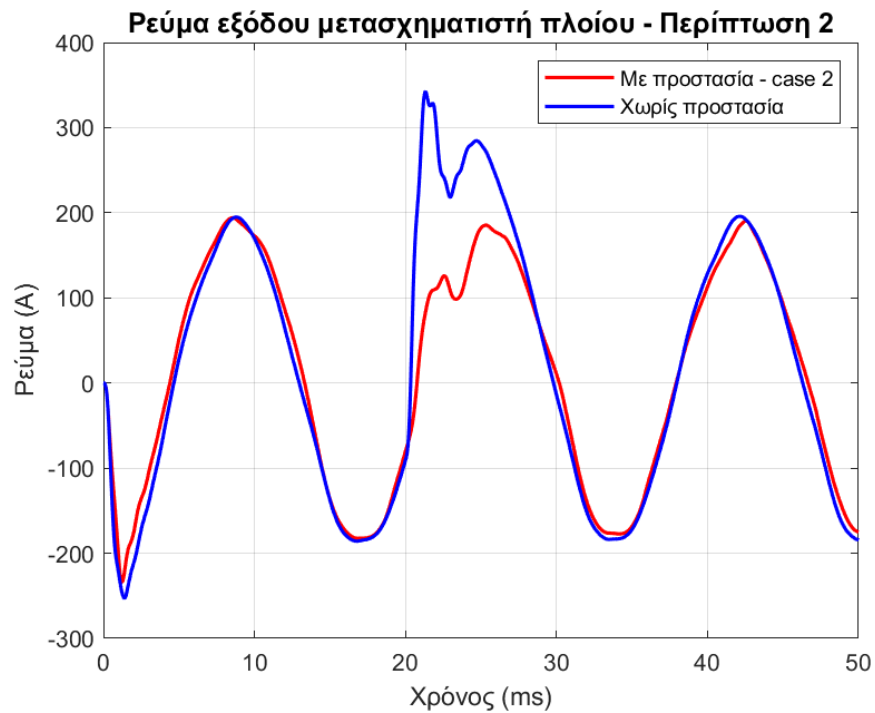
Εικόνα 143. Ρεύμα εξόδου ανορθωτή στον αρνητικό ακροδέκτη, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό επακόλουθο κεραυνό LPL-I.

**Ρεύμα εισόδου καλωδίου - Περίπτωση 2**

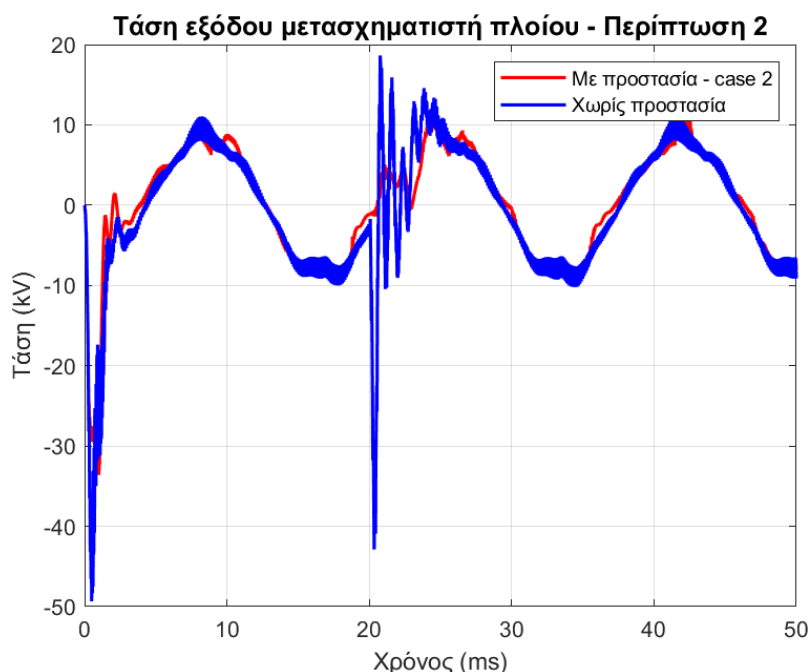
Εικόνα 144. Ρεύμα εισόδου καλωδίου, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό επακόλουθο κεραυνό LPL-I.



Εικόνα 145. Τάση εισόδου καλωδίου, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό επακόλουθο κεραυνό LPL-I.



Εικόνα 146. Ρεύμα εξόδου μετασχηματιστή πλοίου, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό επακόλουθο κεραυνό LPL-I.



Εικόνα 147. Τάση εισόδου μετασχηματιστή πλοίου, για τη δεύτερη περίπτωση προστασίας και την περίπτωση χωρίς προστασία, σε κοινούς άξονες, για αρνητικό επακόλουθο κεραυνό LPL-I.

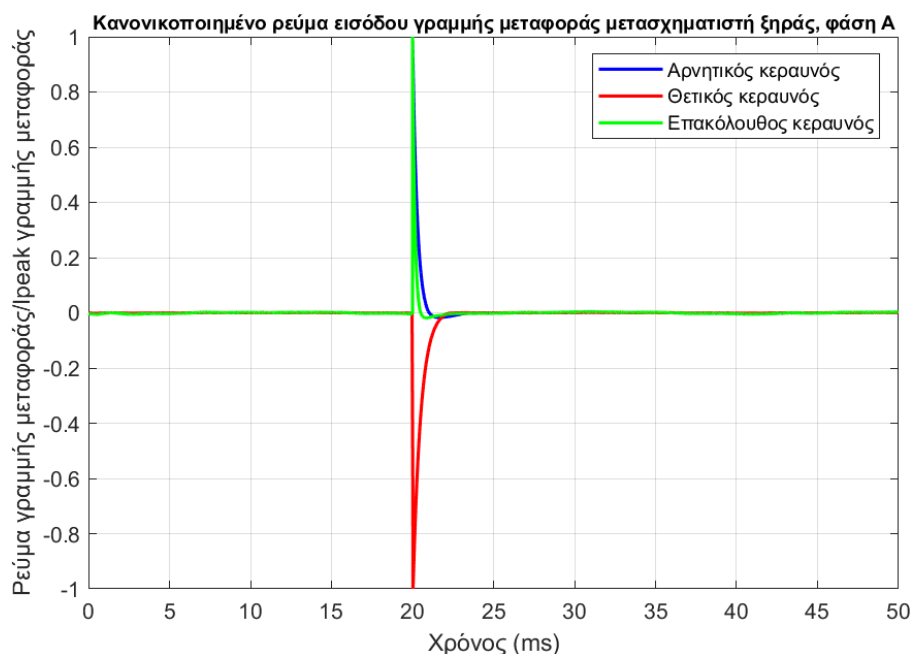
Από τα παραπάνω διαγράμματα, θετικού και αρνητικού επακόλουθου κεραυνού, πέραν του ότι διαπιστώνεται η επιτυχημένη προστασία έναντι των υπερτάσεων, παρατηρείται και ότι στον επακόλουθο αρνητικό κεραυνό, και συγκεκριμένα στην είσοδο του καλωδίου σύνδεσης του δικτύου της ξηράς με το δίκτυο του πλοίου (Εικόνα 144), ότι το ρεύμα στη διάταξη χωρίς προστασία έχει μικρότερη μέγιστη τιμή από ό,τι όταν η διάταξη προστατεύεται. Αυτό ενδεχομένως συμβαίνει, διότι ο διαμοιρασμός των ρευμάτων όπου εισέρχονται και εξέρχονται από τους surge arrester, μεταβάλλεται ανάλογα με τον τύπο κεραυνικού πλήγματος (αρνητικό, θετικό ή επακόλουθο).

Για να διαπιστωθεί αυτό, ακολουθούν κανονικοποιημένα διαγράμματα διαμοιρασμού ρευμάτων (current sharing), για την περίπτωση προστασίας με δύο surge arrester, δηλαδή στις εισόδους των δύο μετασχηματιστών της διάταξης, ενώ η ίδια η διάταξη έχει πληγεί από αρνητικό, θετικό και επακόλουθο κεραυνό LPL-I.

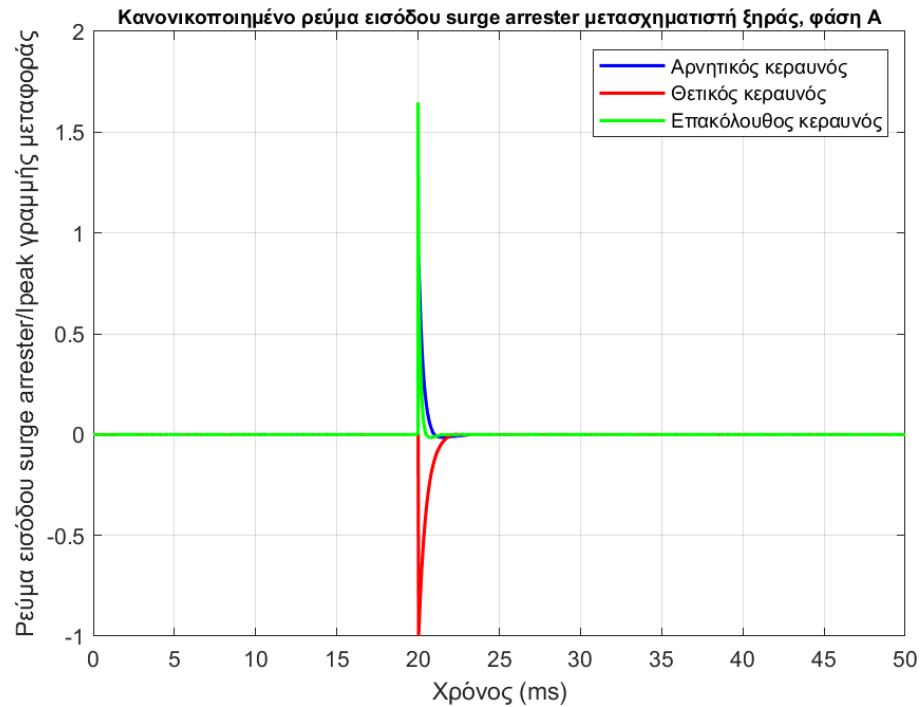
Οι Εικόνες 148, 151, 154, 157 αφορούν το ρεύμα εισόδου στη γραμμή μεταφοράς, πριν τη σύνδεση των μετασχηματιστών με στοιχεία προστασίας. Οι Εικόνες 149, 152, 155, 158 αφορούν το ρεύμα εισόδου των surge arrester στις τρεις φάσεις που τοποθετούνται, με εξαίρεση τον μετασχηματιστή ξηράς όπου αναπαρίσταται μόνο η φάση Α, διότι το κεραυνικό σφάλμα συμβαίνει

στη φάση αυτή, οπότε το ρεύμα εμφανίζεται μεγαλύτερο σε αντίθεση με τις υπόλοιπες δύο φάσεις, ενώ στον μετασχηματιστή του πλοίου, εξετάζονται και οι τρεις φάσεις, διότι μετά τον αντιστροφέα το κεραυνικό ρεύμα έχει μοιραστεί πλέον σε όλες τις φάσεις.

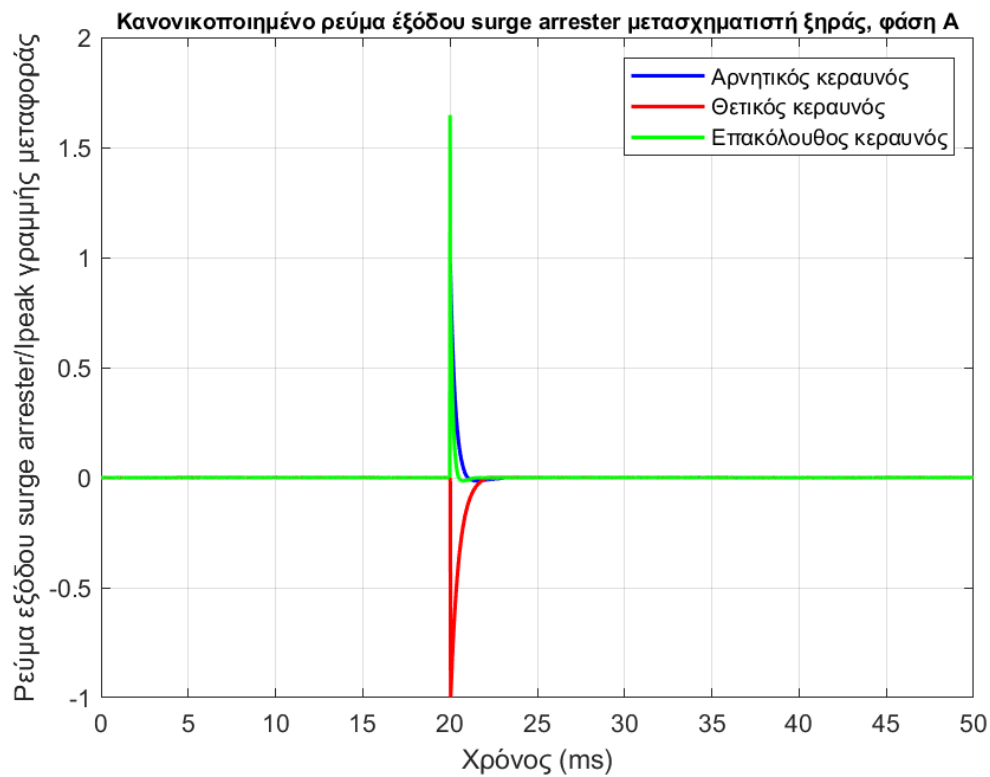
Στις Εικόνες 150, 153, 156, 159, αναπαρίστανται τα ρεύμα που εξέρχονται από τους surge arrester και οδηγούνται προς τη γείωση, ανάλογα με το πού είναι τοποθετημένοι (μετασχηματιστή ξηράς είτε μετασχηματιστή πλοίου).



