



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μελέτη Προστασίας Αποστάσεως Γραμμής Μεταφοράς με
Μοντέλο Μέσου Μήκους σε Περιβάλλον Simulink και Mathcad**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Γ. Μάμαλης

Επιβλέπων : Γεώργιος Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Μελέτη Προστασίας Αποστάσεως Γραμμής Μεταφοράς με Μοντέλο Μέσου Μήκους σε Περιβάλλον Simulink και Mathcad

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Γ. Μάμαλης

Επιβλέπων : Γεώργιος Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 10η Οκτωβρίου 2024.

.....
Γεώργιος Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Βασίλειος Νικολαΐδης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Άρης Δημέας
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2024

.....

Ιωάννης Μάμαλης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

© 2024 – Ιωάννης Μάμαλης, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια απόκτησης του διπλώματος Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Η/Υ. Η εκπόνησή της ξεκίνησε το Φεβρουάριο του 2024 και ολοκληρώθηκε τον Οκτώβριο του 2024. Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη προστασίας αποστάσεως γραμμής μεταφοράς με μοντέλο μεσαίου μήκους σε περιβάλλον Simulink και Mathcad.

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο αναλύονται και εξηγούνται οι διάφοροι τύποι ηλεκτρονόμων αποστάσεως, οι μαθηματικές σχέσεις που τους ορίζουν και οι χαρακτηριστικές λειτουργίες τους στο μιγαδικό επίπεδο R-X.

Έπειτα, στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι απαιτούμενοι υπολογισμοί για τη μετατροπή ενός δικτύου δύο ζυγών, με μια τριφασική γεννήτρια και ένα τριφασικό φορτίο σε κάθε ζυγό, σε ένα απλούστερο και πιο εύχρηστο σύστημα για τους διάφορους υπολογισμούς. Κατ' αυτόν τον τρόπο, γίνεται εφικτή η εύρεση των ακολουθιακών μεγεθών.

Στη συνέχεια, στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι συνδεσμολογίες των τριών κυκλωμάτων ακολουθίας για τα διάφορα είδη σφαλμάτων (μονοφασικό, διφασικό, τριφασικό) με βάση το μοντέλο π μεσαίου μήκους. Έπειτα, παρατίθεται αναλυτική μελέτη υπολογισμού των σύνθετων αντιστάσεων στη θέση του ηλεκτρονόμου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, χρησιμοποιώντας το προγραμματιστικό εργαλείο Simulink, δημιουργείται ένα τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας δύο ζυγών, προσομοιώνονται όλα τα πιθανά είδη βραχυκυκλωμάτων στη γραμμή του και ταυτόχρονα παρακολουθείται η λειτουργία των ηλεκτρονόμων προστασίας που χρησιμοποιούνται για την προστασία του.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται πρώτα ο τρόπος ορισμού των απαιτούμενων παραμέτρων στα διάφορα πεδία του εκτελέσιμου αρχείου που δημιουργήθηκε στο τέταρτο κεφάλαιο. Στη συνέχεια, αναδεικνύεται η διαδικασία επιλογής του είδους του σφάλματος που θα επηρεάσει τη γραμμή μεταφοράς καθώς και η διαδικασία εποπτείας των τάσεων, των ρευμάτων και της ισχύος που επικρατούν στα διάφορα τμήματα του ηλεκτρικού δικτύου.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η σύγκριση των προγραμματιστικών εργαλείων Simulink και Mathcad ως προς τις σύνθετες αντιστάσεις που υπολογίζουν για βραχυκυκλώματα σε διάφορα σημεία της γραμμής, που δίνονται ως ποσοστά $m(\%)$ του συνολικού της μήκους.

Λέξεις κλειδιά: Προστασία αποστάσεως, βραχυκύκλωμα, μοντέλο αναπαράστασης γραμμής μεσαίου μήκους, υπολογισμός ακολουθιακών μεγεθών, Simulink, Mathcad.

Abstract

This diploma thesis was conducted as part of obtaining the degree of Electrical and Computer Engineer. The preparation of the thesis began in February 2024 and was completed in October 2024. The subject of the thesis is the study of distance protection of a medium-length transmission line model in Simulink and Mathcad environment.

Initially, the first chapter analyzes and explains the various types of distance relays, the mathematical equations that define them and their operating characteristics in the R-X complex plane.

Subsequently, the second chapter presents the necessary calculations for converting a two-bus network, with a three-phase generator and a three-phase load on each bus, into a simpler and more convenient form for calculations. This approach will facilitate the computation of the sequence components.

The third chapter presents the connections of the three sequence circuits for the various types of faults (single-phase, two-phase, three-phase) based on the medium-length pi transmission line model. An analytical study is then provided for the calculation of the complex impedances at the relay location.

In the fourth chapter, using the Simulink programming tool, a local two-bus power network is created, all possible types of short circuits in the line are simulated, and at the same time, the operation of the protective relays used to protect the network is monitored.

In the fifth chapter, the method of defining the required parameters in the various fields of the executable file created in the third chapter is first presented. Subsequently, the process of selecting the type of fault that will affect the power transmission line is demonstrated, as well as the process of monitoring the voltages, currents, and power flowing through all stages of the electrical network.

Finally, in the sixth chapter, a comparison is made between the Simulink and Mathcad programming tools regarding the complex impedances they calculate for short circuits at various points along the line, which are given as percentages $m(\%)$ of its total length.

Keywords: Distance protection, short-circuit, medium-length transmission line model, sequence components computation, Simulink, Mathcad.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Κορρέ για τη δυνατότητα που μου προσέφερε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και χρήσιμο θέμα, όπως αυτό της προστασίας αποστάσεως γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η συμβολή του ήταν ουσιαστική, ενώ ήταν πάντα διαθέσιμος να προσφέρει απλόχερα τις γνώσεις του.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τον πατέρα μου Γεώργιο Ι. Μάμαλη για την συχνή επικοινωνία μας και τις συμβουλές του που πηγάζουν από την πολυετή εμπειρία του ως πολιτικός μηχανικός.

Οι γνώσεις που απέκτησα κατά την διάρκεια της συγγραφής της διπλωματικής μου εργασίας θα αποτελέσουν πολύτιμα εφόδια για την μετέπειτα επαγγελματική μου σταδιοδρομία.

Πίνακας Περιεχομένων	
ΠΡΩΤΟ ΜΕΡΟΣ: Θεωρητικό Υπόβαθρο	
1^ο Κεφάλαιο: Θεωρία προστασίας αποστάσεως	11
1.1 Γενικά	11
1.2 Τύποι ηλεκτρονόμων αποστάσεως	11
1.2.1 Ηλεκτρονόμος σύνθετης αντίστασης	13
1.2.2 Ηλεκτρονόμος κατεύθυνσης	15
1.2.3 Ηλεκτρονόμος επαγωγικής αντιστάσεως	17
1.2.4 Ηλεκτρονόμος τύπου mho	19
1.2.5 Πλήρως πολωμένος ηλεκτρονόμος τύπου mho	21
1.2.6 Ηλεκτρονόμοι με χαρακτηριστικές φακού	22
1.2.7 Ηλεκτρονόμοι με πολυγωνικές χαρακτηριστικές	22
1.2.8 Ηλεκτρονόμοι με συνδυασμένες χαρακτηριστικές	23
2^ο Κεφάλαιο: Υπολογισμός μεγεθών ακολουθίας στο μοντέλο μεσαίου μήκους γραμμής μεταφοράς	24
2.1 Αρχικό δίκτυο	24
2.2 Υπολογισμός των παραμέτρων του κυκλώματος θετικής ακολουθίας	25
2.2.1 Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin αριστερά του σημείου σφάλματος	25
2.2.2 Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin δεξιά του σημείου σφάλματος	27
2.2.3 Τελική μορφή κυκλώματος θετικής ακολουθίας	27
2.3 Υπολογισμός των παραμέτρων του κυκλώματος αρνητικής ακολουθίας	28
2.3.1 Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin αριστερά του σημείου σφάλματος	28
2.3.2 Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin δεξιά του σημείου σφάλματος	28
2.3.3 Τελική μορφή κυκλώματος αρνητικής ακολουθίας	28
2.4 Υπολογισμός των παραμέτρων του κυκλώματος μηδενικής ακολουθίας	29
2.4.1 Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin αριστερά του σημείου σφάλματος	29
2.4.2 Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin δεξιά του σημείου σφάλματος	29
2.4.3 Τελική μορφή κυκλώματος μηδενικής ακολουθίας	30
3^ο Κεφάλαιο: Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας και υπολογισμός σύνθετης αντίστασης του ηλεκτρονόμου σε μοντέλο μεσαίου μήκους γραμμής μεταφοράς	31
3.1 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα	31
3.2 Διφασικό βραχυκύκλωμα	32
3.2.1 Διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη με αντίσταση σφάλματος R_F	32
3.2.2 Διφασικό βραχυκύκλωμα προς γη με αντίσταση σφάλματος R_F	33
3.3 Τριφασικό βραχυκύκλωμα	34
3.4 Υπολογισμός σύνθετης αντίστασης Z του ηλεκτρονόμου	35
3.4.1 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα – απαιτούμενοι υπολογισμοί	35
3.4.2 Διφασικό βραχυκύκλωμα– απαιτούμενοι υπολογισμοί	36
3.4.2.1 Διφασικό Βραχυκύκλωμα χωρίς γη με αντίσταση σφάλματος R_F	36