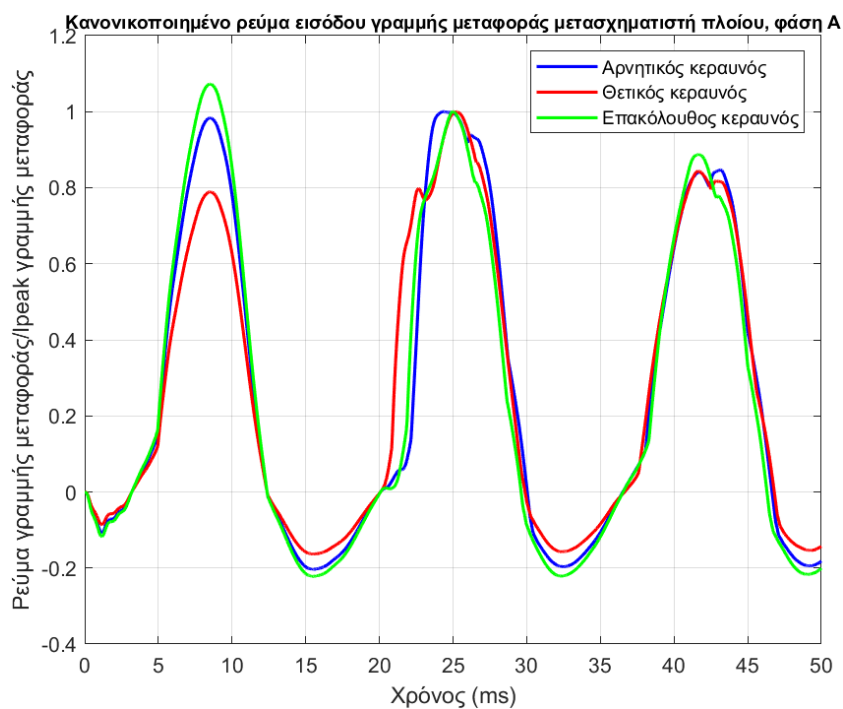
Εικόνα 148. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ρεύματος στη φάση Α της γραμμής μεταφοράς του συστήματος ακτής, πριν τη σύνδεση surge arrester, συμπεριλαμβάνοντας και τα τρία είδη κεραυνικού πλήγματος (αρνητικού, θετικού και επακόλουθου).



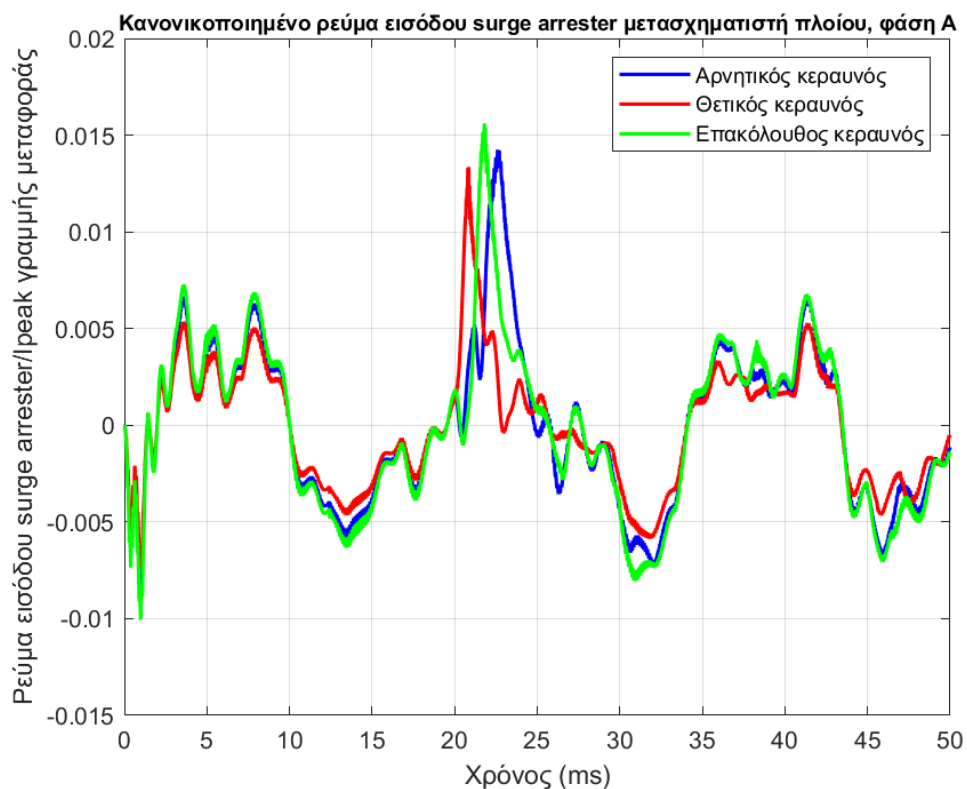
Εικόνα 149. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ρεύματος εισόδου surge arrester μετασχηματιστή ξηράς, στη φάση A, για τα τρία είδη κεραυνικού πλήγματος (αρνητικού, θετικού και επακόλουθου).



Εικόνα 150. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ρεύματος εξόδου surge arrester μετασχηματιστή ξηράς, στη φάση A, για τα τρία είδη κεραυνικού πλήγματος (αρνητικού, θετικού και επακόλουθου).

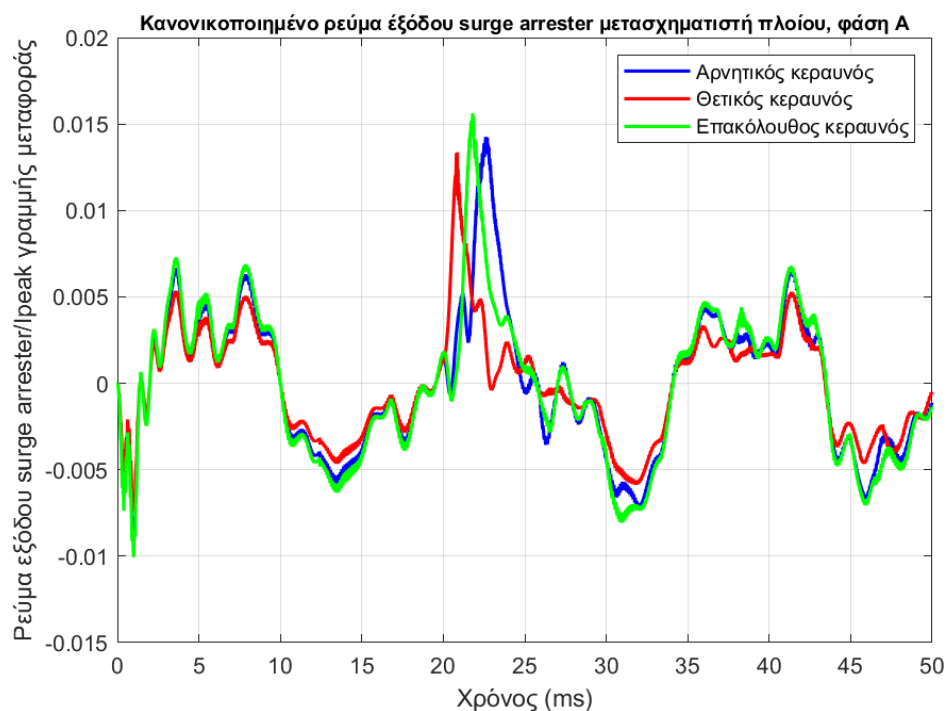


Εικόνα 151. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ρεύματος εισόδου στη φάση Α της γραμμής μεταφοράς του μετασχηματιστή πλοίου, πριν τη σύνδεση surge arrester, συμπεριλαμβάνοντας και τα τρία είδη κεραυνικού πλήγματος (αρνητικού, θετικού και επακόλουθου).

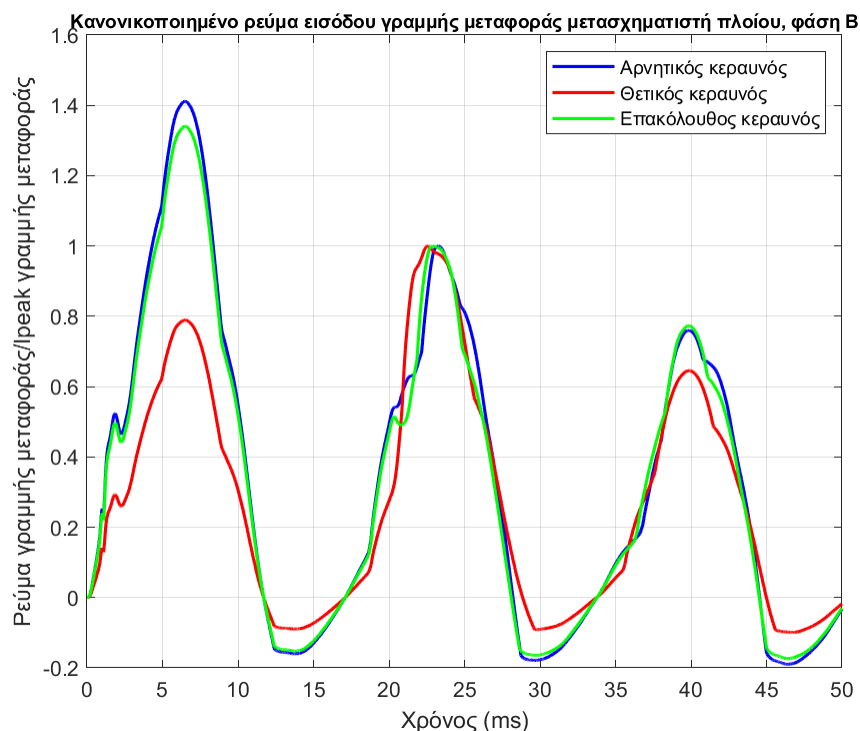


Εικόνα 152. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ρεύματος εισόδου surge arrester μετασχηματιστή πλοίου, στη φάση Α, για τα τρία είδη κεραυνικού πλήγματος (αρνητικού, θετικού και επακόλουθου).

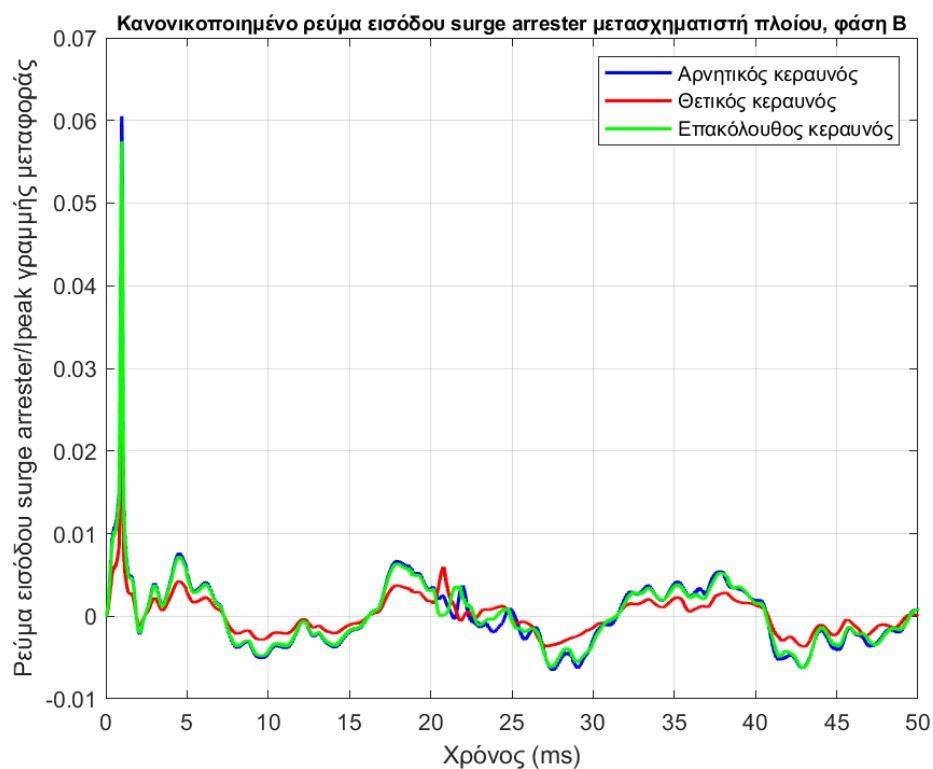




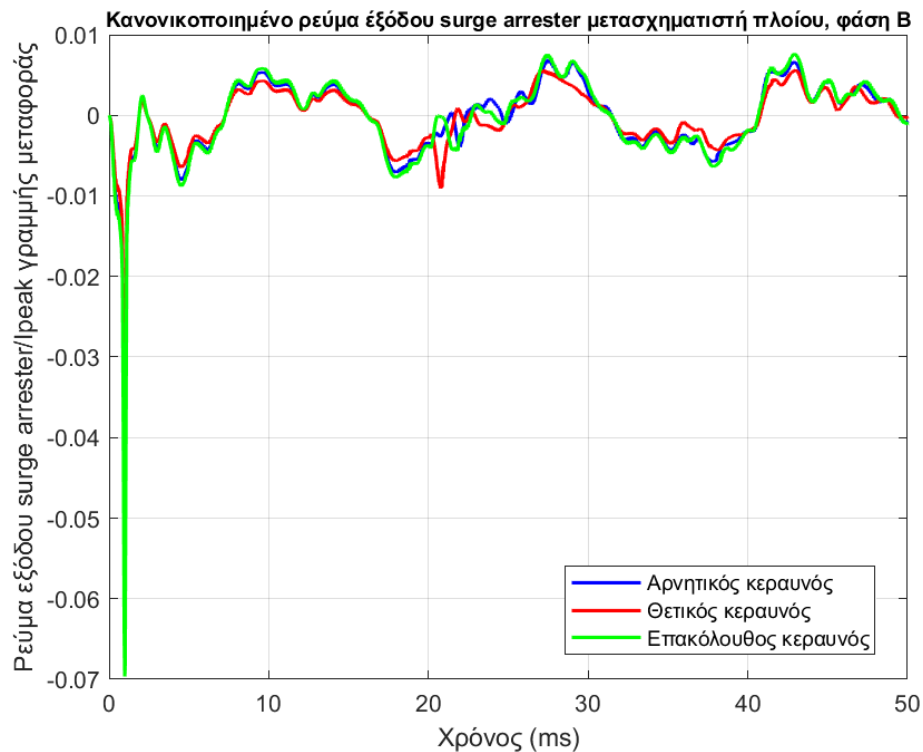
Εικόνα 153. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ρεύματος εξόδου surge arrester μετασχηματιστή πλοίου, στη φάση Α, για τα τρία είδη κεραυνικού πλήγματος (αρνητικού, θετικού και επακόλουθου).