3.4.2.2 Διφασικό βραχυκύκλωμα προς γη με αντίσταση σφάλματος R_F	36
3.4.3 Τριφασικό βραχυκύκλωμα– απαιτούμενοι υπολογισμοί	37
3.4.4 Τελικές τιμές σύνθετων αντιστάσεων	39
<u>ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΕΡΟΣ: Προσομοίωση βραχυκυκλωμάτων όλων των ειδών στο προγραμματιστικό περιβάλλον Simulink</u>	41
4^ο Κεφάλαιο: Υλοποίηση εκτελέσιμου αρχείου στο Simulink	41
4.1 Εισαγωγή	41
4.2 Solver	41
4.3 Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	42
4.4 Τριφασικές πηγές τάσης	43
4.5 Τριφασικά φορτία	44
4.6 Ζυγοί	45
4.7 Σφάλμα	46
4.8 Ηλεκτρονόμοι τύπου Mho στους ζυγούς B1 και B2	58
4.8.1 Κύρια blocks ηλεκτρονόμων	58
4.8.2 Δημιουργία κύκλων ΜΗΟ για τις ζώνες 1 και 2	63
4.8.3 Υπολογισμός μιγαδικών τάσεων και ρευμάτων σε μορφή $a_n + jb_n$	75
4.8.4 Υπολογισμός της σύνθετης αντίστασης Z που βλέπουν οι ηλεκτρονόμοι από τους ζυγούς B1 και B2	102
4.8.5 Ανίχνευση σφάλματος	124
4.8.6 Μονάδα ενεργοποίησης διακοπτικών στοιχείων	132
4.9 Διακόπτες κυκλώματος	145
4.10 Συλλογή δεδομένων	152
4.11 Προσομοίωση βραχυκυκλωμάτων	163
5^ο Κεφάλαιο: Εγχειρίδιο χρήσης εκτελέσιμου αρχείου	182
5.1 Εισαγωγή	182
5.2 Ορισμός απαιτούμενων παραμέτρων	182
5.3 Επιλογή είδους σφάλματος στις τριφασικές γραμμές Line 1 ή Line 2	189
5.4 Εποπτεία τάσεων, ρευμάτων και ισχύος σε όλα τα στάδια του ηλεκτρικού δικτύου	191
6^ο Κεφάλαιο: Σύγκριση αποτελεσμάτων Mathcad και Simulink	197
6.1 Εισαγωγή	197
6.2 Βραχυκύκλωμα στο 10% του μήκους της γραμμής μεταφοράς	197
6.3 Βραχυκύκλωμα στο 20% του μήκους της γραμμής μεταφοράς	199
6.4 Βραχυκύκλωμα στο 30% του μήκους της γραμμής μεταφοράς	201
6.5 Βραχυκύκλωμα στο 40% του μήκους της γραμμής μεταφοράς	202
6.6 Βραχυκύκλωμα στο 50% του μήκους της γραμμής μεταφοράς	204
7^ο Κεφάλαιο: Συμπεράσματα	206
Παράρτημα: Ανάλυση πειραματικών δοκιμών	207
Βιβλιογραφία	254

ΠΡΩΤΟ ΜΕΡΟΣ: Θεωρητικό Υπόβαθρο

1^ο Κεφάλαιο

Θεωρία προστασίας αποστάσεως

1.1 Γενικά

Είναι απαραίτητο τα σφάλματα (βραχυκυκλώματα) σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας να εκκαθαρίζονται γρήγορα. Διαφορετικά, μπορούν να οδηγήσουν σε αποσύνδεση των καταναλωτών, απώλεια της ευστάθειας του συστήματος και ζημιές στον εξοπλισμό. Η προστασία αποστάσεως χρησιμοποιείται εκτενώς στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας καθώς καλύπτει τις απαιτήσεις αξιοπιστίας και ταχύτητας.

Η προστασία αποστάσεως είναι ένας τύπος προστασίας “non-unit” (non-unit protection), έχει δηλαδή τη δυνατότητα να διακρίνει μεταξύ σφαλμάτων που συμβαίνουν σε διαφορετικά μέρη του συστήματος, ανάλογα με την μετρούμενη σύνθετη αντίσταση. Βασικά, αυτό περιλαμβάνει τη σύγκριση του ρεύματος σφάλματος, όπως ανιχνεύεται από τον ηλεκτρονόμο, με την τάση στη θέση του ηλεκτρονόμου, για τον προσδιορισμό της σύνθετης αντίστασης στη γραμμή μέχρι το σημείο του σφάλματος.

Για το σύστημα που φαίνεται στην *Εικόνα 1.1*, ένας ηλεκτρονόμος τοποθετημένος στο σημείο A χρησιμοποιεί το ρεύμα και την τάση της γραμμής για να υπολογίσει τη σύνθετη αντίσταση $Z = V/I$. Η τιμή της σύνθετης αντίστασης Z για ένα σφάλμα στο σημείο F_1 θα είναι Z_{AF1} και $(Z_{AB} + Z_{BF1})$ για ένα σφάλμα στο σημείο F_2 .

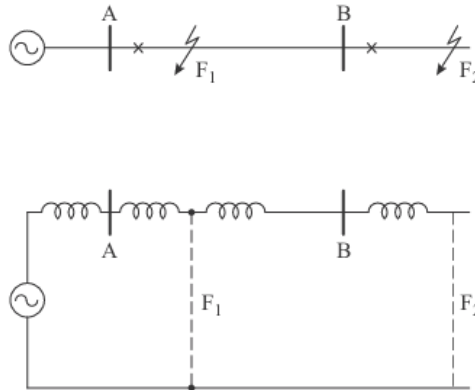
Το κύριο πλεονέκτημα της χρήσης ενός ηλεκτρονόμου αποστάσεως είναι ότι η ζώνη προστασίας του εξαρτάται από τη σύνθετη αντίσταση της προστατευόμενης γραμμής, η οποία είναι σταθερή και πρακτικά ανεξάρτητη από τα μεγέθη της τάσης και του ρεύματος. Έτσι, ο ηλεκτρονόμος αποστάσεως έχει μια σταθερή εμβέλεια, σε αντίθεση με τον ηλεκτρονόμο υπερέντασης, όπου η εμβέλεια μεταβάλλεται ανάλογα με τις συνθήκες του συστήματος.

1.2 Τύποι ηλεκτρονόμων αποστάσεως

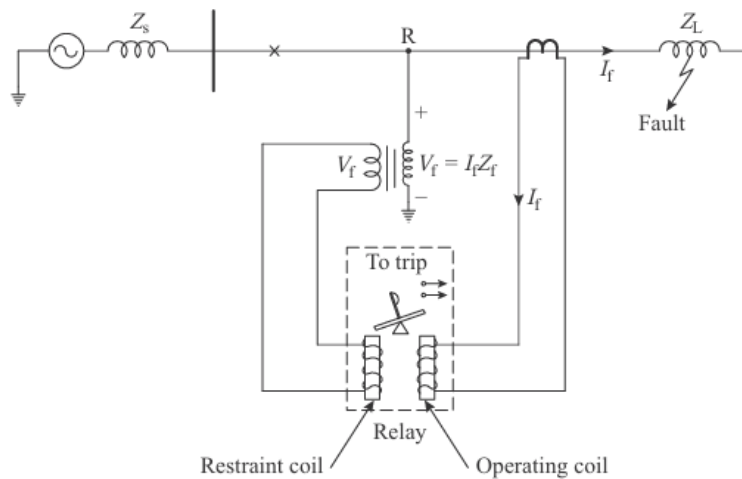
Οι ηλεκτρονόμοι αποστάσεως ταξινομούνται ανάλογα με τις χαρακτηριστικές λειτουργίες τους στο επίπεδο R-X, τον αριθμό των εισερχόμενων σημάτων και τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση των εισερχόμενων σημάτων. Ο συνηθέστερος τύπος ηλεκτρονόμου αποστάσεως συγκρίνει το μέγεθος ή τη φάση των δύο εισερχόμενων σημάτων προκειμένου να ληφθεί η χαρακτηριστική λειτουργία του, η οποία είναι ευθεία ή κύκλος όταν σχεδιάζεται στο επίπεδο R-X. Οποιοσδήποτε τύπος χαρακτηριστικών μπορεί να ληφθεί είτε με ένα τύπο συγκριτή είτε με άλλον, αν και οι ποσότητες που συγκρίνονται είναι διαφορετικές σε κάθε περίπτωση.

Εάν Z_R είναι η ρύθμιση της σύνθετης αντίστασης του ηλεκτρονόμου απόστασης, θα πρέπει να λειτουργεί όταν $Z_R \geq V/I$, ή όταν $I Z_R \geq V$. Όπως φαίνεται στην *Εικόνα 1.2*, αυτή η συνθήκη μπορεί να επιτευχθεί με συγκριτή μέτρου που λειτουργεί όταν τα αμπερελίγματα του κυκλώματος ρεύματος είναι περισσότερα από τα αμπερελίγματα του κυκλώματος τάσης. Ωστόσο, είναι δύσκολο να κατασκευαστεί ένας συγκριτής μέτρου που να λειτουργεί σωστά υπό συνθήκες σφάλματος όταν η διαφορά φάσης μεταξύ V και I τείνει να είναι 90° ή όταν υπάρχουν μεταβατικά φαινόμενα, γεγονός που οδηγεί σε λανθασμένες τιμές r.m.s. των V και I που απαιτούνται για τον υπολογισμό του $I Z_R \geq$

V. Για τους λόγους αυτούς, η χρήση των συγκριτών μέτρου είναι περιορισμένη. Είναι πιο βολικό να συγκρίνουμε δύο σήματα με βάση τη διαφορά φάσης τους και όχι με βάση τα μέτρα τους.



Εικόνα 1.1: Σφάλματα που συμβαίνουν σε διαφορετικά σημεία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 1.2: Ηλεκτρονόμος ορισμένος με συγκριτή πλάτους.

Η ανάλυση που ακολουθεί δείχνει ότι για δύο σήματα S_0 και S_r που πρόκειται να συγκριθούν ως προς το μέτρο τους, υπάρχουν δύο άλλα σήματα S_1 και S_2 που μπορούν να συγκριθούν ως προς τη φάση. Η σχέση μεταξύ των σημάτων έχει ως εξής:

$$\begin{aligned} S_0 &= S_1 + S_2 \\ S_r &= S_1 - S_2 \end{aligned} \quad (1.1)$$

Από την (1.1),

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{S_0 + S_r}{2} \\ S_2 &= \frac{S_0 - S_r}{2} \end{aligned} \quad (1.2)$$

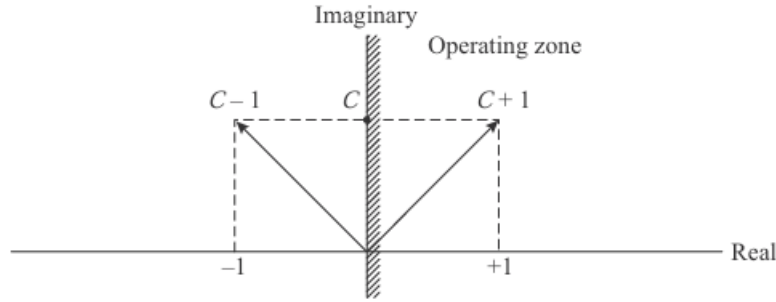
Η σύγκριση των μέτρων δίνεται από τις σχέσεις

$$\begin{aligned} |S_0| &\geq |S_r| \\ |S_1 + S_2| &\geq |S_1 - S_2| \end{aligned} \quad (1.3)$$

Ορίζοντας $S_1/S_2 = C$, η σχέση (1.3) μπορεί να εκφραστεί ως

$$|C + 1| \geq |C - 1| \quad (1.4)$$

Απεικονίζοντας τη μεταβλητή C στο επίπεδο $R-X$, σύμφωνα με την *Εικόνα 1.3*, μπορεί να φανεί ότι η σχέση (1.4) ικανοποιείται στο δεξί ημιεπίπεδο, το οποίο ορίζεται από όλα τα σημεία $C \angle \theta$ με $-90^\circ \leq \theta \leq +90^\circ$.