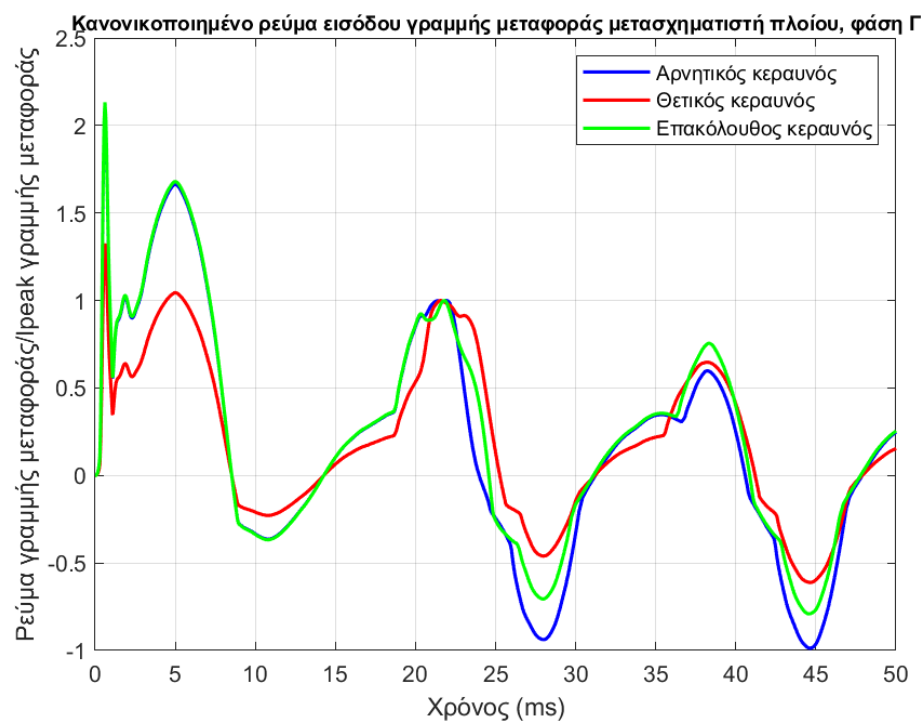
Εικόνα 154. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ρεύματος εισόδου στη φάση Β της γραμμής μεταφοράς του μετασχηματιστή πλοίου, πριν τη σύνδεση surge arrester, συμπεριλαμβάνοντας και τα τρία είδη κεραυνικού πλήγματος (αρνητικού, θετικού και επακόλουθου).



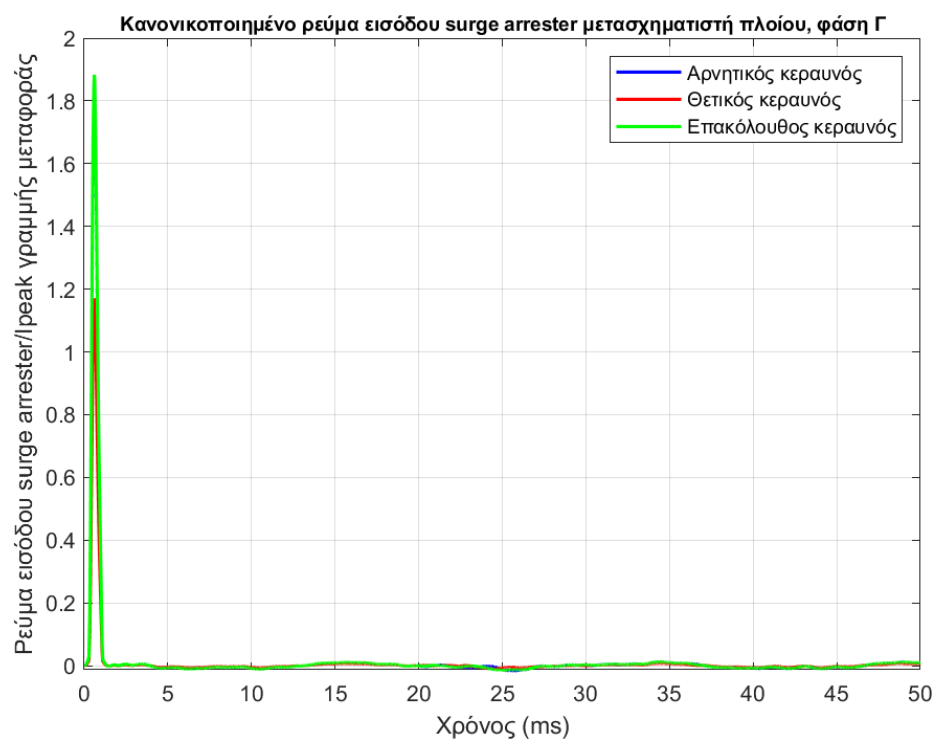
Εικόνα 155. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ρεύματος εισόδου surge arrester μετασχηματιστή πλοίου, στη φάση Β, για τα τρία είδη κεραυνικού πλήγματος (αρνητικού, θετικού και επακόλουθου).



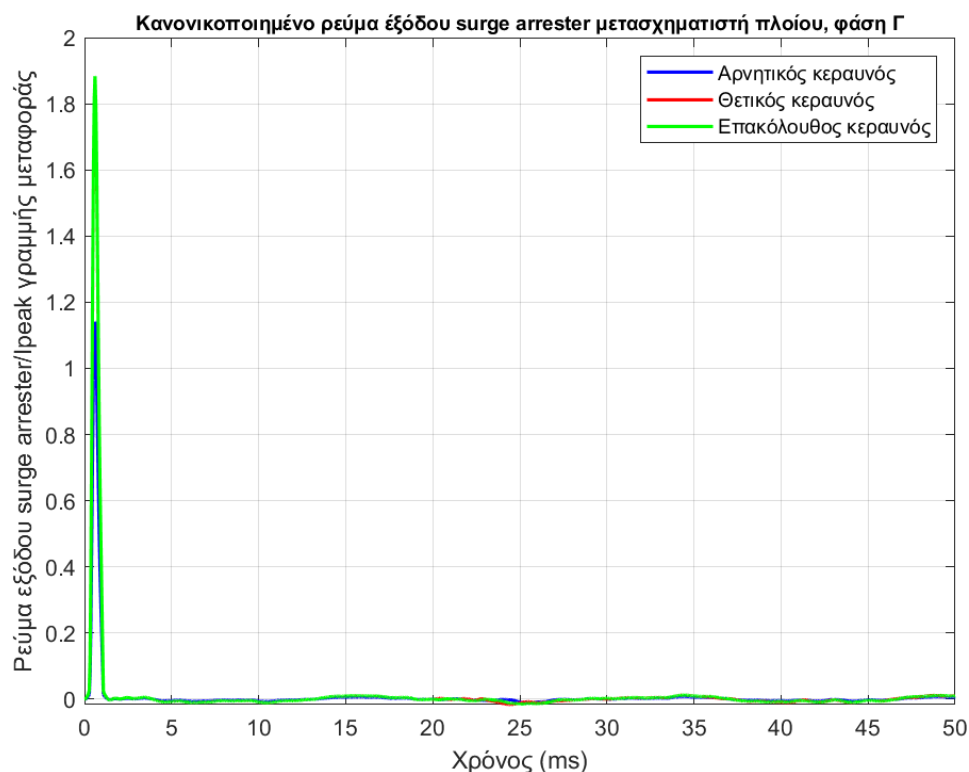
Εικόνα 156. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ρεύματος εξόδου surge arrester μετασχηματιστή πλοίου, στη φάση Β, για τα τρία είδη κεραυνικού πλήγματος (αρνητικού, θετικού και επακόλουθου).



Εικόνα 157. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ρεύματος εισόδου στη φάση Γ της γραμμής μεταφοράς του μετασχηματιστή πλοίου, πριν τη σύνδεση surge arrester, συμπεριλαμβάνοντας και τα τρία είδη κεραυνικού πλήγματος (αρνητικού, θετικού και επακόλουθου).



Εικόνα 158. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ρεύματος εισόδου surge arrester μετασχηματιστή πλοίου, στη φάση Γ, για τα τρία είδη κεραυνικού πλήγματος (αρνητικού, θετικού και επακόλουθου).



Εικόνα 159. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ρεύματος εξόδου surge arrester μετασχηματιστή πλοίου, στη φάση Γ, για τα τρία είδη κεραυνικού πλήγματος (αρνητικού, θετικού και επακόλουθου).

Από τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρείται ότι, παρόλο που το μέγιστο ρεύμα σε αρνητικό επακόλουθο κεραυνικό πλήγμα είναι το μικρότερο από τα μέγιστα ρεύματα αρνητικού και θετικού κεραυνού, δημιουργεί το μεγαλύτερο ρεύμα εντός των στοιχείων προστασίας. Συνεπώς, στην κατασκευή διάταξης προστασίας έναντι των υπερτάσεων, δεν αρκεί μόνο να λαμβάνεται υπόψιν η μέγιστη τιμή του υπερρεύματος ή της υπέρτασης από το κεραυνικό πλήγμα, αλλά και το είδος του κεραυνού, διότι μεταβάλλεται, όπως έγινε κατανοητό και από τα διαγράμματα, ο διαμοιρασμός των εισερχόμενων και εξερχόμενων στον surge arrester ρευμάτων.

Στην παρούσα φάση, ακολουθούν αναλυτικοί πίνακες μετρήσεων όλων των ειδών κεραυνικών πληγμάτων και όλων των LPL, βάσει της δεύτερης περίπτωσης προστασίας του συστήματος έναντι στις υπερτάσεις, τόσο για κεραυνικό σφάλμα στη φάση του μετασχηματιστή ξηράς, όσο και στη γείωσή του.

Τα σημεία μέτρησης είναι εκείνα της Εικόνας 89 και του Πίνακα 22, ενώ ακόμη μετριοούνται τα ρεύματα στις εισόδους των surge arrester, όπως εκείνοι είναι τοποθετημένοι σύμφωνα με την Εικόνα 92.

Ακολουθούν οι πίνακες (35 – 43) που αφορούν το κεραυνικό πλήγμα στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς:

Πίνακας 35. Αρνητικό κεραυνικό πλήγμα LPL-I, στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.

Αρνητικό Κεραυνικό πλήγμα στη φάση Α του Μ/Σ ξηράς, με προστασία - LPL-I		
Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
2839.4	166.82	-257.99
Είσοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
23116	-1080.9	-968.898
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-8.21E+05	8.21E+05	19285
Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (Α)		
-99304		
Έξοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
9517.3	-5240.7	-4436.8
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
42287	-42287	12594
Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (Α)	Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)	Ρεύμα στο + (Α)
7281	18790	1758
Ρεύμα στο - (Α)		
-1713.6		
Αντιστροφείας πριν το φίλτρο		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
848.67	-1433	1316.7
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-30159	-30159	-25205
Φίλτρο αντιστροφείας		
Ρεύμα πυκνωτή (Α)	Τάση πυκνωτή (V)	Τάση αντίστασης (V)
273.16	11205	501.79
Είσοδος αγωγών καλωδίων		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
1242.7	-1311.5	760
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)

13085	-10982	-9780
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
10682	5235.9	-7479.8
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
0.007	0.007	0.007
<b>Έξοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
1549	-2344.2	1211.5
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
12363	-20360	8838.1
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
10676	5231.3	-7479.8
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
-0.007	-0.007	-0.007
<b>Είσοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
1239.6	228.65	762.75
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
13048	-10965	-9777.6
<b>Έξοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
216.97	-207.9	190.27
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
13148	-17609	9077.1
<b>Ρεύμα γείωσης πλοίου (A)</b>		
0.01		
<b>Surge arrester ξηράς</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
-1.16E+05	940.47	893.44
<b>Φορτίο, Α (A·s)</b>	<b>Φορτίο, Β (A·s)</b>	<b>Φορτίο, Γ (A·s)</b>
27.81	0.361	0.339
<b>W/R, Α</b>	<b>W/R, Β</b>	<b>W/R, Γ</b>
1.368	3.884	3.675
<b>Τάση, Α (V)</b>	<b>Τάση, Β (V)</b>	<b>Τάση, Γ (V)</b>
-68080	34065	33981
<b>Surge arrester πλοίου 5kV</b>		

Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
17.684	8.675	8.292
Φορτίο, Α (Α· s)	Φορτίο, Β (Α· s)	Φορτίο, Γ (Α· s)
0.21	0.216	0.792
W/R, Α	W/R, Β	W/R, Γ
1.29	1.99	591.37
Τάση, Α (V)	Τάση, Β (V)	Τάση, Γ (V)
10673	5231.1	-7482.2

Πίνακας 36. Αρνητικό κεραυνικό πλήγμα LPL-II, στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.