Εικόνα 1.3: Σύγκριση φάσεων στο μιγαδικό επίπεδο, $C = S_1/S_2$.

Δεδομένου ότι $C \angle \theta = (S_1 \angle \alpha) / (S_2 \angle \beta)$, η σχέση (1.4) ικανοποιείται όταν:

$$-90^\circ \leq \alpha - \beta \leq +90^\circ \quad (1.5)$$

Οι παραπάνω σχέσεις δείχνουν ότι δύο σήματα, τα οποία συγκρίνονται μέσω συγκριτή μέτρου, μπορούν να μετατραπούν έτσι ώστε να συγκρίνονται ισοδύναμα σε έναν συγκριτή φάσης. Τα προς σύγκριση σήματα αναλύονται στις παρακάτω ενότητες για να προσδιοριστούν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των κύριων τύπων ηλεκτρονόμων απόστασης.

1.2.1 Ηλεκτρονόμος σύνθετης αντίστασης

Ο ηλεκτρονόμος σύνθετης αντίστασης δεν λαμβάνει υπόψη τη φασική γωνία μεταξύ της τάσης και του ρεύματος που εφαρμόζονται σε αυτόν και, για αυτόν τον λόγο, η χαρακτηριστική λειτουργίας του στο επίπεδο $R-X$ είναι ένας κύκλος με κέντρο την αρχή των συντεταγμένων και ακτίνα ίση με την επιλεγμένη ρύθμιση σε Ω . Ο ηλεκτρονόμος λειτουργεί για όλες τις τιμές σύνθετης αντιστάσεως μικρότερες από την καθορισμένη ρύθμιση, δηλαδή για όλα τα σημεία που βρίσκονται μέσα στον κύκλο. Έτσι, αν η σύνθετη αντίσταση ρύθμισης είναι Z_R , ο ηλεκτρονόμος λειτουργεί όταν $Z_R \geq V/I$ ή όταν $IZ_R \geq V$. Για να λειτουργήσει ο ηλεκτρονόμος σύνθετης αντίστασης ως συγκριτής φάσης, πρέπει τα ακόλουθα σήματα να αντιστοιχηθούν στα S_0 και S_r :

$$\begin{aligned} S_0 &= IZ_R \\ S_r &= KV \end{aligned} \quad (1.6)$$

Η σταθερά K λαμβάνει υπόψη τους λόγους μετασχηματισμού των μετασχηματιστών έντασης (CTs) και τάσης (VTs). Τα αντίστοιχα σήματα για έναν συγκριτή φάσης είναι:

$$\begin{aligned} S_1 &= KV + IZ_R \\ S_2 &= -KV + IZ_R \end{aligned} \quad (1.7)$$

Διαιρώντας την (1.7) με KI λαμβάνουμε

$$\begin{aligned} S_1 &= Z + \frac{Z_R}{K} \\ S_2 &= -Z + \frac{Z_R}{K} \end{aligned} \quad (1.8)$$

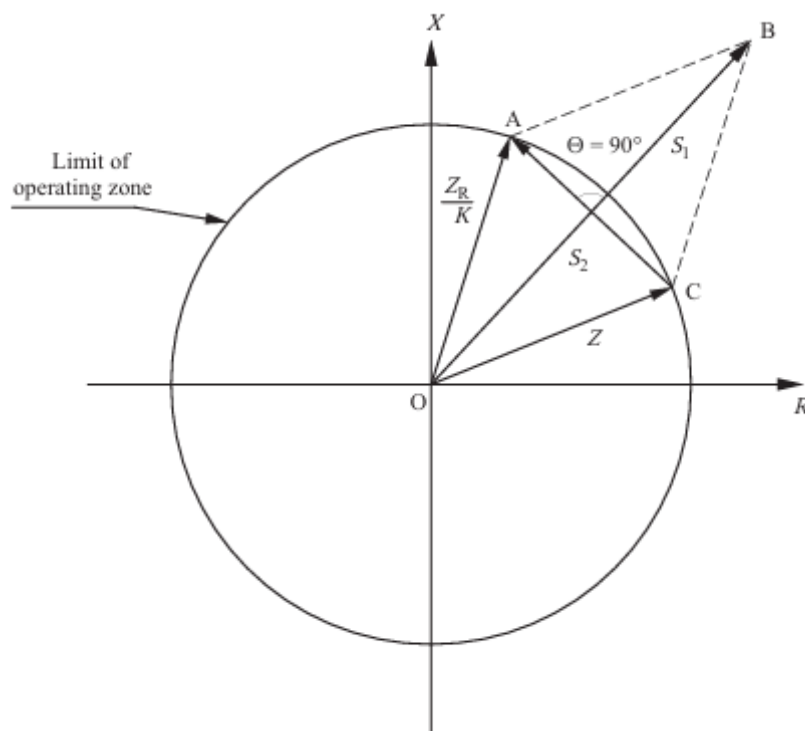
όπου $Z = \frac{V}{I}$

Τα μέτρα των σημάτων S_1 και S_2 έχουν αλλάξει κατά τη διαίρεση με KI . Ωστόσο, αυτό δεν είναι σημαντικό, καθώς ο κύριος σκοπός είναι να διατηρηθεί η διαφορά φάσης μεταξύ τους. Πρέπει να σημειωθεί ότι η σχεδίαση των S_1 και S_2 στη μία ή την άλλη κλίμακα δεν επηρεάζει τη σχέση των φάσεων μεταξύ των δύο σημάτων.

Σχεδιάζοντας το Z_R/K και την εξίσωση (1.8) στο επίπεδο R–X, η χαρακτηριστική λειτουργίας του ηλεκτρονόμου καθορίζεται από τον γεωμετρικό τόπο των σημείων Z για τα οποία η γωνία φάσης θ , μεταξύ των S_1 και S_2 δίνεται από $-90^\circ \leq \theta \leq +90^\circ$. Η υλοποίηση αυτή φαίνεται στην *Εικόνα 1.4*. Η εξίσωση (1.8) δημιουργεί τον παραλληλόγραμμο OABC, που έχει διαγώνιες τα S_1 και S_2 . Από τις ιδιότητες του παραλληλογράμμου, η γωνία μεταξύ των S_1 και S_2 είναι 90° όταν $|Z| = |Z_R/K|$. Συνεπώς, το σημείο C είναι το όριο της ζώνης λειτουργίας και ο γεωμετρικός τόπος του σημείου C, για τις διαφορετικές τιμές του Z , είναι ένας κύκλος με ακτίνα Z_R/K .

Αν $Z < Z_R/K$, τότε προκύπτει η κατάσταση που φαίνεται στην *Εικόνα 1.5*. Σε αυτήν την περίπτωση, η θ είναι μικρότερη από 90° και κατά συνέπεια το διάνυσμα για το Z βρίσκεται εντός της ζώνης λειτουργίας του ηλεκτρονόμου. Αντίθετα, αν $Z > Z_R/K$, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 1.6*, τότε η θ είναι μεγαλύτερη από 90° , και το Z βρίσκεται εκτός της ζώνης λειτουργίας του ηλεκτρονόμου, οπότε ο ηλεκτρονόμος δεν θα λειτουργήσει.

Επειδή ο ηλεκτρονόμος σύνθετης αντίστασης είναι μη κατευθυντικό στοιχείο, θα λειτουργήσει για όλα τα σφάλματα κατά μήκος του διανύσματος AB (βλ *Εικόνα 1.7*) και για όλα τα σφάλματα πίσω από τον ζυγό, δηλαδή κατά μήκος του διανύσματος AC. Το διάνυσμα AB αντιπροσωπεύει την σύνθετη αντίσταση μπροστά από τον ηλεκτρονόμο, μεταξύ της θέσης του στο A και του άκρου της γραμμής AB, ενώ το διάνυσμα AC αντιπροσωπεύει τη σύνθετη αντίσταση της γραμμής πίσω από τη θέση του ηλεκτρονόμου.



Εικόνα 1.4: Χαρακτηριστική λειτουργίας ηλεκτρονόμου σύνθετης αντίστασης που λαμβάνεται με τη χρήση συγκριτή φάσης.

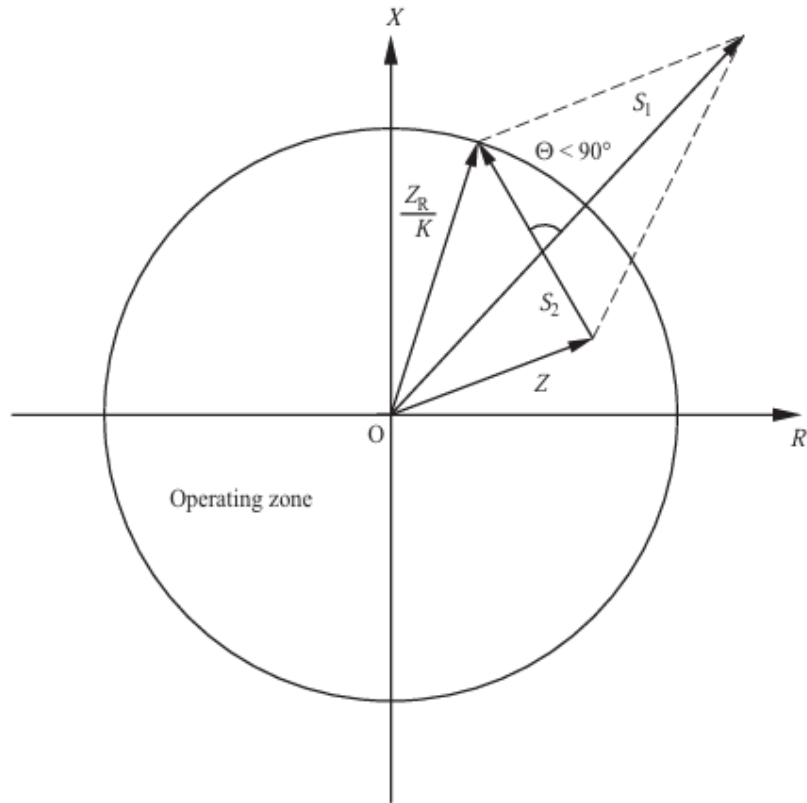
Ο ηλεκτρονόμος σύνθετης αντίστασης έχει τρία κύρια μειονεκτήματα:

- Μη κατευθυντικός: Ανιχνεύει σφάλματα τόσο μπροστά όσο και πίσω από τη θέση του και, ως εκ τούτου, απαιτεί ένα κατευθυντικό στοιχείο για σωστή διακριτικότητα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη ενός ανεξάρτητου ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης, ο οποίος περιορίζει ή αποτρέπει την ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου απόστασης όταν η ισχύς ρέει εκτός της προστατευόμενης ζώνης κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος.
- Επηρεάζεται από την αντίσταση του τόξου του σφάλματος.
- Υψηλή ευαισθησία στις ταλαντώσεις του συστήματος ισχύος, λόγω της μεγάλης περιοχής που καλύπτει το κυκλικό του χαρακτηριστικό.

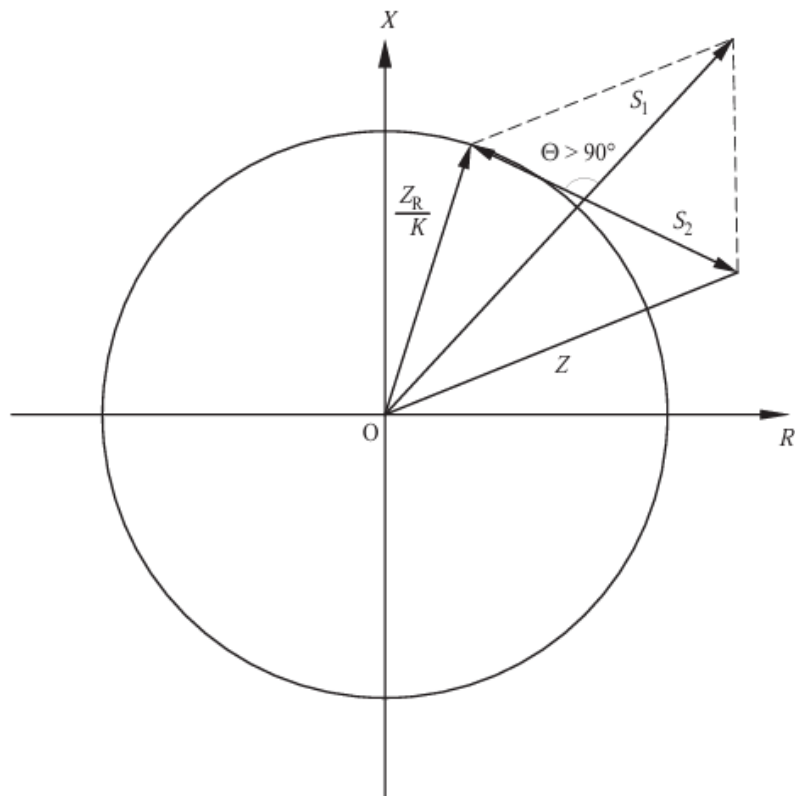
1.2.2 Ηλεκτρονόμος κατεύθυνσης

Οι ηλεκτρονόμοι κατεύθυνσης είναι στοιχεία που ενεργοποιούνται όταν η μετρούμενη σύνθετη αντίσταση βρίσκεται στο ένα ημιεπίπεδο του μιγαδικού επιπέδου R–X. Χρησιμοποιούνται συχνά σε συνδυασμό με ηλεκτρονόμους σύνθετης αντιστάσεως για τον περιορισμό της ζώνης λειτουργίας σε ένα ημικύκλιο. Η χαρακτηριστική λειτουργίας προκύπτει από τη σύγκριση φάσης των ακόλουθων σημάτων:

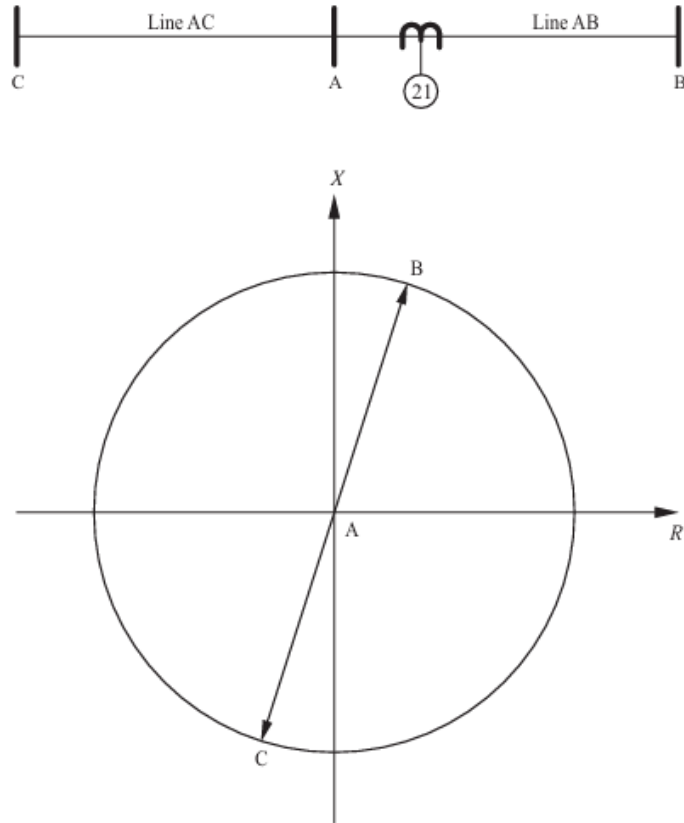
$$\begin{aligned} S_1 &= KV \\ S_2 &= Z_R I \end{aligned} \quad (1.9)$$



Εικόνα 1.5: Σύνθετη αντίσταση Z εντός της περιοχής λειτουργίας ηλεκτρονόμου σύνθετης αντίστασης.



Εικόνα 1.6: Σύνθετη αντίσταση Z εκτός της περιοχής λειτουργίας ηλεκτρονόμου σύνθετης αντίστασης.



Εικόνα 1.7: Χαρακτηριστική λειτουργίας ηλεκτρονόμου σύνθετης αντίστασης στο μιγαδικό επίπεδο.

Διαιρώντας με KI και ορίζοντας $Z = V/I$, λαμβάνουμε

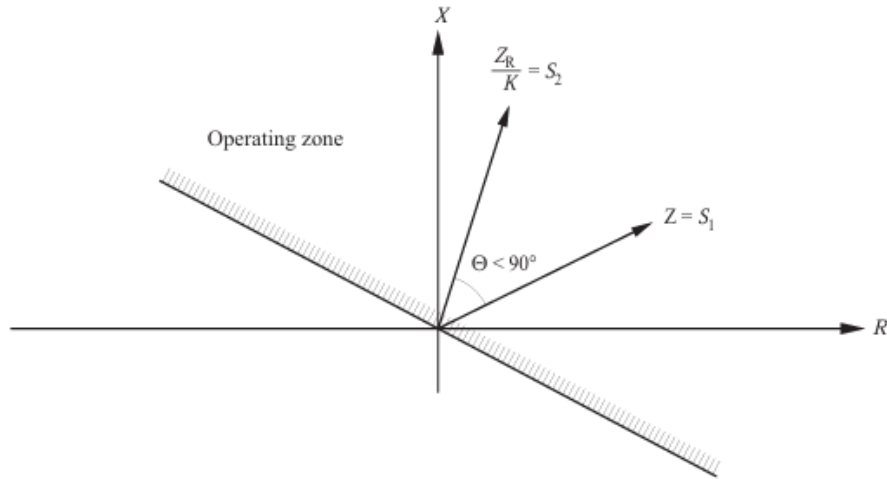
$$\begin{aligned} S_1 &= Z \\ S_2 &= \frac{Z_R}{K} \end{aligned} \quad (1.10)$$

Η περιοχή λειτουργίας του ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης ορίζεται από τις τιμές των Z και Z_R , που συνεπάγονται διαφορά φάσης μεταξύ των S_1 και S_2 μικρότερη από 90° . Η χαρακτηριστική απεικονίζεται στην *Εικόνα 1.8* μαζί με τους όρους S_1 και S_2 .

1.2.3 Ηλεκτρονόμος επαγωγικής αντιστάσεως

Ο ηλεκτρονόμος επαγωγικής αντιστάσεως έχει σχεδιαστεί για να μετράει μόνο την επαγωγική αντίσταση της γραμμής. Κατά συνέπεια, η ρύθμισή του επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μια τιμή που καθορίζεται από την επαγωγική αντίσταση X_R . Σε αυτή την περίπτωση, οι εξισώσεις για τους όρους S_1 και S_2 είναι οι εξής:

$$\begin{aligned} S_1 &= -KV + X_R I \\ S_2 &= X_R I \end{aligned} \quad (1.11)$$

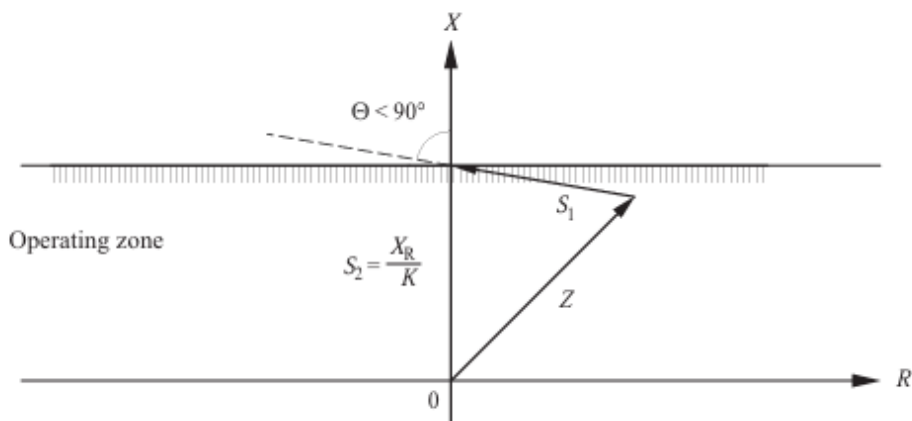


Εικόνα 1.8: Χαρακτηριστική λειτουργίας ηλεκτρονόμου κατεύθυνσης.