**Αρνητικό Κεραυνικό πλήγμα  
στη φάση Α του Μ/Σ ξηράς, με  
προστασία - LPL-II**

Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
2660.8	-240.13	-264.26
Είσοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
17548	369.54	369.32
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-6.23E+05	6.22E+05	-34285
Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (Α)		
-74442		
Έξοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
74442.2	-4048.7	-3495.3
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
36376	-36376	-12074
Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (Α)	Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)	Ρεύμα στο + (Α)
5410.7	19036	1794.7
Ρεύμα στο - (Α)		
-1654.6		
Αντιστροφείας πριν το φίλτρο		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)

836.68	-1385.7	1276.9
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-29982	-29982	-26231
<b>Φίλτρο αντιστροφεία</b>		
<b>Ρεύμα πυκνωτή (A)</b>	<b>Τάση πυκνωτή (V)</b>	<b>Τάση αντίστασης (V)</b>
272.52	11180	500.62
<b>Είσοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
1193.8	-1286.4	740.88
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
13054	-11293	-9492.4
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
10670	5151.1	-7363.9
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
0.005	0.005	0.005
<b>Έξοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
13032	-11283	-9490
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
1193.5	-1286.3	740.06
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
10660	5131.6	-7360
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
-0.005	-0.005	-0.005
<b>Είσοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
1193.7	-1287.5	742.82
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
13032	-11283	-9490
<b>Έξοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
211.05	-208.69	190.55
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
12837	9114.2	9113.3
<b>Ρεύμα γείωσης πλοίου (A)</b>		
0.01		
<b>Surge arrester ξηράς</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
-87142	-512.16	-447.03



Φορτίο, A (A·s)	Φορτίο, B (A·s)	Φορτίο, Γ (A·s)
20.719	0.357	0.333
W/R, A	W/R, B	W/R, Γ
7.62E+05	3.339	2.995
Τάση, A (V)	Τάση, B (V)	Τάση, Γ (V)
-60515	-33309	-33152
<b>Surge arrester πλοίου 5kV</b>		
Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
17.678	8.51	9.426
Φορτίο, A (A·s)	Φορτίο, B (A·s)	Φορτίο, Γ (A·s)
0.21	0.215	0.793
W/R, A	W/R, B	W/R, Γ
1.282	1.982	591.37
Τάση, A (V)	Τάση, B (V)	Τάση, Γ (V)
10660	5148.9	-7360.5

Πίνακας 37. Αρνητικό κεραυνικό πλήγμα LPL-III, στην είσοδο της φάσης A του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.

**Αρνητικό Κεραυνικό πλήγμα  
στη φάση A του Μ/Σ ξηράς, με  
προστασία - LPL-III**

<b>Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή</b>		
Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
2417.4	-244.74	-271.93
<b>Είσοδος ΜΣ ξηράς</b>		
Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
12121	-236.19	-264.48
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-4.32E+05	4.31E+05	-33213
<b>Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (A)</b>		
-49587		
<b>Έξοδος ΜΣ ξηράς</b>		

<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
5390.3	-3212.6	-3192.3
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
32643	-28677	10403
<b>Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (Α)</b>	<b>Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)</b>	<b>Ρεύμα στο + (Α)</b>
3610.5	19290	1862.4
<b>Ρεύμα στο - (Α)</b>		
-1703		
<b>Αντιστροφέας πριν το φίλτρο</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
821.79	-1358.7	1225
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-30001	-30001	-27781
<b>Φίλτρο αντιστροφέα</b>		
<b>Ρεύμα πυκνωτή (Α)</b>	<b>Τάση πυκνωτή (V)</b>	<b>Τάση αντίστασης (V)</b>
282.56	11445	519.06
<b>Είσοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
1148.3	-1277.8	723.09
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
13059	-11939	-9085.3
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
10874	5227.2	-7367.4
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
0.004	0.003	0.004
<b>Έξοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
1147.8	-1277.5	722.93
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
13037	-11928	-9082.9
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
10863	5241.7	-7365.3
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
-0.004	-0.003	-0.004
<b>Είσοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
1147.5	-1278.1	725.6
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
13037	-11928	-9083.1
<b>Έξοδος ΜΣ πλοίου</b>		

Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
204.94	-209.81	-184.86
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
12363	-18109	-9119.3
<b>Ρεύμα γείωσης πλοίου (Α)</b>		
0.01		
<b>Surge arrester ξηράς</b>		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
-58227	-132.12	-85416
Φορτίο, Α (Α· s)	Φορτίο, Β (Α· s)	Φορτίο, Γ (Α· s)
13.672	0.355	0.33
W/R, Α	W/R, Β	W/R, Γ
3.32E+05	3.242	2.9
Τάση, Α (V)	Τάση, Β (V)	Τάση, Γ (V)
-52947	-31801	-31437
<b>Surge arrester πλοίου 5kV</b>		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
18.015	8.693	9.03
Φορτίο, Α (Α· s)	Φορτίο, Β (Α· s)	Φορτίο, Γ (Α· s)
0.208	0.214	0.793
W/R, Α	W/R, Β	W/R, Γ
1.277	1.98	591.37
Τάση, Α (V)	Τάση, Β (V)	Τάση, Γ (V)
10863	5241.8	-7365.3

Πίνακας 38. Θετικό κεραυνικό πλήγμα LPL-I, στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.

**Θετικό Κεραυνικό πλήγμα στη  
φάση Α του Μ/Σ ξηράς, με  
προστασία - LPL-I**

**Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή**

Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
-1992.1	-923.83	-878.94
Είσοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
868.6	-432.47	-435.55
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
1.56E+05	-1.60E+05	-35797
Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (Α)		
1.89E+05		
Έξοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
2323.5	-2234.7	780.98
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
15580	-24736	-13039
Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (Α)	Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)	Ρεύμα στο + (Α)
1964.7	24755	2578
Ρεύμα στο - (Α)		
-2669.6		
Αντιστροφέας πριν το φίλτρο		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
1379.6	-2384.3	1631.4
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-37077	-33165	-37077
Φίλτρο αντιστροφέα		
Ρεύμα πυκνωτή (Α)	Τάση πυκνωτή (V)	Τάση αντίστασης (V)
382.97	11230	703.52
Είσοδος αγωγών καλωδίων		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
1549.5	-2344.1	1212
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
12359	-20392	8881.9
Τάση φ1-4 (V)	Τάση φ2-5 (V)	Τάση φ3-6 (V)
10982	-9625	-7508.3
μανδύας 4-7 (V)	μανδύας 5-7 (V)	μανδύας 6-7 (V)
-0.02	-0.02	-0.02
Έξοδος αγωγών καλωδίων		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
1549	-2344.2	1211.5
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
12353	-20361	8837.8

Τάση φ1-4 (V)	Τάση φ2-5 (V)	Τάση φ3-6 (V)
11945	-8474	-7498.2
μανδύας 4-7 (V)	μανδύας 5-7 (V)	μανδύας 6-7 (V)
0.02	0.02	0.02
<b>Είσοδος ΜΣ πλοίου</b>		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
1546.5	-2344.3	1211.1
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
12363	-20361	8838
<b>Έξοδος ΜΣ πλοίου</b>		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
190.57	-255.09	-202.58
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
10741	-24276	21319
<b>Ρεύμα γείωσης πλοίου (A)</b>		
0.009		
<b>Surge arrester ξηράς</b>		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
1.99E+05	-667.8	-609.63
Φορτίο, Α (A·s)	Φορτίο, Β (A·s)	Φορτίο, Γ (A·s)
94.8	0.571	0.52
W/R, Α	W/R, Β	W/R, Γ
9.91E+06	112.71	95.62
Τάση, Α (V)	Τάση, Β (V)	Τάση, Γ (V)
42675	-33312	-33222
<b>Surge arrester πλοίου 5kV</b>		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
20.687	-14.053	9.046
Φορτίο, Α (A·s)	Φορτίο, Β (A·s)	Φορτίο, Γ (A·s)
0.201	0.22	0.792
W/R, Α	W/R, Β	W/R, Γ
1.188	2.05	591.37
Τάση, Α (V)	Τάση, Β (V)	Τάση, Γ (V)

11945	-8474	-7504.2
-------	-------	---------

Πίνακας 39. Θετικό κεραυνικό πλήγμα LPL-II, στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.

Θετικό Κεραυνικό πλήγμα στη φάση Α του Μ/Σ ξηράς, με προστασία - LPL-II		
Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
-1849.2	-670.55	-624.41
Είσοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
794.68	-399.76	-396.18
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
1.27E+05	-1.31E+05	-34288
Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (Α)		
1.42E+05		
Έξοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
2103.6	-2060.8	771.05
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
14498	-22846	-12220
Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (Α)	Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)	Ρεύμα στο + (Α)
2512.5	22848	2575.7
Ρεύμα στο - (Α)		
-2625.8		
Αντιστροφέας πριν το φίλτρο		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
1341.4	-2319.2	1560
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-35115	-32316	-35115
Φίλτρο αντιστροφέα		
Ρεύμα πυκνωτή (Α)	Τάση πυκνωτή (V)	Τάση αντίστασης (V)
369.58	10261	678.92
Είσοδος αγωγών καλωδίων		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
1503.7	-2278.1	1186.1
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)

11425	-18783	-8207
<b>Τάση <math>\phi 1-4</math> (V)</b>	<b>Τάση <math>\phi 2-5</math> (V)</b>	<b>Τάση <math>\phi 3-6</math> (V)</b>
10097	-8976.5	-7308.4
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
-0.014	-0.014	-0.014
<b>Έξοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση A (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση B (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
1503.4	-2278.1	1186
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
11439	-18755	8238.8
<b>Τάση <math>\phi 1-4</math> (V)</b>	<b>Τάση <math>\phi 2-5</math> (V)</b>	<b>Τάση <math>\phi 3-6</math> (V)</b>
10877	-8108.1	-7299.5
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
0.014	0.014	0.014
<b>Είσοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση A (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση B (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
1500	-2278.3	1186
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
11437	-18755	8238.6
<b>Έξοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση A (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση B (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
190.68	-246.92	-201.64
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
11097	-22405	19930
<b>Ρεύμα γείωσης πλοίου (A)</b>		
0.009		
<b>Surge arrester ξηράς</b>		
<b>Ρεύμα, φάση A (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση B (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
1.49E+05	-428.53	-373.74
<b>Φορτίο, A (A·s)</b>	<b>Φορτίο, B (A·s)</b>	<b>Φορτίο, Γ (A·s)</b>
70.433	0.469	0.422
<b>W/R, A</b>	<b>W/R, B</b>	<b>W/R, Γ</b>
5.55E+06	40.855	31.157
<b>Τάση, A (V)</b>	<b>Τάση, B (V)</b>	<b>Τάση, Γ (V)</b>
41349	-32878	-32745
<b>Surge arrester πλοίου 5kV</b>		

Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
18.038	-13.446	9.543
Φορτίο, Α (Α· s)	Φορτίο, Β (Α· s)	Φορτίο, Γ (Α· s)
0.202	0.219	0.791
W/R, Α	W/R, Β	W/R, Γ
1.169	2.052	591.37
Τάση, Α (V)	Τάση, Β (V)	Τάση, Γ (V)
10877	-8108.1	-7299.1

Πίνακας 40. Θετικό κεραυνικό πλήγμα LPL-III, στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.

**Θετικό Κεραυνικό πλήγμα στη  
φάση Α του Μ/Σ ξηράς, με  
προστασία - LPL-III**

Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
-1657.9	-430.38	-382.28
Είσοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
678.98	-337.43	-338.32
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
98389	-1.03E+05	-34117
Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (Α)		
94579		
Έξοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
1800	-1765	-760.94
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
13811	-20973	-11783
Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (Α)	Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)	Ρεύμα στο + (Α)
2433.5	20973	2498.8
Ρεύμα στο - (Α)		
-2503.7		
Αντιστροφείας πριν το φίλτρο		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)



1293.1	-2257.1	1475.4
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-32953	-31484	-32953
<b>Φίλτρο αντιστροφεία</b>		
<b>Ρεύμα πυκνωτή (A)</b>	<b>Τάση πυκνωτή (V)</b>	<b>Τάση αντίστασης (V)</b>
320.1	9069	588.01
<b>Είσοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
1457.5	-2192.4	1151.6
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
10311	-16366	-8050.7
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
9076.9	-7891.7	-6534.2
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
-0.009	-0.009	-0.009
<b>Έξοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
1457.2	-2192.5	1151.4
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
10322	-16341	-8050
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
9514.3	-7280.5	-6524.3
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
0.009	0.009	0.009
<b>Είσοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
1455.6	-2193.4	1151.9
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
10322	-16341	-8149.7
<b>Έξοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
189.77	-239.7	-200.47
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
11313	-19556	17506
<b>Ρεύμα γείωσης πλοίου (A)</b>		
0.009		
<b>Surge arrester ξηράς</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
99579	-209.6	-166.1

Φορτίο, A (A·s)	Φορτίο, B (A·s)	Φορτίο, Γ (A·s)
46.185	0.396	0.354
W/R, A	W/R, B	W/R, Γ
2.44E+06	9.847	6.503
Τάση, A (V)	Τάση, B (V)	Τάση, Γ (V)
39912	-32189	-31967
<b>Surge arrester πλοίου 5kV</b>		
Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
15.778	-12.074	9.449
Φορτίο, A (A·s)	Φορτίο, B (A·s)	Φορτίο, Γ (A·s)
0.202	0.218	0.791
W/R, A	W/R, B	W/R, Γ
1.157	2.037	591.37
Τάση, A (V)	Τάση, B (V)	Τάση, Γ (V)
9514.3	-7280.5	-6524.3

Πίνακας 41. Αρνητικό επακόλουθο κεραυνικό πλήγμα LPL-I, στην είσοδο της φάσης A του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.

Επακόλουθο Κεραυνικό πλήγμα στη φάση A του Μ/Σ ξηράς, με προστασία - LPL-I		
<b>Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή</b>		
Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
1554.4	-248.74	-282.98
<b>Είσοδος ΜΣ ξηράς</b>		
Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
35192	-1489.6	-1314.8
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-9.07E+05	9.07E+05	-31817
<b>Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (A)</b>		
-51203		
<b>Έξοδος ΜΣ ξηράς</b>		

<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
16104	-9322.5	-6888.3
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
67537	-67537	13215
<b>Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (Α)</b>	<b>Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)</b>	<b>Ρεύμα στο + (Α)</b>
9283.7	18379	1775.8
<b>Ρεύμα στο - (Α)</b>		
-1922.8		
<b>Αντιστροφέας πριν το φίλτρο</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
809.37	-1432.6	1188.3
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-28458	-27024	-28458
<b>Φίλτρο αντιστροφέα</b>		
<b>Ρεύμα πυκνωτή (Α)</b>	<b>Τάση πυκνωτή (V)</b>	<b>Τάση αντίστασης (V)</b>
281.04	10671	516.27
<b>Είσοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
1140.2	-1380.5	754.11
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
12196	-13793	-7893.1
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
10726	5304.6	-6792.4
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
0.002	0.002	0.002
<b>Έξοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
1139.6	-1380.3	753.09
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
12198	-13782	-8118.8
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
10722	5221.4	-6789.1
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
-0.02	-0.02	-0.02
<b>Είσοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
1138.7	-1381.4	755.09
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
12198	-13782	-7895.6
<b>Έξοδος ΜΣ πλοίου</b>		

Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
198.76	-203.15	190.63
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
11575	-19333	11532
<b>Ρεύμα γείωσης πλοίου (Α)</b>		
0.008		
<b>Surge arrester ξηράς</b>		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
-84360	1347.1	1237.4
Φορτίο, Α (Α· s)	Φορτίο, Β (Α· s)	Φορτίο, Γ (Α· s)
7.1522	0.353	0.331
W/R, Α	W/R, Β	W/R, Γ
1.71E+05	4.3373	3.76
Τάση, Α (V)	Τάση, Β (V)	Τάση, Γ (V)
-70916	34739	34629
<b>Surge arrester πλοίου 5kV</b>		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
17.181	8.67	7.396
Φορτίο, Α (Α· s)	Φορτίο, Β (Α· s)	Φορτίο, Γ (Α· s)
0.21	0.213	0.793
W/R, Α	W/R, Β	W/R, Γ
1.211	1.977	591.37
Τάση, Α (V)	Τάση, Β (V)	Τάση, Γ (V)
10722	5228	3936.2

Πίνακας 42. Αρνητικό επακόλουθο κεραυνικό πλήγμα LPL-II, στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.