και διαιρώντας με KI , λαμβάνουμε

$$\begin{aligned} S_1 &= -Z + \frac{X_R}{K} \\ S_2 &= \frac{X_R}{K} \end{aligned} \quad (1.12)$$

Η περιοχή λειτουργίας προκύπτει από την απεικόνιση των εξισώσεων (1.12) στο μιγαδικό επίπεδο και τον προσδιορισμό εκείνων των τιμών του Z για τις οποίες το Θ είναι μικρότερο από 90° . Η χαρακτηριστική προβάλλεται στην *Εικόνα 1.9*. Σε αυτή την περίπτωση, το όριο της περιοχής λειτουργίας είναι ευθεία γραμμή παράλληλη προς τον άξονα ωμικής αντίστασης R , με ρυθμισμένη επαγωγική αντίσταση ίση με X_R/K .



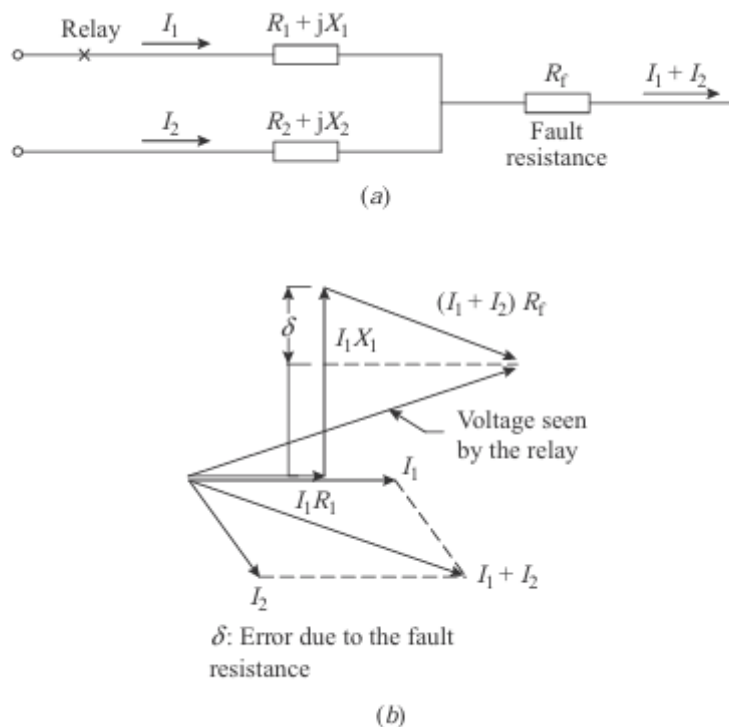
Εικόνα 1.9: Χαρακτηριστική λειτουργίας ηλεκτρονόμου επαγωγικής αντίστασης.

Δεδομένου ότι η σύνθετη αντίσταση του σφάλματος είναι σχεδόν πάντα ωμική, μπορεί να υποθεθεί ότι η αντίσταση του σφάλματος δεν επηρεάζει τους ηλεκτρονόμους επαγωγικής αντίστασης. Σε ένα ακτινικό σύστημα, αυτό είναι γενικά αληθές, αλλά όχι απαραίτητα εάν το σφάλμα τροφοδοτείται από δύο ή περισσότερα σημεία, καθώς η πτώση τάσης στην αντίσταση του σφάλματος προστίθεται στην πτώση τάσης της γραμμής και επηρεάζει την τάση του ηλεκτρονόμου.

Εάν το ρεύμα στον ηλεκτρονόμο δεν είναι ακριβώς σε φάση με το ρεύμα του σφάλματος, η πτώση τάσης στην αντίσταση του σφάλματος θα δημιουργήσει μια συνιστώσα με διαφορά φάσης

90° σε σχέση με το ρεύμα του ηλεκτρονόμου, παράγοντας έναν όρο παρόμοιο με την επαγωγική αντίσταση της γραμμής. Αυτή η φαινομενική επαγωγική αντίσταση μπορεί να είναι θετική ή αρνητική και να προστίθεται ή να αφαιρείται από την σύνθετη αντίσταση που μετρείται από τον ηλεκτρονόμο, επηρεάζοντας έτσι τη λειτουργία του. Εάν η αντίσταση του σφάλματος είναι μεγάλη σε σύγκριση με την επαγωγική αντίσταση της γραμμής, η επίδραση μπορεί να είναι σοβαρή, και αυτός ο τύπος ηλεκτρονόμου δεν θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί.

Η Εικόνα 1.10 δείχνει την τάση που βλέπει ο ηλεκτρονόμος παρουσία σφαλμάτων με αντίσταση τόξου και δύο τροφοδοσίες. Από το διάγραμμα, φαίνεται ότι ο ηλεκτρονόμος θα μετρήσει μια τιμή μικρότερη από την πραγματική αντίδραση μεταξύ του σημείου του ηλεκτρονόμου και του σφάλματος.



Εικόνα 1.10: Τάση που φαίνεται από έναν ηλεκτρονόμο επαγωγικής αντιστάσεως παρουσία σφαλμάτων με τόξο αντίσταση και δύο εισροές: (α) σχηματικό κύκλωμα και (β) διανυσματικό διάγραμμα.

1.2.4 Ηλεκτρονόμος τύπου Mho

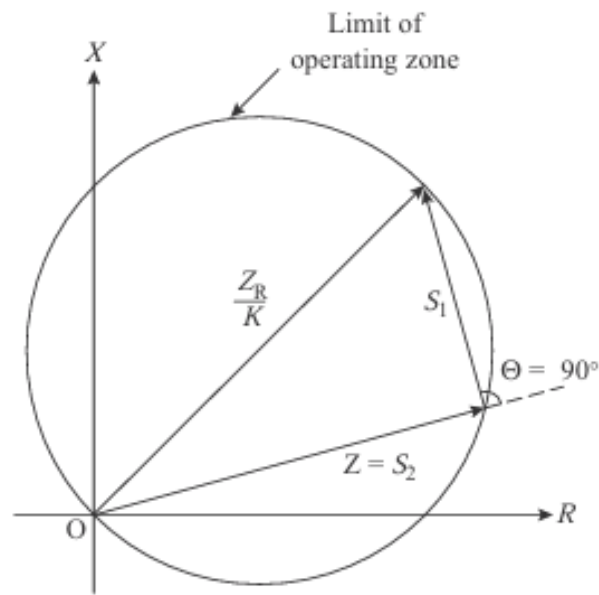
Ο ηλεκτρονόμος τύπου mho συνδυάζει τις ιδιότητες των ηλεκτρονόμων σύνθετης αντίστασης και κατεύθυνσης. Η χαρακτηριστική του είναι εγγενώς κατευθυντική και ο ηλεκτρονόμος ενεργοποιείται μόνο για σφάλματα που βρίσκονται μπροστά του. Επιπλέον, έχει το πλεονέκτημα ότι η εμβέλεια του μεταβάλλεται με τη γωνία του σφάλματος. Η χαρακτηριστική του, όταν σχεδιάζεται στο επίπεδο R–X, είναι ένας κύκλος του οποίου η περίμετρος διέρχεται από την αρχή των συντεταγμένων και προσδιορίζεται με την αντιστοίχιση των σημάτων S_1 και S_2 στις ακόλουθες τιμές:

$$\begin{aligned} S_1 &= -KV + Z_R I \\ S_2 &= KV \end{aligned} \quad (1.13)$$

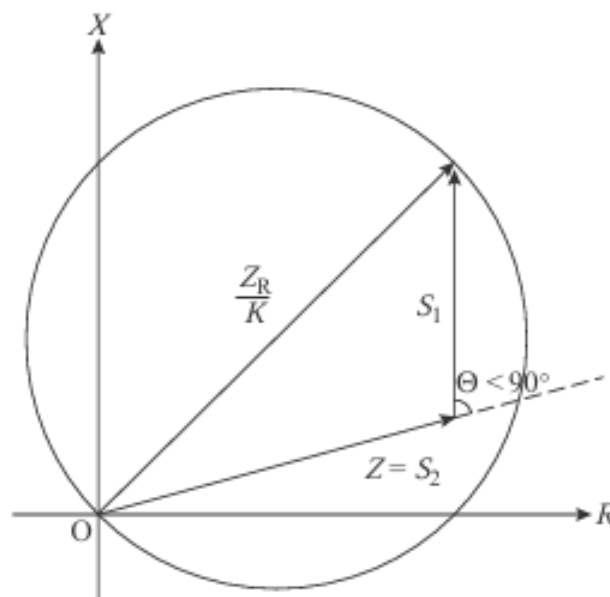
από τις οποίες προκύπτει

$$\begin{aligned} S_1 &= -Z + \frac{Z_R}{K} \\ S_2 &= Z \end{aligned} \quad (1.14)$$

Απεικονίζοντας το Z_R/K και τις εξισώσεις (1.14) στο επίπεδο R-X, η χαρακτηριστική του ηλεκτρονόμου καθορίζεται από τον γεωμετρικό τόπο των τιμών του Z που ικανοποιούνται όταν η γωνία θ είναι μικρότερη από 90° . Σε αυτήν την περίπτωση, το όριο της περιοχής λειτουργίας ($\theta=90^\circ$), όπως φαίνεται στην *Εικόνα 1.11*, ορίζεται από έναν κύκλο με διάμετρο Z_R/K και περίμετρο που περνά από την αρχή των συντεταγμένων. Για τιμές του Z που βρίσκονται εντός της περιφέρειας, η θ θα είναι μικρότερη από 90° , όπως φαίνεται στην *Εικόνα 1.12*, με αποτέλεσμα να ενεργοποιείται ο ηλεκτρονόμος.