**Επακόλουθο Κεραυνικό  
πλήγμα στη φάση Α του Μ/Σ  
ξηράς, με προστασία - LPL-II**

**Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή**

Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
1460	-259.62	-282.23
Είσοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
26242	-579.31	-531.76
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-6.70E+05	6.69E+05	-31719
Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (Α)		
-38360		
Έξοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
2321.4	-7350.4	-6404.4
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
54697	-54697	-10091
Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (Α)	Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)	Ρεύμα στο + (Α)
6618.9	17909	1754.4
Ρεύμα στο - (Α)		
-1895.6		
Αντιστροφέας πριν το φίλτρο		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
813.7	-1435.5	1182.4
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-27847	-26182	-27847
Φίλτρο αντιστροφέα		
Ρεύμα πυκνωτή (Α)	Τάση πυκνωτή (V)	Τάση αντίστασης (V)
269.48	10388	494.58
Είσοδος αγωγών καλωδίων		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
1134.5	-1376.3	760.33
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
11935	-13508	-8105.4
Τάση φ1-4 (V)	Τάση φ2-5 (V)	Τάση φ3-6 (V)
10409	5330.3	-6702.8
μανδύας 4-7 (V)	μανδύας 5-7 (V)	μανδύας 6-7 (V)
0.002	0.002	0.002
Έξοδος αγωγών καλωδίων		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
1134	-1376.1	759.36
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
11937	-13494	-8104.3

Τάση φ1-4 (V)	Τάση φ2-5 (V)	Τάση φ3-6 (V)
10405	5328.6	-5566.2
μανδύας 4-7 (V)	μανδύας 5-7 (V)	μανδύας 6-7 (V)
-0.002	-0.002	-0.002
<b>Είσοδος ΜΣ πλοίου</b>		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
1133.1	-1377.4	761.44
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
11937	-13494	-8104.3
<b>Έξοδος ΜΣ πλοίου</b>		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
197.74	-200.52	190.51
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
11431	-18864	11646
<b>Ρεύμα γείωσης πλοίου (A)</b>		
0.008		
<b>Surge arrester ξηράς</b>		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
-63004	-631.01	-565.12
Φορτίο, Α (A·s)	Φορτίο, Β (A·s)	Φορτίο, Γ (A·s)
5.383	0.352	0.33
W/R, Α	W/R, Β	W/R, Γ
95233	3.328	2.964
Τάση, Α (V)	Τάση, Β (V)	Τάση, Γ (V)
-61834	-33799	-33668
<b>Surge arrester πλοίου 5kV</b>		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
17.256	8.683	9.214
Φορτίο, Α (A·s)	Φορτίο, Β (A·s)	Φορτίο, Γ (A·s)
0.206	0.213	0.793
W/R, Α	W/R, Β	W/R, Γ
1.203	1.977	591.37
Τάση, Α (V)	Τάση, Β (V)	Τάση, Γ (V)

10405	5328.6	-6700.2
-------	--------	---------

Πίνακας 43. Αρνητικό επακόλουθο κεραυνικό πλήγμα LPL-III, στην είσοδο της φάσης Α του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.

Επακόλουθο Κεραυνικό πλήγμα στη φάση Α του Μ/Σ ξηράς, με προστασία - LPL-III		
Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
1332.4	-261.7	-278.39
Είσοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
17749	-252.22	-271.75
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-4.61E+05	4.59E+05	-31570
Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (Α)		
-25537		
Έξοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
9079.4	-4505.1	-4622.1
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
45616	37872	10321
Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (Α)	Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)	Ρεύμα στο + (Α)
4256.1	17143	1732.4
Ρεύμα στο - (Α)		
-1855.8		
Αντιστροφές πριν το φίλτρο		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
818.8	-1442.6	1178.2
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-26932	-25032	-26932
Φίλτρο αντιστροφέα		
Ρεύμα πυκνωτή (Α)	Τάση πυκνωτή (V)	Τάση αντίστασης (V)
250.16	9862.5	459.55
Είσοδος αγωγών καλωδίων		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
1130.5	-1375.5	772.26
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)

11464	-13174	-8082.8
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
9946.4	5315.6	-6599.2
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
0.001	0.001	0.001
<b>Έξοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
1130.2	-1376.4	771.1
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
11466	-13160	-8081.7
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
9943.2	5251.2	-6596.6
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
-0.001	-0.001	-0.001
<b>Έξοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
1129.4	-1377.3	773.4
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
11466	-13160	-8081.8
<b>Έξοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
196.43	-196.99	190.61
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
11197	-18206	11468
<b>Ρεύμα γείωσης πλοίου (A)</b>		
0.008		
<b>Surge arrester ξηράς</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
-42118	-208.09	-158.87
<b>Φορτίο, Α (A·s)</b>	<b>Φορτίο, Β (A·s)</b>	<b>Φορτίο, Γ (A·s)</b>
3.618	0.353	0.329
<b>W/R, Α</b>	<b>W/R, Β</b>	<b>W/R, Γ</b>
41369	3.217	2.862
<b>Τάση, Α (V)</b>	<b>Τάση, Β (V)</b>	<b>Τάση, Γ (V)</b>
-53352	-32418	-32120
<b>Surge arrester πλοίου 5kV</b>		



Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
16.489	8.703	8.099
Φορτίο, Α (Α· s)	Φορτίο, Β (Α· s)	Φορτίο, Γ (Α· s)
0.206	0.213	0.793
W/R, Α	W/R, Β	W/R, Γ
1.191	1.977	591.37
Τάση, Α (V)	Τάση, Β (V)	Τάση, Γ (V)
9943.2	5251.4	-6596.6

Ακολουθούν οι πίνακες (44 – 52) που αφορούν το κεραυνικό πλήγμα στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς:

*Πίνακας 44. Αρνητικό κεραυνικό πλήγμα LPL-I, στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.*

Αρνητικό Κεραυνικό πλήγμα στη γείωση του Μ/Σ ξηράς, με προστασία - LPL-I		
Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
510.8	-278.91	-210.97
Είσοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
335.94	-270.48	-200.59
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
43163	-41500	-31091
Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (Α)		
-99231		
Έξοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
982.01	-814.19	735.39
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
10661	9218	9969.2
Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (Α)	Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)	Ρεύμα στο + (Α)
-1245.1	11313	1676.2
Ρεύμα στο - (Α)		

-1734.1		
<b>Αντιστροφέας πριν το φίλτρο</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
937.53	-1476.7	1192.8
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-22875	-22875	20505
<b>Φίλτρο αντιστροφέα</b>		
<b>Ρεύμα πυκνωτή (Α)</b>	<b>Τάση πυκνωτή (V)</b>	<b>Τάση αντίστασης (V)</b>
-181.41	6901.1	-333.26
<b>Είσοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
1118.4	-1428.6	883.84
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-7451.8	-8716.4	-7877.4
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
6930.6	5675.8	-6215.8
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
0.007	0.007	0.007
<b>Έξοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
1118	-1428.4	884
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-7445.8	-8703.9	7693.4
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
6898.9	5668.6	-6203.8
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
-0.007	-0.007	-0.007
<b>Είσοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
1116.9	-1428.7	884.15
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
7064.5	-8703.9	7501.5
<b>Έξοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
190.22	179.53	-191.2
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
10700	-11779	9033.4
<b>Ρεύμα γείωσης πλοίου (Α)</b>		
-0.008		
<b>Surge arrester ξηράς</b>		

Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
355	118.03	147.97
Φορτίο, Α (Α· s)	Φορτίο, Β (Α· s)	Φορτίο, Γ (Α· s)
0.416	0.366	0.355
W/R, Α	W/R, Β	W/R, Γ
28.449	4.606	5.418
Τάση, Α (V)	Τάση, Β (V)	Τάση, Γ (V)
32696	31643	31857
<b>Surge arrester πλοίου 5kV</b>		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
11.444	9.404	-9.479
Φορτίο, Α (Α· s)	Φορτίο, Β (Α· s)	Φορτίο, Γ (Α· s)
0.205	0.222	0.782
W/R, Α	W/R, Β	W/R, Γ
1.131	3.098	579.08
Τάση, Α (V)	Τάση, Β (V)	Τάση, Γ (V)
6900.6	5670.4	-6206.3

Πίνακας 45. Αρνητικό κεραυνικό πλήγμα LPL-II, στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.

Αρνητικό Κεραυνικό πλήγμα στη γείωση του Μ/Σ ξηράς, με προστασία - LPL-II		
<b>Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή</b>		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
413.7	-279.81	210.32
<b>Είσοδος ΜΣ ξηράς</b>		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
326.84	-271.61	200.52
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
37389	-37011	-31188
<b>Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (Α)</b>		

-74423		
<b>Έξοδος ΜΣ ξηράς</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
959.67	-797.64	736.12
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
10543	-11042	-10028
<b>Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (Α)</b>	<b>Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)</b>	<b>Ρεύμα στο + (Α)</b>
-1232	11049	1669.3
<b>Ρεύμα στο - (Α)</b>		
-1728.1		
<b>Αντιστροφέας πριν το φίλτρο</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
942.72	-1477.9	1192.3
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-22851	-22851	-20768
<b>Φίλτρο αντιστροφέα</b>		
<b>Ρεύμα πυκνωτή (Α)</b>	<b>Τάση πυκνωτή (V)</b>	<b>Τάση αντίστασης (V)</b>
-183.31	6730.9	-337.22
<b>Είσοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
1117.8	-1431	889.63
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-7452.1	-8404.1	-7862.3
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
6761.6	5681.6	-6200.8
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
0.005	0.005	0.005
<b>Έξοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
1117.5	-1430.7	889.57
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-7448.5	-8392.5	-7863.1
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
6739.1	5676.2	-6191.1
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
-0.005	-0.005	-0.005
<b>Είσοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
1116.6	-1431.6	889.5
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>

-7449.1	-8392.5	-7862.5
<b>Έξοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
190.01	179.61	-191.28
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
10679	-11396	9043.9
<b>Ρεύμα γείωσης πλοίου (Α)</b>		
-0.008		
<b>Surge arrester ξηράς</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
240.68	58.638	77.305
<b>Φορτίο, Α (Α· s)</b>	<b>Φορτίο, Β (Α· s)</b>	<b>Φορτίο, Γ (Α· s)</b>
0.378	0.358	0.341
<b>W/R, Α</b>	<b>W/R, Β</b>	<b>W/R, Γ</b>
12.607	3.479	3.423
<b>Τάση, Α (V)</b>	<b>Τάση, Β (V)</b>	<b>Τάση, Γ (V)</b>
32321	30989	31246
<b>Surge arrester πλοίου 5kV</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
11.176	9.413	8.998
<b>Φορτίο, Α (Α· s)</b>	<b>Φορτίο, Β (Α· s)</b>	<b>Φορτίο, Γ (Α· s)</b>
0.205	0.222	0.782
<b>W/R, Α</b>	<b>W/R, Β</b>	<b>W/R, Γ</b>
1.129	3.098	579.08
<b>Τάση, Α (V)</b>	<b>Τάση, Β (V)</b>	<b>Τάση, Γ (V)</b>
6739.1	5676.3	-6191.5

Πίνακας 46. Αρνητικό κεραυνικό πλήγμα LPL-III, στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.

Αρνητικό Κεραυνικό πλήγμα στη γείωση του Μ/Σ ξηράς, με προστασία - LPL-III		
Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
326.1	-280.65	210.32
Είσοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
318.29	-272.41	200.16
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
32144	-30283	-31161
Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (Α)		
-49615		
Έξοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
937.46	-786.12	738.45
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
10444	-10801	-10015
Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (Α)	Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)	Ρεύμα στο + (Α)
-1223.7	10802	1663.8
Ρεύμα στο - (Α)		
-1723.5		
Αντιστροφέας πριν το φίλτρο		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
945.22	-1488.7	1192
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-22829	-22829	-20544
Φίλτρο αντιστροφέα		
Ρεύμα πυκνωτή (Α)	Τάση πυκνωτή (V)	Τάση αντίστασης (V)
-185.86	6566.2	-341.43
Είσοδος αγωγών καλωδίων		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
1117.4	-1433.2	894.9
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-7451.4	-8102.8	-7851
Τάση φ1-4 (V)	Τάση φ2-5 (V)	Τάση φ3-6 (V)
6605.5	5683.5	-6193.7

μανδύας 4-7 (V)	μανδύας 5-7 (V)	μανδύας 6-7 (V)
0.004	0.004	0.004
<b>Έξοδος αγωγών καλωδίων</b>		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
1116.6	-1433	894.64
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-7447.8	-8090.9	-7849
Τάση φ1-4 (V)	Τάση φ2-5 (V)	Τάση φ3-6 (V)
6589.8	5678.1	-6184.5
μανδύας 4-7 (V)	μανδύας 5-7 (V)	μανδύας 6-7 (V)
-0.004	-0.004	-0.004
<b>Είσοδος ΜΣ πλοίου</b>		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
1116.1	-1433.9	894.37
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-7448.3	-8090.9	-7849.9
<b>Έξοδος ΜΣ πλοίου</b>		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
190.01	179.7	-191.35
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
10694	-11045	9043.3
<b>Ρεύμα γείωσης πλοίου (A)</b>		
-0.008		
<b>Surge arrester ξηράς</b>		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
121.78	27.679	32.651
Φορτίο, Α (A·s)	Φορτίο, Β (A·s)	Φορτίο, Γ (A·s)
0.348	0.353	0.334
W/R, Α	W/R, Β	W/R, Γ
4.836	3.259	2.933
Τάση, Α (V)	Τάση, Β (V)	Τάση, Γ (V)
31673	30232	30442
<b>Surge arrester πλοίου 5kV</b>		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
10.928	9.416	8.958

Φορτίο, A (A·s)	Φορτίο, B (A·s)	Φορτίο, Γ (A·s)
0.206	0.222	0.782
W/R, A	W/R, B	W/R, Γ
1.129	3.096	579.08
Τάση, A (V)	Τάση, B (V)	Τάση, Γ (V)
6589.8	5678.1	-6181.3

Πίνακας 47. Θετικό κεραυνικό πλήγμα LPL-I, στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.

Θετικό Κεραυνικό πλήγμα στη γείωση του Μ/Σ ξηράς, με προστασία - LPL-I		
Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή		
Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
438.5	-925.8	-879.97
Είσοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
374.24	-266.46	-211.89
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
53377	-53401	-31362
Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (A)		
1.90E+05		
Έξοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
1059	-934.91	727.15
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
11437	-12765	9871.3
Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (A)	Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)	Ρεύμα στο + (A)
-1218.8	12763	1695
Ρεύμα στο - (A)		
-1753.7		
Αντιστροφείας πριν το φίλτρο		
Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
913.86	-1469.8	1184.7
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-22793	-22793	-22442



Φίλτρο αντιστροφέα		
Ρεύμα πυκνωτή (A)	Τάση πυκνωτή (V)	Τάση αντίστασης (V)
232.77	7711.4	427.59
Είσοδος αγωγών καλωδίων		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
1116.1	-1409.9	852.95
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
8412.6	-10162	-7936.6
Τάση φ1-4 (V)	Τάση φ2-5 (V)	Τάση φ3-6 (V)
7779.8	5598.5	-5072.3
μανδύας 4-7 (V)	μανδύας 5-7 (V)	μανδύας 6-7 (V)
-0.02	-0.02	-0.02
Έξοδος αγωγών καλωδίων		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
1115.7	-1409.9	852.1
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
8416.1	-10142	7693.6
Τάση φ1-4 (V)	Τάση φ2-5 (V)	Τάση φ3-6 (V)
7979.2	5593.2	-6176.6
μανδύας 4-7 (V)	μανδύας 5-7 (V)	μανδύας 6-7 (V)
0.02	0.02	0.02
Είσοδος ΜΣ πλοίου		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
1114.9	-1410.6	852.57
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
8416.3	-10142	7694
Έξοδος ΜΣ πλοίου		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
188.53	179.14	-190.51
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
10260	-13889	9046.5
Ρεύμα γείωσης πλοίου (A)		
-0.008		
Surge arrester ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
-503.91	-865.29	-809.88
Φορτίο, Α (A·s)	Φορτίο, Β (A·s)	Φορτίο, Γ (A·s)
0.49	0.7	0.654

W/R, A	W/R, B	W/R, Γ
56.018	241.22	217.41
Τάση, A (V)	Τάση, B (V)	Τάση, Γ (V)
-33036	-33567	-33502
<b>Surge arrester πλοίου 5kV</b>		
Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
12.232	9.276	9.332
Φορτίο, A (A·s)	Φορτίο, B (A·s)	Φορτίο, Γ (A·s)
0.21	0.22	0.783
W/R, A	W/R, B	W/R, Γ
1.17	3.081	579.08
Τάση, A (V)	Τάση, B (V)	Τάση, Γ (V)
7979.2	5593.3	-6174.7

Πίνακας 48. Θετικό κεραυνικό πλήγμα LPL-II, στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.

Θετικό Κεραυνικό πλήγμα στη γείωση του Μ/Σ ξηράς, με προστασία - LPL-II		
<b>Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή</b>		
Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
376.55	-670.42	-623.06
<b>Είσοδος ΜΣ ξηράς</b>		
Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
358.96	-268.62	-206.71
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
44484	-44508	-31364
<b>Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (A)</b>		
1.42E+05		
<b>Έξοδος ΜΣ ξηράς</b>		
Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
1038.1	-877.11	731.66
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)

11020	-12041	-10149
<b>Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (A)</b>	<b>Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)</b>	<b>Ρεύμα στο + (A)</b>
-1271.5	12041	1691.2
<b>Ρεύμα στο - (A)</b>		
-1744.4		
<b>Αντιστροφείας πριν το φίλτρο</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
932.85	-1474	1192.3
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-22902	-22902	-21691
<b>Φίλτρο αντιστροφείας</b>		
<b>Ρεύμα πυκνωτή (A)</b>	<b>Τάση πυκνωτή (V)</b>	<b>Τάση αντίστασης (V)</b>
197.13	7276.2	362.12
<b>Είσοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
1118.7	-1421.6	869.74
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
7515.9	-9394	7697.2
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
7279.8	5659.1	-6244.4
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
-0.014	-0.014	-0.014
<b>Έξοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
1117.9	-1421.4	868.98
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
7520.3	-9381.1	-7908.5
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
7464.3	5653.8	-6234.3
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
0.014	0.014	0.014
<b>Είσοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
1117.2	-1422	869.27
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
7520.3	-9381.1	-7908.5
<b>Έξοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
187.38	179.35	-190.95
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>

10823	-12654	9046
<b>Ρεύμα γείωσης πλοίου (A)</b>		
-0.008		
<b>Surge arrester ξηράς</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
-289.96	-603.92	-548.25
<b>Φορτίο, Α (A·s)</b>	<b>Φορτίο, Β (A·s)</b>	<b>Φορτίο, Γ (A·s)</b>
0.397	0.563	0.517
<b>W/R, Α</b>	<b>W/R, Β</b>	<b>W/R, Γ</b>
16.277	103.76	87.9
<b>Τάση, Α (V)</b>	<b>Τάση, Β (V)</b>	<b>Τάση, Γ (V)</b>
-32500	-33213	-33118
<b>Surge arrester πλοίου 5kV</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
12.379	9.376	9.034
<b>Φορτίο, Α (A·s)</b>	<b>Φορτίο, Β (A·s)</b>	<b>Φορτίο, Γ (A·s)</b>
0.208	0.22	0.782
<b>W/R, Α</b>	<b>W/R, Β</b>	<b>W/R, Γ</b>
1.158	3.083	579.08
<b>Τάση, Α (V)</b>	<b>Τάση, Β (V)</b>	<b>Τάση, Γ (V)</b>
7464.3	5653.8	-6243.3

Πίνακας 49. Θετικό κεραυνικό πλήγμα LPL-III, στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.

<b>Θετικό Κεραυνικό πλήγμα στη γείωση του Μ/Σ ξηράς, με προστασία - LPL-III</b>		
<b>Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
350.86	-427.38	-377.83
<b>Είσοδος ΜΣ ξηράς</b>		

<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
335.9	-270.76	-201.77
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
38799	-39062	-31279
<b>Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (Α)</b>		
94915		
<b>Έξοδος ΜΣ ξηράς</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
977.6	-817.36	735.49
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
10678	-11326	-10083
<b>Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (Α)</b>	<b>Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)</b>	<b>Ρεύμα στο + (Α)</b>
-1246.4	11324	1679.3
<b>Ρεύμα στο - (Α)</b>		
-1733.3		
<b>Αντιστροφέας πριν το φίλτρο</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
941.73	-1474.8	1194.1
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-22895	-22895	-21060
<b>Φίλτρο αντιστροφέα</b>		
<b>Ρεύμα πυκνωτή (Α)</b>	<b>Τάση πυκνωτή (V)</b>	<b>Τάση αντίστασης (V)</b>
-181.78	6868.2	-333.93
<b>Είσοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
1117.9	-1428.8	883.21
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-7451.1	-8712.8	-7876.9
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
6912.2	5690.7	-6257.1
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
-0.009	-0.009	-0.009
<b>Έξοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
1117.5	-1428.6	884.17
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-7448	-8700.1	-7875.4
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
7034.9	5685.2	-6247.5
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>

0.009	0.009	0.009
<b>Είσοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
1116.7	-1429	884.1
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-7448	-8700.1	-7875.6
<b>Έξοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
190.2	179.58	-191.25
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
10748	-11777	9041.8
<b>Ρεύμα γείωσης πλοίου (Α)</b>		
-0.009		
<b>Surge arrester ξηράς</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
-112.03	-351.87	-299.26
<b>Φορτίο, Α (Α· s)</b>	<b>Φορτίο, Β (Α· s)</b>	<b>Φορτίο, Γ (Α· s)</b>
0.351	0.445	0.403
<b>W/R, Α</b>	<b>W/R, Β</b>	<b>W/R, Γ</b>
4.313	29.289	21.587
<b>Τάση, Α (V)</b>	<b>Τάση, Β (V)</b>	<b>Τάση, Γ (V)</b>
-31594	-32687	-32531
<b>Surge arrester πλοίου 5kV</b>		
<b>Ρεύμα, φάση Α (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Β (Α)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (Α)</b>
11.666	9.428	8.968
<b>Φορτίο, Α (Α· s)</b>	<b>Φορτίο, Β (Α· s)</b>	<b>Φορτίο, Γ (Α· s)</b>
0.207	0.221	0.781
<b>W/R, Α</b>	<b>W/R, Β</b>	<b>W/R, Γ</b>
1.147	3.086	579.08
<b>Τάση, Α (V)</b>	<b>Τάση, Β (V)</b>	<b>Τάση, Γ (V)</b>
7034.9	5685.2	-6247.5

Πίνακας 50. Αρνητικό επακόλουθο κεραυνικό πλήγμα LPL-I, στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.

Επακόλουθο Κεραυνικό πλήγμα στη γείωση του Μ/Σ ξηράς, με προστασία - LPL-I		
Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
324.88	-280.89	210.18
Είσοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
316.05	-272.68	200.35
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
32073	-34264	-31108
Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (Α)		
-49887		
Έξοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
931.28	-778.16	737.92
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
10409	-9919.5	10024
Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (Α)	Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)	Ρεύμα στο + (Α)
-1223.8	10738	1662.3
Ρεύμα στο - (Α)		
-1722.5		
Αντιστροφείας πριν το φίλτρο		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
946.07	-1488	1191.8
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-22823	-22823	20484
Φίλτρο αντιστροφείας		
Ρεύμα πυκνωτή (Α)	Τάση πυκνωτή (V)	Τάση αντίστασης (V)
-186.46	6523.3	-342.53
Είσοδος αγωγών καλωδίων		
Ρεύμα, φάση Α (Α)	Ρεύμα, φάση Β (Α)	Ρεύμα, φάση Γ (Α)
1117.2	-1433.8	896.31
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-7451	-8023.6	-7839.1
Τάση φ1-4 (V)	Τάση φ2-5 (V)	Τάση φ3-6 (V)
6565.6	5685.7	-6184.8

μανδύας 4-7 (V)	μανδύας 5-7 (V)	μανδύας 6-7 (V)
0.002	0.002	0.002
<b>Έξοδος αγωγών καλωδίων</b>		
Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
1116.5	-1433.6	896.02
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-7438	-8011.8	7692.7
Τάση φ1-4 (V)	Τάση φ2-5 (V)	Τάση φ3-6 (V)
6561.8	5680.2	-6181.9
μανδύας 4-7 (V)	μανδύας 5-7 (V)	μανδύας 6-7 (V)
-0.002	-0.002	-0.002
<b>Είσοδος ΜΣ πλοίου</b>		
Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
1115.9	-1434.5	895.7
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-7446.6	-8011.1	-7844.3
<b>Έξοδος ΜΣ πλοίου</b>		
Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
189.98	179.73	-191.37
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
10026	-10945	9041.5
<b>Ρεύμα γείωσης πλοίου (A)</b>		
-0.008		
<b>Surge arrester ξηράς</b>		
Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
90.993	24.197	29.674
Φορτίο, A (A·s)	Φορτίο, B (A·s)	Φορτίο, Γ (A·s)
0.34	0.353	0.333
W/R, A	W/R, B	W/R, Γ
3.712	3.247	2.896
Τάση, A (V)	Τάση, B (V)	Τάση, Γ (V)
31399	30048	30322
<b>Surge arrester πλοίου 5kV</b>		
Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
10.882	9.42	9.253



Φορτίο, A (A·s)	Φορτίο, B (A·s)	Φορτίο, Γ (A·s)
0.205	0.222	0.782
W/R, A	W/R, B	W/R, Γ
1.13	3.095	579.08
Τάση, A (V)	Τάση, B (V)	Τάση, Γ (V)
6561.7	5680.1	-6180.5

Πίνακας 51. Αρνητικό επακόλουθο κεραυνικό πλήγμα LPL-II, στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.