Εικόνα 1.11: Χαρακτηριστική λειτουργίας ηλεκτρονόμου τύπου mho.



Εικόνα 1.12: Σύνθετη αντίσταση Z εντός της περιοχής λειτουργίας ηλεκτρονόμου τύπου mho.

1.2.5 Πλήρως πολωμένος ηλεκτρονόμος τύπου Mho

Ένα από τα μειονεκτήματα του αυτοπολωμένου ηλεκτρονόμου τύπου mho είναι ότι όταν χρησιμοποιείται σε μεγάλες γραμμές και η εμβέλειά του δεν καλύπτει επαρκώς την περιοχή κατά μήκος του άξονα της ωμικής αντίστασης R , αδυνατεί να ανιχνεύσει σφάλματα με υψηλή αντίσταση τόξου ή αντίσταση σφάλματος. Το πρόβλημα επιδεινώνεται στην περίπτωση των μικρού μήκους γραμμών, καθώς η τιμή ρύθμισης είναι χαμηλή και το τμήμα του άξονα ωμικής αντίστασης R που καλύπτεται από τον κύκλο mho είναι μικρό σε σχέση με τις αναμενόμενες τιμές της αντίστασης τόξου.

Μια πρακτική λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η χρήση ενός πλήρως πολωμένου ηλεκτρονόμου τύπου mho, όπου η κυκλική χαρακτηριστική λειτουργίας του επεκτείνεται κατά μήκος του άξονα R για όλα τα μη συμμετρικά σφάλματα, όπως απεικονίζεται στην *Εικόνα 1.13*. Αυτή η χαρακτηριστική μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ενός συγκριτή φάσης που περιέχει τα ακόλουθα σήματα:

$$\begin{aligned} S_1 &= V_{pol} \\ S_2 &= V - IZ_R \end{aligned} \quad (1.15)$$

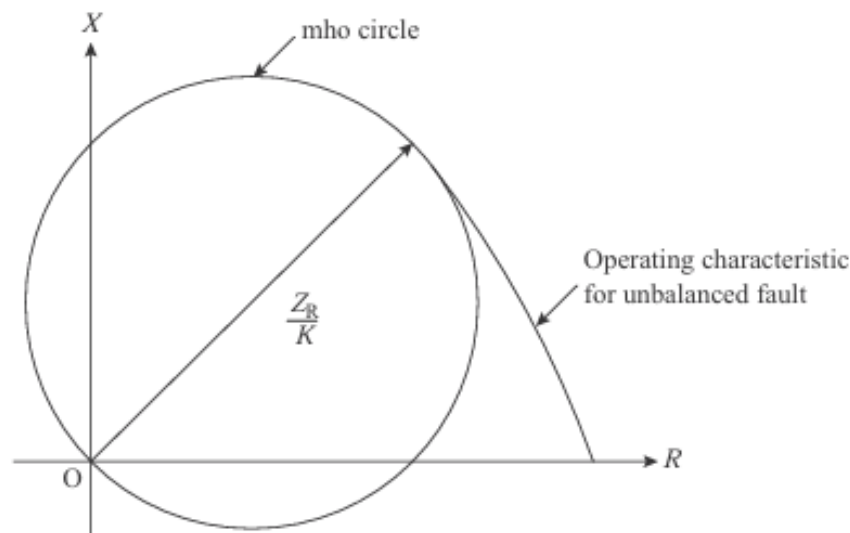
όπου

V : Η τάση στη θέση του ηλεκτρονόμου, στις φάσεις που έχουν υποστεί βλάβη, ή στις υπόλοιπες φάσεις.

V_{pol} : Η τάση πόλωσης που λαμβάνεται από τη φάση ή τις φάσεις που δεν σχετίζονται με το σφάλμα.

I : Το ρεύμα σφάλματος.

Z_R : Η ρύθμιση του ηλεκτρονόμου απόστασης.

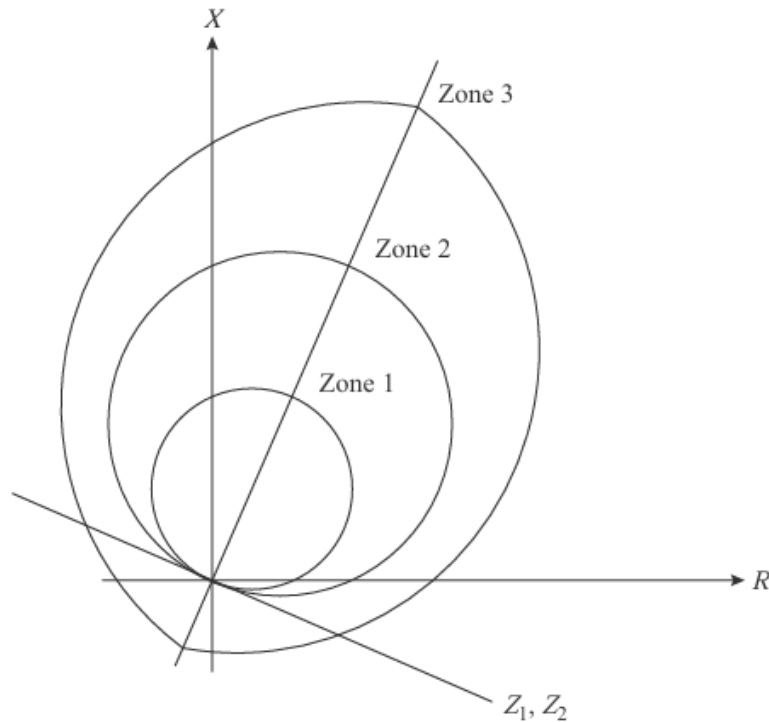


Εικόνα 1.13: Χαρακτηριστική λειτουργίας πλήρως πολωμένου ηλεκτρονόμου τύπου mho.

1.2.6 Ηλεκτρονόμοι με χαρακτηριστικές φακού

Οι ηλεκτρονόμοι αποστάσεως με χαρακτηριστικές φακού (lens characteristics) είναι πολύ χρήσιμοι για την προστασία γραμμών υψηλής σύνθετης αντίστασης, που μεταφέρουν μεγάλη ισχύ. Υπό αυτές τις συνθήκες, οι τιμές της σύνθετης αντίστασης της γραμμής, οι οποίες είναι ίσες με V^2/S , γίνονται μικρές και πλησιάζουν τα χαρακτηριστικά σύνθετης αντίστασης του ηλεκτρονόμου, ιδιαίτερα εκείνα της ζώνης 3.

Αυτές οι χαρακτηριστικές φακού με μετατόπιση (offset lens characteristic), οι οποίες μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να μετατοπίζουν την κυκλική χαρακτηριστική του ηλεκτρονόμου τύπου mho, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 1.14*, είναι συνηθισμένες σε ορισμένους ηλεκτρονόμους.



Εικόνα 1.14: Ζώνη 3 της χαρακτηριστικής φακού με μετατόπιση (offset lens characteristics).

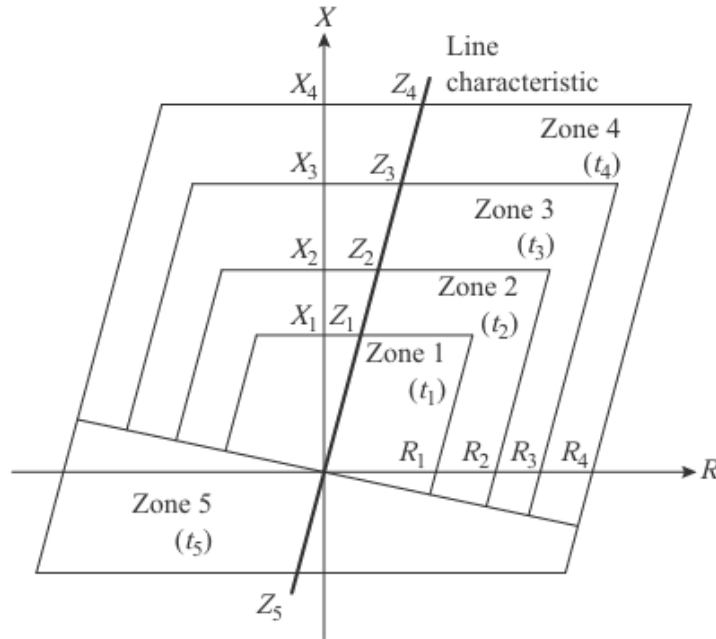
1.2.7 Ηλεκτρονόμοι με πολυγωνικές χαρακτηριστικές

Οι ηλεκτρονόμοι με πολυγωνικές χαρακτηριστικές προσφέρουν εκτεταμένη εμβέλεια ώστε να συμπεριλαμβάνουν και την αντίσταση σφάλματος, ιδιαίτερα για μικρές γραμμές, καθώς η θέση της αντίστασης της γραμμής μπορεί να ρυθμιστεί στη χαρακτηριστική λειτουργίας (βλ. γραμμή 2 στην *Εικόνα 1.15*, που δείχνει μια τυπική πολυγωνική χαρακτηριστική λειτουργίας).

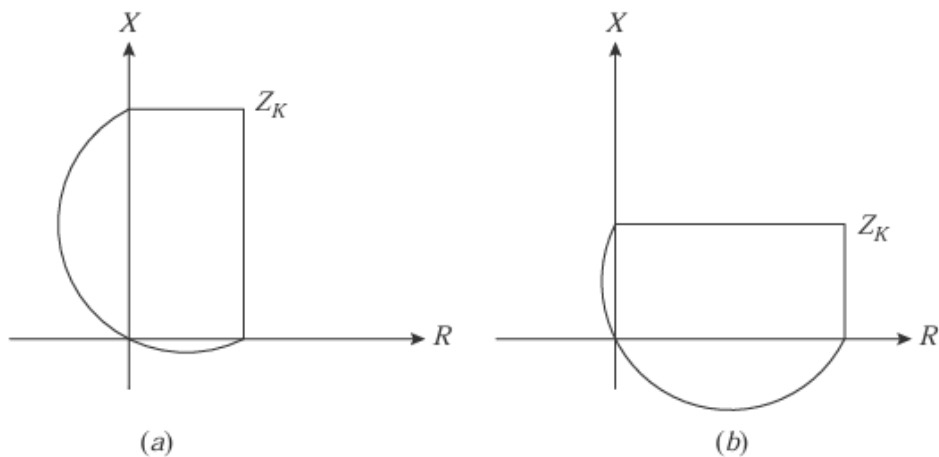
Η πολυγωνική χαρακτηριστική λειτουργίας επιτυγχάνεται μέσω τριών ανεξάρτητων μετρητικών στοιχείων—επαγωγικής αντίστασης (reactance), ωμικής αντίστασης (resistance) και κατεύθυνσης (directional). Για την υλοποίηση αυτής της χαρακτηριστικής, τα μετρητικά στοιχεία συνδυάζονται κατάλληλα και οι ηλεκτρονόμοι ενεργοποιούνται μόνο όταν και τα τρία στοιχεία έχουν ενεργοποιηθεί. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται το απαιτούμενο πολυγωνικό χαρακτηριστικό.

1.2.8 Ηλεκτρονόμοι με συνδυασμένες χαρακτηριστικές

Μια τυπική συνδυασμένη χαρακτηριστική λειτουργίας ορίζεται στο επίπεδο της σύνθετης αντίστασης από γραμμές που είναι παράλληλες προς τους άξονες αντίστασης R και επαγωγικής αντίστασης X και διασταυρώνονται στο σημείο ρύθμισης Z_K , όπως φαίνεται στην *Εικόνα 1.16*. Για την επίτευξη της απαιτούμενης κατευθυντικότητας, χρησιμοποιείται ένας κύκλος mho που περνά μέσα από το Z_K . Σε ηλεκτρονόμους με αυτή την χαρακτηριστική, οι εμβέλειες στις κατευθύνσεις της ωμικής και της επαγωγικής αντίστασης έχουν το ίδιο εύρος ρυθμίσεων και μπορούν να ρυθμιστούν ανεξάρτητα η μία από την άλλη.



Εικόνα 1.15: Χαρακτηριστική λειτουργίας ηλεκτρονόμου με πολυγωνικά χαρακτηριστικά.



Εικόνα 1.16: Τυπικές συνδυασμένες χαρακτηριστικές λειτουργίας: (α) λόγος $R/X = 0.5$ και (β) λόγος $R/X = 2$.

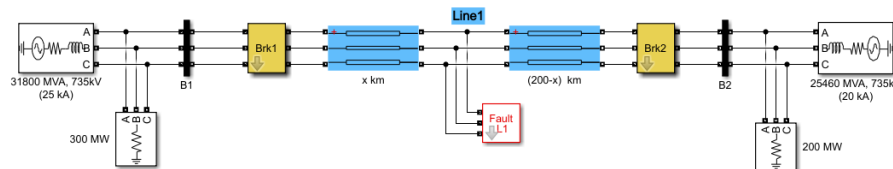
2^ο Κεφάλαιο

Υπολογισμός μεγεθών ακολουθίας στο μοντέλο μεσαίου μήκους γραμμής μεταφοράς

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι απαιτούμενοι υπολογισμοί για τη μετατροπή ενός δικτύου δύο ζυγών, με μια τριφασική γεννήτρια και ένα τριφασικό φορτίο (ωμικής συμπεριφοράς) σε κάθε ζυγό, σε ένα απλούστερο και πιο εύχρηστο για υπολογισμούς. Κατ' αυτόν τον τρόπο, θα γίνει εφικτή η εύρεση των ακολουθιακών μεγεθών.

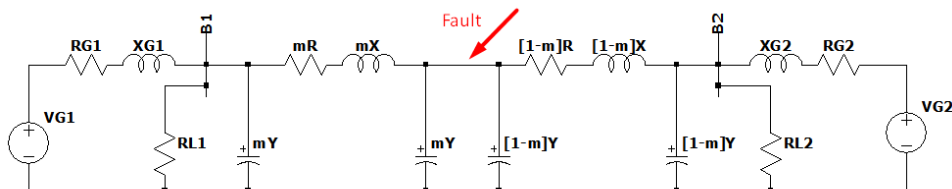
2.1 Αρχικό δίκτυο

Αρχικά το δίκτυο που θα αναλύσουμε, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι ένα κλασσικό δίκτυο δύο ζυγών με μια τριφασική γεννήτρια και ένα τριφασικό φορτίο (ωμικής συμπεριφοράς) σε κάθε ζυγό το οποίο δεν θα ληφθεί υπόψιν στις μελέτες βραχυκυκλωμάτων.



Εικόνα 2.1: Αρχικό δίκτυο δύο ζυγών.

Η γραμμή μεταφοράς εκτείνεται σε μήκος 200 km, γεγονός που απαιτεί την αναπαράστασή της με μοντέλο μεσαίου μήκους. Από τις πιθανές μορφές αναπαράστασης T, π και ABCD, επιλέγεται το κύκλωμα π. Έτσι, το τελικό κύκλωμα που προσομοιώνει το αρχικό δίκτυο έχει την παρακάτω μορφή:



Εικόνα 2.2: Αρχικό δίκτυο με γραμμή μεταφοράς μοντέλου μεσαίου μήκους, κυκλώματος π.

όπου τα στοιχεία του κυκλώματος αντιστοιχούν στα εξής:

V_{G1} : Η τάση της αριστερής γεννήτριας G1 που συνδέεται στο ζυγό B1.

Z_{G1} : Η εσωτερική σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας G1 που ισούται με $Z_{G1} = R_{G1} + jX_{G1}$.

R_{L1} : Το τριφασικό φορτίο ωμικού χαρακτήρα που συνδέεται στον ζυγό B1.

mY : Η αγωγιμότητα της γραμμής μεταφοράς έως το ποσοστό $m < 1$ του συνολικού της μήκους. Η αγωγιμότητα της γραμμής ισούται με $Y = G + j\frac{1}{X_c} = gl + j\omega Cl = gl + j2\pi fCl$.

mZ : Η σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς έως το ποσοστό m του συνολικού της μήκους. Η σύνθετη αντίσταση της γραμμής ισούται με $Z = R + jX = rl + j2\pi fLl$.

$(1 - m)Y$: Η αγωγιμότητα της γραμμής μεταφοράς για το υπολειπόμενο μήκος της.

$(1 - m)Z$: Η σύνθετη αντίσταση της γραμμής για το υπολειπόμενο μήκος της.

R_{L2} : Το τριφασικό φορτίο ωμικού χαρακτήρα που συνδέεται στον ζυγό B2.

Z_{G2} : Η εσωτερική σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας G2 που ισούται με $Z_{G2} = R_{G2} + jX_{G2}$.

V_{G2} : Η τάση της δεξιάς γεννήτριας G2 που συνδέεται στον ζυγό B2.

2.2 Υπολογισμός των παραμέτρων του κυκλώματος θετικής ακολουθίας

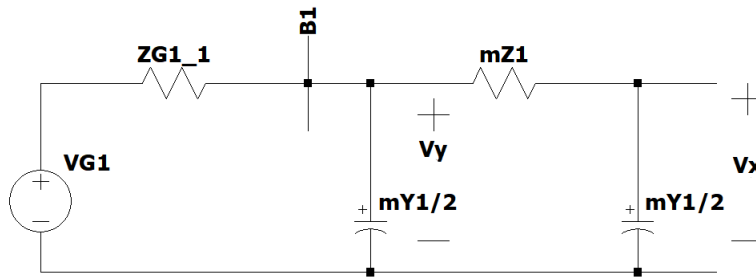
Σε αυτήν την παράγραφο θα υπολογιστούν οι παράμετροι θετικής ακολουθίας δημιουργώντας τα ισοδύναμα κυκλώματα Thevenin εξ' αριστερών και εκ' δεξιών του σημείου σφάλματος.

2.2.1 Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin αριστερά του σημείου σφάλματος

Αρχικά θα υπολογιστεί η ισοδύναμη αντίσταση Thevenin αριστερά του σημείου σφάλματος. Ο δείκτης 1 στο τέλος του όρου Z_{Th1_1} συμβολίζει ότι βρισκόμαστε αριστερά του σφάλματος. Ο δείκτης 1 στο τέλος των υπόλοιπων όρων δηλώνει ότι πρόκειται για όρους θετικής ακολουθίας.

$$\begin{aligned}
 Z_{Th1_1} &= \frac{2}{mY_1} // [mZ_1 + (\frac{2}{mY_1}) // Z_{G1_1}] \Rightarrow \\
 Z_{Th1_1} &= \frac{2}{mY_1} // [mZ_1 + (\frac{\frac{2Z_{G1_1}}{mY_1}}{\frac{2}{mY_1} + Z_{G1_1}})] \Rightarrow \\
 Z_{Th1_1} &= \frac{2}{mY_1} // [mZ_1 + \frac{2Z_{G1_1}}{2 + mY_1 Z_{G1_1}}] \Rightarrow \\
 Z_{Th1_1} &= \frac{2}{mY_1} // [\frac{mZ_1(2 + mY_1 Z_{G1_1}) + 2Z_{G1_1}}{2 + mY_1 Z_{G1_1}}] \Rightarrow \\
 Z_{Th1_1} &= \frac{2}{mY_1} // [\frac{2mZ_1 + m^2 Z_1 Y_1 Z_{G1_1} + 2Z_{G1_1}}{2 + mY_1 Z_{G1_1}}] \Rightarrow \\
 Z_{Th1_1} &= \frac{\frac{2}{mY_1} (\frac{2mZ_1 + m^2 Z_1 Y_1 Z_{G1_1} + 2Z_{G1_1}}{2 + mY_1 Z_{G1_1}})}{\frac{2}{mY_1} + (\frac{2mZ_1 + m^2 Z_1 Y_1 Z_{G1_1} + 2Z_{G1_1}}{2 + mY_1 Z_{G1_1}})} \Rightarrow \\
 Z_{Th1_1} &= \frac{\frac{2(2mZ_1 + m^2 Z_1 Y_1 Z_{G1_1} + 2Z_{G1_1})}{(2 + mY_1 Z_{G1_1}) mY_1}}{\frac{2}{mY_1} + (\frac{2mZ_1 + m^2 Z_1 Y_1 Z_{G1_1} + 2Z_{G1_1}}{2 + mY_1 Z_{G1_1}})} \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

Θα ακολουθήσει η εύρεση τάσης Thevenin αριστερά του σημείου σφάλματος ονομαζόμενη V_{Th1} . Αναλύουμε το κύκλωμα θετικής ακολουθίας το οποίο εμπεριέχει την πηγή σύμφωνα με τους νόμους της διαίρεσης τάσεως. Σημειώνονται στο σχήμα ενδεικτικά οι ονομασίες της τάσης στα διάφορα σημεία του δικτύου θετικής ακολουθίας.