Επακόλουθο Κεραυνικό πλήγμα στη γείωση του Μ/Σ ξηράς, με προστασία - LPL-II		
Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
323.65	-280.83	210.31
Είσοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
314.78	-272.79	200.69
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
32030	-30321	-31146
Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (A)		
-37415		
Έξοδος ΜΣ ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
928.01	-781.24	739.12
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
10392	-10700	10031
Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (A)	Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)	Ρεύμα στο + (A)
-1223.9	10701	1662
Ρεύμα στο - (A)		
-1722.2		
Αντιστροφείας πριν το φίλτρο		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
946.55	-1490.1	1191.7
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-22818	-22818	20843

Φίλτρο αντιστροφεία		
Ρεύμα πυκνωτή (A)	Τάση πυκνωτή (V)	Τάση αντίστασης (V)
-186.79	6498.6	-343.14
Είσοδος αγωγών καλωδίων		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
1117.1	-1434.2	897.12
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-7450.1	-7983.4	7695.6
Τάση φ1-4 (V)	Τάση φ2-5 (V)	Τάση φ3-6 (V)
6542.9	5687	-6188.4
μανδύας 4-7 (V)	μανδύας 5-7 (V)	μανδύας 6-7 (V)
0.002	0.002	0.002
Έξοδος αγωγών καλωδίων		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
1116.4	-1434	896.83
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-7447.9	-7971.7	-7843
Τάση φ1-4 (V)	Τάση φ2-5 (V)	Τάση φ3-6 (V)
6539.5	5681.5	-6177.6
μανδύας 4-7 (V)	μανδύας 5-7 (V)	μανδύας 6-7 (V)
-0.002	-0.002	-0.002
Είσοδος ΜΣ πλοίου		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
1115.8	-1434.9	674.17
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
-7447.6	-7971.6	-7843
Έξοδος ΜΣ πλοίου		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
189.96	179.74	-191.38
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
10700	10124	9042.8
Ρεύμα γείωσης πλοίου (A)		
-0.008		
Surge arrester ξηράς		
Ρεύμα, φάση Α (A)	Ρεύμα, φάση Β (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
54.86	15.228	17.943
Φορτίο, Α (A·s)	Φορτίο, Β (A·s)	Φορτίο, Γ (A·s)
0.336	0.352	0.222

W/R, A	W/R, B	W/R, Γ
3.157	3.233	3.095
Τάση, A (V)	Τάση, B (V)	Τάση, Γ (V)
30927	22918	27005
<b>Surge arrester πλοίου 5kV</b>		
Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
10.845	9.422	9.23
Φορτίο, A (A·s)	Φορτίο, B (A·s)	Φορτίο, Γ (A·s)
0.206	0.222	0.782
W/R, A	W/R, B	W/R, Γ
1.13	3.095	579.08
Τάση, A (V)	Τάση, B (V)	Τάση, Γ (V)
6539.5	5681.5	-6177.6

Πίνακας 52. Αρνητικό επακόλουθο κεραυνικό πλήγμα LPL-III, στη γείωση του μετασχηματιστή ξηράς, σε προστατευόμενη διάταξη, βάσει της δεύτερης περίπτωσης.

Επακόλουθο Κεραυνικό πλήγμα στη γείωση του Μ/Σ ξηράς, με προστασία - LPL-III		
<b>Ρεύμα που γυρνάει στην πηγή</b>		
Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
323.12	-281.1	210.31
<b>Είσοδος ΜΣ ξηράς</b>		
Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
314.2	-272.9	200.68
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)
32005	-30329	-31141
<b>Ρεύμα στη γείωση ΜΣ ξηράς (A)</b>		
-24943		
<b>Έξοδος ΜΣ ξηράς</b>		
Ρεύμα, φάση A (A)	Ρεύμα, φάση B (A)	Ρεύμα, φάση Γ (A)
925.8	-780.56	739.13
Τάση, ΑΓ (V)	Τάση, ΒΑ (V)	Τάση, ΓΒ (V)

10381	-10666	-10004
<b>Ρεύμα στον πυκνωτή του ανορθωτή (A)</b>	<b>Τάση στην έξοδο του ανορθωτή (V)</b>	<b>Ρεύμα στο + (A)</b>
-1224	10682	1661.9
<b>Ρεύμα στο - (A)</b>		
-1722.1		
<b>Αντιστροφέας πριν το φίλτρο</b>		
<b>Ρεύμα, φάση A (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση B (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
946.81	-1490.4	1191.6
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-22816	-22816	20482
<b>Φίλτρο αντιστροφέα</b>		
<b>Ρεύμα πυκνωτή (A)</b>	<b>Τάση πυκνωτή (V)</b>	<b>Τάση αντίστασης (V)</b>
-186.95	6487.6	-343.43
<b>Είσοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση A (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση B (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
1117.1	-1434.4	897.52
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-7441.9	-7965.8	-7842.4
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
6532.7	5687.4	-6185.6
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
0.001	0.001	0.001
<b>Έξοδος αγωγών καλωδίων</b>		
<b>Ρεύμα, φάση A (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση B (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
1116.3	-1434.2	897.25
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-7447.9	-7954	-7841.6
<b>Τάση φ1-4 (V)</b>	<b>Τάση φ2-5 (V)</b>	<b>Τάση φ3-6 (V)</b>
6529.7	5681.9	-6176
<b>μανδύας 4-7 (V)</b>	<b>μανδύας 5-7 (V)</b>	<b>μανδύας 6-7 (V)</b>
-0.001	-0.001	-0.001
<b>Είσοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση A (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση B (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
1115.8	-1435.1	896.92
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>
-7447.9	-7954	-7841.6
<b>Έξοδος ΜΣ πλοίου</b>		
<b>Ρεύμα, φάση A (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση B (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
189.95	179.75	-191.38
<b>Τάση, ΑΓ (V)</b>	<b>Τάση, ΒΑ (V)</b>	<b>Τάση, ΓΒ (V)</b>

10700	-10864	9041.3
<b>Ρεύμα γείωσης πλοίου (A)</b>		
-0.008		
<b>Surge arrester ξηράς</b>		
<b>Ρεύμα, φάση A (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση B (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
27.638	13.536	-13.935
<b>Φορτίο, A (A·s)</b>	<b>Φορτίο, B (A·s)</b>	<b>Φορτίο, Γ (A·s)</b>
0.333	0.351	0.331
<b>W/R, A</b>	<b>W/R, B</b>	<b>W/R, Γ</b>
2.986	3.223	2.857
<b>Τάση, A (V)</b>	<b>Τάση, B (V)</b>	<b>Τάση, Γ (V)</b>
30230	10349	-20973
<b>Surge arrester πλοίου 5kV</b>		
<b>Ρεύμα, φάση A (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση B (A)</b>	<b>Ρεύμα, φάση Γ (A)</b>
10.829	9.423	8.998
<b>Φορτίο, A (A·s)</b>	<b>Φορτίο, B (A·s)</b>	<b>Φορτίο, Γ (A·s)</b>
0.206	0.222	0.782
<b>W/R, A</b>	<b>W/R, B</b>	<b>W/R, Γ</b>
1.13	3.095	579.08
<b>Τάση, A (V)</b>	<b>Τάση, B (V)</b>	<b>Τάση, Γ (V)</b>
6529.7	5681.9	-6177.6

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 7.1 Επισκόπηση διπλωματικής εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, διερευνήθηκε τόσο ο σχεδιασμός όσο και η προστασία μιας εγκατάστασης cold-ironing, υπό το πρίσμα των κεραυνικών πληγμάτων. Αρχικά, μοντελοποιήθηκε, σύμφωνα με το πρότυπο IEC/ISO/IEEE 80005-1-2012 [45], τα επιστημονικά άρθρα [1], [42], [46], [62], το βιβλίο των ηλεκτρονικών ισχύος [51] και τη μελέτη της ABB [43], μία τοπολογία διασύνδεσης πλοίου ξηράς, η οποία περιλάμβανε τοπικό υποσταθμό που τροφοδοτούσε το σύστημα με σταθερή AC τάση στα 20 kV, μετασχηματιστή υποβιβασμού τάσης από τα 20 kV του δικτύου τροφοδοσίας στα 6.6 kV, μετατροπέα συχνότητας, αποτελούμενο από τριφασικό ανορθωτή συνδεδεμένο με τριφασικό αντιστροφέα, καλώδιο μακρού μήκους, μετασχηματιστή ανόρθωσης τάσης από τα 5 kV στα 6.6 kV και τέλος το φορτίο του πλοίου. Το μοντέλο προσομοίωσης, υλοποιήθηκε χρήσει του λογισμικού ATP-EMTP, επιτρέποντας την αναπαράσταση τόσο της μόνιμης λειτουργίας όσο και των μεταβατικών φαινομένων προερχόμενων από κεραυνικό πλήγμα.

Επιπρόσθετα, εξετάστηκαν τα τρία είδη βασικών κεραυνικών πληγμάτων (αρνητικός, θετικός και επακόλουθος αρνητικός κεραυνός) και τρία επίπεδα προστασίας έναντι των κεραυνών (LPL-I, LPL-II, LPL-III), δηλαδή συνολικά κατασκευάστηκαν και προσομοιώθηκαν εννέα πηγές υπερρεύματος. Τα κεραυνικά χτυπήματα εφαρμόστηκαν τόσο στη φάση A του μετασχηματιστή ξηράς, όσο και στη γείωσή του, με το πρώτο να θεωρείται κρισιμότερο και πιο επικίνδυνο. Για κάθε περίπτωση πλήγματος κεραυνού, εξετάστηκαν οι γωνίες στις  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $-90^\circ$ , με σκοπό να εντοπιστεί η γωνία που προκαλεί το δυσμενέστερο σφάλμα, έχοντας ως κριτήριο απόφασης την τάση εισόδου του μετασχηματιστή ξηράς και το ρεύμα εισόδου του φορτίου του πλοίου.

Για το σχεδιασμό και τη μοντελοποίηση των στοιχείων προστασίας, έγινε χρήση του μοντέλου των Pinceti-Giannettoni [67], ενώ τα ονομαστικά στοιχεία λειτουργίας των συσκευών προστασίας έναντι των υπερτάσεων αντλήθηκαν από φυλλάδιο δεδομένων της εταιρείας ABB.

Ακολούθως, αξιολογήθηκαν τρεις εναλλακτικές στρατηγικές διατάξεις αντικεραυνικής προστασίας, οι οποίες αφορούσαν τα εξής σενάρια:

- Τοποθέτηση τριών surge arrester' στις εισόδους των μετασχηματιστών ξηράς και πλοίου, αλλά και στην έξοδο του μετασχηματιστή του πλοίου.
- Τοποθέτηση δύο surge arrester' στις εισόδους των μετασχηματιστών ξηράς και πλοίου.
- Τοποθέτηση ενός surge arrester' στην είσοδο του μετασχηματιστή ξηράς.

Τα κεραυνικά χτυπήματα, για την εξακρίβωση της καλύτερης διάταξης προστασίας, εφαρμόστηκαν τόσο στην είσοδο του μετασχηματιστή ξηράς όσο και στη γείωσή του, ενώ πραγματοποιήθηκε η καταγραφή των μέγιστων τιμών ρεύματος και τάσης στα κρίσιμα σημεία της διάταξης.

Μετά την κατάληξη στην πιο βέλτιστη επιλογή διάταξης προστασίας, λαμβάνοντας υπόψιν τόσο το τεχνικό όφελος, αλλά και το πλήθος των χρησιμοποιούμενων συσκευών προστασίας χάριν του οικονομικού οφέλους, πραγματοποιήθηκε και μελέτη διαμοιρασμού ρεύματος στους surge arrester, ανάλογα το είδος κεραυνού, για LPL-I, με σκοπό τη σύγκριση αποδοτικότητας του στοιχείου προστασίας ανάλογα με το είδος του κεραυνού.

## 7.2 Σύνοψη συμπερασμάτων

Με βάση την έρευνα που διεξήχθη από την παρούσα διπλωματική εργασία, αξίζουν τα σημειωθούν τα εξής πεδία:

- Σε μία τοπολογία cold-ironing, η οποία δεν έχει δεχτεί προστασία έναντι των κεραυνών και των εν γένει υπερτάσεων, ο θετικός κεραυνός, λόγω του πλάτους του ρεύματος που παράγει, συνιστά το δυσμενέστερο σενάριο κεραυνικού πλήγματος στην είσοδο του μετασχηματιστή ξηράς, αφού δημιούργησε τα μεγαλύτερα υπερρεύματα κι υπερτάσεις στους μελετώμενους κόμβους του κυκλώματος.
- Παρουσιάζεται ότι η γωνία πλήγματος  $90^\circ$  ως προς τη φασική τάση της γραμμής μεταφοράς που έχει πληγεί από κεραυνό, μεγιστοποιεί τα υπερρεύματα και τις υπερτάσεις για την πλειοψηφία των κεραυνών, οπότε και λήφθηκε ως σενάριο σχεδιασμού.
- Η απουσία της προστασίας στην τοπολογία σύνδεσης cold-ironing, είχε ως απότοκο τη δημιουργία τάσεων της τάξης των MV σε ορισμένα σημεία της, και ρεύματα των

δεκάδων kA, προκαλώντας ενδεχόμενη διάσπαση της μόνωσης του καλωδίου σύνδεσης και βλάβη των ηλεκτρονικών ισχύος του μετατροπέα ισχύος.

- Οι αγωγοί σύνδεσης των καλωδίων, στην τοπολογία χωρίς προστασία, εμφάνισαν διαφορά δυναμικού μεταξύ φάσης και μανδύα έως και  $10^8 V$ , θέτοντας σε κίνδυνο τη μόνωσή τους. Αντίθετα, οι πολικές τάσεις μανδύα με μανδύα του καλωδίου παρέμειναν χαμηλές και συγκεκριμένα στην τάξη των mV.
- Όσον αφορά την καλύτερη διάταξη προστασίας έναντι των υπερτάσεων, η τοπολογία με τους τρεις surge arrester, πέτυχε τη μεγαλύτερη ύφεση στις υπερτάσεις και τα υπερρεύματα προερχόμενα από κεραυνό. Σε παραπλήσιο ποσοστό επιτυχίας, αλλά ελάχιστα μικρότερο, ακολούθησε η διάταξη προστασίας με τους δύο surge arrester, η οποία επιλέχθηκε ως η βέλτιστη, λόγω των εξίσου καλών αποτελεσμάτων της αλλά και του μικρότερου κόστους εγκατάστασης, ενώ η διάταξη με τον έναν arrester, παρείχε τη μικρότερη προστασία, η οποία υπολειπόταν σημαντικά σε συγκεκριμένα σημεία της διάταξης.
- Έπειτα από την επιλογή της βέλτιστης διάταξης προστασίας, πραγματοποιήθηκε μελέτη διαμοιρασμού των ρευμάτων που εισέρχονται και εξέρχονται στους arrester της τοπολογίας. Αυτό το οποίο αποδείχθηκε, είναι ότι η ροή ρεύματος εξαρτάται ισχυρά από το είδος του κεραυνικού πλήγματος· ο επακόλουθος αρνητικός κεραυνός, παρότι είχε το χαμηλότερο ρεύμα συγκριτικά με τους υπόλοιπους κεραυνούς, οδηγούσε σε μεγαλύτερο ρεύμα στον arrester.
- Συνεπώς, στον σχεδιασμό προστασίας έναντι των κεραυνών και των υπερτάσεων, δεν αρκεί να λαμβάνονται μόνο υπόψιν οι μέγιστες τιμές ρευμάτων των κεραυνικών πηγών και των αποτελεσμάτων χωρίς προστασία, αλλά και ο τρόπος που διαμοιράζεται το ρεύμα εντός των στοιχείων προστασίας, διότι μείζονα ρόλο διαδραμάτισε στη μελέτη αυτή και το είδος του κεραυνού.



### 7.3 Ιδέες για μελλοντική έρευνα

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, δόθηκε έμφαση στη θεωρητική μοντελοποίηση και στη βασισμένη σε προσομοιώσεις αξιολόγηση της αντικεραυνικής προστασίας, σε συστήματα cold-ironing. Ωστόσο, οι παραδοχές που υιοθετήθηκαν, οι περιορισμοί οι οποίοι τέθηκαν ως προς τον χρόνο και τους διαθέσιμους πόρους, καθώς και η αναπόφευκτη απλοποίηση ορισμένων επιμέρους υποσυστημάτων, αφήνουν σημαντικά περιθώρια επέκτασης της μελέτης.

Στην ενότητα αυτή, σκιαγραφούνται οι πλέον υποσχόμενες κατευθύνσεις, από πειραματικές δοκιμές επιβεβαίωσης σε πραγματικές λιμενικές εγκαταστάσεις, μέχρι διευρυμένες προσομοιώσεις πολλαπλών πλοίων, αλλά και ολοκληρωμένη ανάλυση κόστους και αποτελεσματικότητας των προτεινόμενων διατάξεων προστασίας.

Ειδικότερα:

- Η μελέτη αυτή, θα μπορούσε να συνοδευτεί μελλοντικά και από πειραματική επαλήθευση, μέσω υλοποίησης δοκιμών σε λιμενικές εγκαταστάσεις, οι οποίες αποσκοπούν στην πιστοποίηση των προσομοιωτικών αποτελεσμάτων.
- Ακολούθως, χρήσιμη θα ήταν η βελτιστοποίηση των στοιχείων προστασίας, εξετάζοντας εναλλακτικές τεχνολογίας, αλλά και ο υπολογισμός της καταπόνησης ενός τέτοιου συστήματος.
- Ακόμη, θα μπορούσαν να ενσωματωθούν σενάρια πολλαπλών πλοίων, δηλαδή να επεκταθεί το μοντέλο σε ταυτόχρονη διασύνδεση με πολλά πλοία, διερευνώντας τις αλληλεπιδράσεις κεραυνικών ρευμάτων και τις απαιτήσεις διαστασιολόγησης των στοιχείων προστασίας.
- Τέλος, επειδή υψίστης σημασίας είναι η ασφάλεια και ο έλεγχος μιας τέτοιας εγκατάστασης, ωφέλιμη θα ήταν και η μελέτη ενσωμάτωσης συστήματος παρακολούθησης των τάσεων και του ρεύματος των στοιχείων προστασίας, με στόχο την αξιολόγηση κινδύνων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] D. Paul, K. Peterson, P. R. Chavdarian, "Designing cold ironing power systems," *IEEE Industry Applications Magazine*, p. 9, 2014.
- [2] S. Virgili, Um. Rizza, M. Tommasi, S. di Nisio, G. Passerini, "Air pollution from cruise ships during hotteling in ports: a case study in Ancona harbour, Italy," *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2024.
- [3] "Environmental Protection Agency," [Online]. Available: <https://www.epa.gov/acidrain/what-acid-rain>.
- [4] "New York State - Department of Health," [Online]. Available: [https://www.health.ny.gov/environmental/indoors/air/pmq\\_a.htm](https://www.health.ny.gov/environmental/indoors/air/pmq_a.htm). [Accessed June 2025].
- [5] "Air Polution & Marine Shipping," Clear Seas, [Online]. Available: <https://clearseas.org/air-pollution/>. [Accessed February 2025].
- [6] "International Maritime Organization," The Maritime Environment Protection, 10 October 2008. [Online]. Available: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/176%2858%29.pdf>. [Accessed 2025].
- [7] "International Maritime Organisation," [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-%28NOx%29-%E2%80%93-Regulation-13.aspx>.
- [8] "International Maritime Organisation," [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Sulphur-oxides-%28SOx%29-%E2%80%93-Regulation-14.aspx>.
- [9] "DIRECTIVE 2005/33/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of July 2005 amending Directive 1999/32/EC," *Official Journal of the European Union*, 2005.
- [10] G. Papoutsoglou, "A Cold Ironing Study on Modern Ports, Implementation and Benefits Thriving for Worldwide Ports," NTUA, Athens, 2012.
- [11] V. Karakatsanis, "Implementation of Cold Ironing in Modern Ports," NTUA, Athens, 2021.
- [12] "European Commision," [Online]. Available: <https://trimis.ec.europa.eu/project/electrification-eastern-mediterranean-area-use-cold-ironing-and-electricity-propulsion?>. [Accessed April 2025].
- [13] "Protasis," European Union, [Online]. Available: <https://protasis.energy/en/projects/eu-projects/ealing?>. [Accessed March 2025].

- [14] R. Garcia, "EALING," EALING Local Workshop - Port of Valencia, 5 June 2023. [Online]. Available: [https://ealingproject.eu/wp-content/uploads/2023/06/EALING\\_Valencia-Local-Workshop\\_FINAL050623.pdf?](https://ealingproject.eu/wp-content/uploads/2023/06/EALING_Valencia-Local-Workshop_FINAL050623.pdf?)
- [15] H.K. Høidalen, L.Prikler, F.Peñaloza, ATPDraw version 7.6 for Windows, user's manual, NTNU, 2024.
- [16] M. Michalik, "Simulation and Analysis of Power Systems," Wroclaw, 2008.
- [17] H. W. Dommel, "Electro-Magnetic transients program (EMTP) Theory Book," Bonneville Administration (B.P.A.), 1986.
- [18] "International Maritime Organisation," [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/About/HistoryOfIMO?>
- [19] "International Maritime Organisation," [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/Convention-on-the-International-Maritime-Organization.aspx>.
- [20] "International Maritime Organization," [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/ConferencesMeetings/pages/Marpol.aspx?>
- [21] "International Maritime Organisation," [Online]. Available: [https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx).
- [22] "International Maritime Organisation," 02 April 2025. [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/Pages/WhatsNew-2241.aspx>.
- [23] "International Maritime Organisation," [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/ourwork/msas/pages/portstatecontrol.aspx>.
- [24] "International Maritime Organisation," [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/ourwork/msas/pages/surveysandcertification.aspx>.
- [25] United Nations, "Convention on the Law of the Sea," United Nations, 1994.
- [26] "International Maritime Organisation," [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/ourwork/msas/pages/portstatecontrol.aspx?>
- [27] MARPOL, "AMENDMENTS TO THE ANNEX OF THE PROTOCOL OF 1997 TO AMEND THE INTERNATIONAL CONVENTION FOR THE PREVENTION OF POLLUTION FROM SHIPS, 1973, AS MODIFIED BY THE PROTOCOL OF 1978 RELATING THERETO," in *RESOLUTION MEPC.176(58)*, 2008.
- [28] "International Maritime Organisation," [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Historic%20Background%20GHG.aspx?>

- [29] "International Maritime Organisation," [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Improving%20the%20energy%20efficiency%20of%20ships.aspx?>.
- [30] "REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS," in *MARITIME ENVIRONMENT PROTECTION COMMITTEE, 73rd session*, 2018.
- [31] "International Maritime Organization," Maritime Safety Committee, May - June 2023. [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-107th-session.aspx?>.
- [32] "International Maritime Organization," [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/default.aspx?>.
- [33] "United Nations," [Online]. Available: [https://www.un.org/depts/los/convention\\_agreements/texts/unclos/part12.htm?](https://www.un.org/depts/los/convention_agreements/texts/unclos/part12.htm?).
- [34] "DIRECTIVE 2005/33/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 6 July 2005 amending Directive 1999/32/EC," *Official Journal of the European Union*, p. 11, 2005.
- [35] "EUR-Lex," European Union, [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?print=true&uri=celex%3A32012L0033>. [Accessed June 2025].
- [36] "Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council of 22 October 2014 on the deployment of alternative fuels infrastructure," *Official Journal of the European Union*, 2014.
- [37] "REGULATION (EU) 2015/757 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of April 2015 on the monitoring, reporting and verification of carbon dioxide emissions from maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC," *Official Journal of the European Union*, p. 23, 2015.
- [38] "EUR-Lex," European Union, 19 11 2021. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=legisum%3A4332554>. [Accessed February 2025].
- [39] Y. Khersonsky, N. Hingorani, Kevin L. Peterson, "IEEE Electric Ship Technologies initiative," in *Industry Applications Society 56th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference*, Anaheim, 2009.
- [40] "Tratos," [Online]. Available: <https://tratosgroup.com/products/standards/iec/iec-ieee-80005/?>.
- [41] "IEEE Standards Association," IEEE, [Online]. Available: <https://standards.ieee.org/ieee/80005-2/5349/?>.
- [42] D. Paul, K. Peterson, P. R. Chavdarian, "Cold Ironing Power System Design and Electrical Safety," p. 9.
- [43] P. Ericsson, I. Fazlagic, "A feasibility study and a technical solution for an on-shore electrical infrastructure to supply vessels with electric power while in port," ABB and Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2008.

- [44] N.N. Abu Bakar, N. Bazmohammadi, J.C. Vasquez, "Electrification of onshore power systems in maritime transportation towards decarbonization of ports: A review of the cold ironing technology," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 178, p. 16, 2023.
- [45] IEC/ISO/IEEE, "IEC/ISO/IEEE 80005-1: Cold Ironing - Part 1: High Voltage Shore Connection (HVSC) Systems - General requirements," Geneva, 2012.
- [46] D. Paul, K. Peterson, P.R. Chavdarian, "Cold Ironing Power System Design And Electrical Safety," p. 9.
- [47] IEEE, "IEEE 80-2000: Guide for Safety in AC Substation Grounding," IEEE, Piscataway, New Jersey, 2000.
- [48] J. C. Das, Transients in Electrical Systems - Analysis, Recognition and Mitigation, Mc Graw Hill, 2010.
- [49] P. S. F. Sibarani, "ABB's Power Quality Solution," ABB, Surabaya, 2018.
- [50] X.Yang, G.Bai, R.Schmidhalter, "Shore to Ship Converter System for Energy Saving and Emission Reduction," *ABB (Chine) Limited, ABB Switzerland Limited*, p. 6, 2011.
- [51] Mohan, Undeland, Robbins, "Power Electronics: converters, applications and design, Second edition," WILEY, p. 832.
- [52] B. Horizonte, "Damping techniques for grid-connected voltage source converters based on LCL filter: An overview," MG, Brazil.
- [53] Α. Παπανδριανός, "Σχεδίαση μονοφασικού αντιστροφέα DC/AC για χρήση του στο τεστ αντηνισιδοποίησης σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο UL1741," Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- [54] Δ. Λαμπρίδης, Π. Ντοκόπουλος, Μεταβατικά φαινόμενα στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, ZHTH.
- [55] R.Smolenski, G.Benysek, M.Malinowski, M.Sedlak, S. Stynski, M.Jasinski, "Ship-to-Shore vs. Shore-to-Ship Synchronization Strategy".
- [56] M.Sedlak, S.Stynski, M.Malinowski, M.Jasinski, G.Benysek, R.Smolenski, "Stress free shore to ship(S2SP) electrical power networks synchronization," in *10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPEPOWEERENG)*, 2016.
- [57] Ζ.Παραπάνης, "Διερεύνηση της αντικεραυνικής προστασίας σε διάταξη ηλεκτρικής διασύνδεσης ακτής-πλοίου," Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 2021.
- [58] "Wikipedia," [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Lightning>. [Accessed January 2025].
- [59] R. Gunn, "Electric Field Intensity Inside of Natural Clouds," *Journal of Applied Physics*, May 1948.
- [60] Μ. Θράβαλος, "METEO," [Online]. Available: [https://www.meteo.gr/article\\_view.cfm?entryID=212](https://www.meteo.gr/article_view.cfm?entryID=212).

- [61] I. K. Κριμιτζάς, "Διπλωματική εργασία: Μέθοδοι γείωσης και αντικεραυνικής προστασίας σε πλοία," ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούλιος 2013.
- [62] D.Paul, Vahik Haddadian, "Transient overvoltage protection of shore-to-ship power supply system," p. 8, 2010.
- [63] W.G C4.407, T.B. 549: Lightning Parameters For Engineering Applications, CIGRE, 2013, p. 118.
- [64] WG C4.23, T.B. 839: Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines - New Aspects, CIGRE, 2021, p. 111.
- [65] A.Smorgonskii, M.Rubinstein, F.Rachidi, "Extreme Values of Lightning Parameters," in *International Lightning Detection Conference (ILDC)* , Florida, USA, 2018.
- [66] International Electrotechnical Committee, "IEC 62305-1: Protection against lightning - Part 1: General principles," IEC, Geneva, 2010.
- [67] P. Pinceti, M. Giannettoni, "A simplified model for zinc oxide surge arresters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 2, pp. 393-398, 1999.
- [68] W.G. 3.4.11, "Modeling of metal oxide surge arresters," in *Surge Protective Devices Committee*, IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, pp. 301-309.
- [69] "Power and Cables," 10 2017. [Online]. Available: <https://www.powerandcables.com/wp-content/uploads/2017/10/ABB-MWD-MV-HV-Surge-Arrester-Line-Discharge-Class-2-AC-Systems-52kV-Indoor.pdf>. [Accessed 2025].
- [70] Fast Front Transients Task Force, "Modeling Guidelines for Fast Front Transients," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 1, 1996.