Εικόνα 2.3: Κύκλωμα θετικής ακολουθίας του δικτύου, αριστερά του σημείου σφάλματος.

$$\begin{aligned}
V_y &= V_{G1} \frac{\frac{2}{mY_1} // (mZ_1 + \frac{2}{mY_1})}{Z_{G1_1} + [\frac{2}{mY_1} // (mZ_1 + \frac{2}{mY_1})]} \Rightarrow \\
V_y &= V_{G1} \frac{\frac{\frac{2}{mY_1}(mZ_1 + \frac{2}{mY_1})}{\frac{2}{mY_1} + mZ_1 + \frac{2}{mY_1}}}{Z_{G1_1} + \frac{\frac{2}{mY_1}(mZ_1 + \frac{2}{mY_1})}{\frac{2}{mY_1} + mZ_1 + \frac{2}{mY_1}}} \Rightarrow \\
V_y &= V_{G1} \frac{\frac{\frac{2}{mY_1}(mZ_1 + \frac{2}{mY_1})}{\frac{4}{mY_1} + mZ_1}}{Z_{G1_1}(\frac{4}{mY_1} + mZ_1) + \frac{\frac{2}{mY_1}(mZ_1 + \frac{2}{mY_1})}{\frac{4}{mY_1} + mZ_1}} \Rightarrow \\
V_y &= V_{G1} \frac{\frac{2}{mY_1}(mZ_1 + \frac{2}{mY_1})}{Z_{G1_1}(\frac{4}{mY_1} + mZ_1) + \frac{2}{mY_1}(mZ_1 + \frac{2}{mY_1})} \Rightarrow \\
V_y &= V_{G1} \frac{\frac{2Z_1 + \frac{4}{Y_1}}{Y_1 + m^2Y_1^2}}{\frac{4Z_{G1_1}}{mY_1} + mZ_1Z_{G1_1} + \frac{2Z_1}{Y_1} + \frac{4}{m^2Y_1^2}} \quad (2.2)
\end{aligned}$$

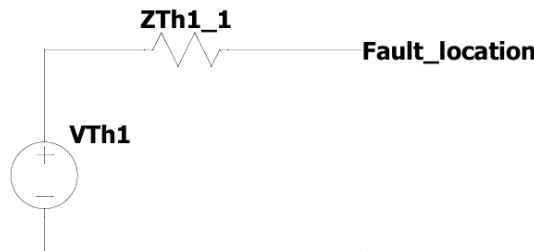
Και

$$\begin{aligned}
V_x &= V_y \frac{\frac{2}{mY_1}}{mZ_1 + \frac{2}{mY_1}} \Rightarrow \\
V_x &= V_y \frac{\frac{2}{mY_1}}{\frac{m^2Z_1Y_1 + 2}{mY_1}} \Rightarrow \\
V_x &= V_y \frac{2}{m^2Z_1Y_1 + 2} \quad (2.3)
\end{aligned}$$

Η σχέση (2.3) μέσω της σχέσης (2.2) γίνεται:

$$\begin{aligned}
V_{Th1} &= (\frac{2V_{G1}}{m^2Z_1Y_1 + 2}) \left[\frac{\frac{2Z_1 + \frac{4}{Y_1}}{Y_1 + m^2Y_1^2}}{\frac{4Z_{G1_1}}{mY_1} + mZ_1Z_{G1_1} + \frac{2Z_1}{Y_1} + \frac{4}{m^2Y_1^2}} \right] \Rightarrow \\
V_{Th1} &= (\frac{2V_{G1}}{m^2Z_1Y_1 + 2}) \left[\frac{\frac{2m^2Y_1Z_1 + 4}{m^2Y_1^2}}{\frac{4Z_{G1_1}}{mY_1} + mZ_1Z_{G1_1} + \frac{2Z_1}{Y_1} + \frac{4}{m^2Y_1^2}} \right] \Rightarrow \\
V_{Th1} &= (\frac{2V_{G1}}{m^2Z_1Y_1 + 2}) \left[\frac{m^2Y_1Z_1 + 2}{2m^2Y_1^2(\frac{4Z_{G1_1}}{mY_1} + mZ_1Z_{G1_1} + \frac{2Z_1}{Y_1} + \frac{4}{m^2Y_1^2})} \right] \Rightarrow \\
V_{Th1} &= \frac{2V_{G1}}{8mY_1Z_{G1_1} + 2m^3Y_1^2Z_1Z_{G1_1} + 4m^2Y_1Z_1 + 8} \quad (2.4)
\end{aligned}$$

Το απλοποιημένο εξ αριστερών κύκλωμα Thevenin είναι το παρακάτω:



Εικόνα 2.4: Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin θετικής ακολουθίας του δικτύου, αριστερά του σημείου σφάλματος.

2.2.2 Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin δεξιά του σημείου σφάλματος

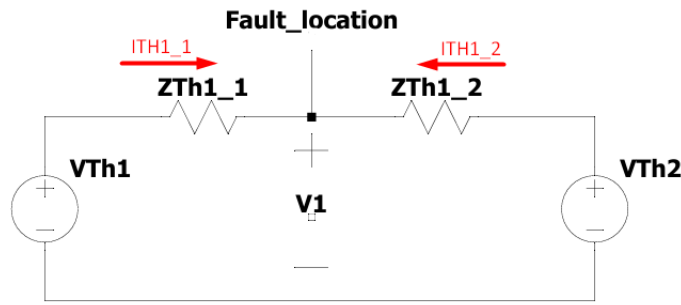
Εργαζόμαστε ομοίως με πριν για το εκ δεξιών κύκλωμα για να βρούμε την σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας δεξιά του σφάλματος. Ο δείκτης 2 στο τέλος του όρου Z_{Th1_2} συμβολίζει ότι βρισκόμαστε δεξιά του σφάλματος. Ο δείκτης 1 στο τέλος των υπόλοιπων όρων δηλώνει ότι πρόκειται για όρους θετικής ακολουθίας.

$$Z_{Th1_2} = \frac{\frac{2(2(1-m)Z_1 + (1-m)^2 Z_1 Y_1 Z_{G2_1} + 2Z_{G2_1})}{(2 + (1-m)Y_1 Z_{G2_1})(1-m)Y_1}}{\frac{2}{(1-m)Y_1} + \frac{2(1-m)Z_1 + (1-m)^2 Z_1 Y_1 Z_{G2_1} + 2Z_{G2_1}}{2 + (1-m)Y_1 Z_{G2_1}}} \quad (2.5)$$

Η τάση Thevenin δεξιά του σφάλματος ομοίως με την τάση Thevenin αριστερά του σφάλματος υπολογίζεται:

$$V_{Th2} = \frac{2V_{G2}}{8(1-m)Y_1 Z_{G2_1} + 2(1-m)^3 Y_1^2 Z_1 Z_{G2_1} + 4(1-m)^2 Y_1 Z_1 + 8} \quad (2.6)$$

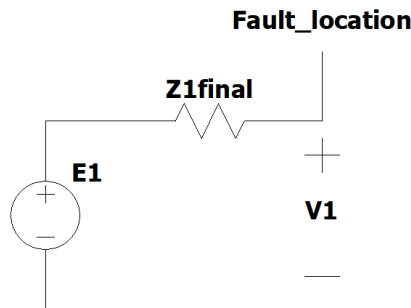
Μέχρι τώρα έχουμε κατασκευάσει το εξής κύκλωμα θετικής ακολουθίας:



Εικόνα 2.5: Ισοδύναμα κυκλώματα Thevenin θετικής ακολουθίας του δικτύου αριστερά και δεξιά του σημείου σφάλματος.

2.2.3 Τελική μορφή κυκλώματος θετικής ακολουθίας

Η επιθυμητή μορφή κυκλώματος θετικής ακολουθίας που θέλουμε να καταλήξουμε είναι η παρακάτω:



Εικόνα 2.6: Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin θετικής ακολουθίας του δικτύου.

Είναι φανερό πως η αντίσταση Z_{1final} ισούται με:

$$Z_{1final} = (Z_{Th1_1} // Z_{Th1_2}) = \frac{Z_{Th1_1} Z_{Th1_2}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} \quad (2.7)$$

ενώ η τάση E_1 από την Αρχή της Υπέρθωσης:

$$E_1 = V_{Th1} \frac{Z_{Th1_2}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} + V_{Th2} \frac{Z_{Th1_1}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} \quad (2.8)$$

2.3 Υπολογισμός των παραμέτρων του κυκλώματος αρνητικής ακολουθίας

Σε αυτήν την παράγραφο θα υπολογιστούν οι παράμετροι αρνητικής ακολουθίας δημιουργώντας τα ισοδύναμα κυκλώματα Thevenin εξ' αριστερών και εκ' δεξιών του σημείου σφάλματος.

2.3.1 Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin αριστερά του σημείου σφάλματος

Αρχικά θα υπολογιστεί η ισοδύναμη αντίσταση Thevenin αριστερά του σημείου σφάλματος. Ο δείκτης 1 στο τέλος του όρου Z_{Th2_1} συμβολίζει ότι βρισκόμαστε αριστερά του σφάλματος. Ο δείκτης 2 στο τέλος των υπόλοιπων όρων δηλώνει ότι πρόκειται για όρους αρνητικής ακολουθίας. Παρόμοια με την θετική ακολουθία βρίσκουμε ότι:

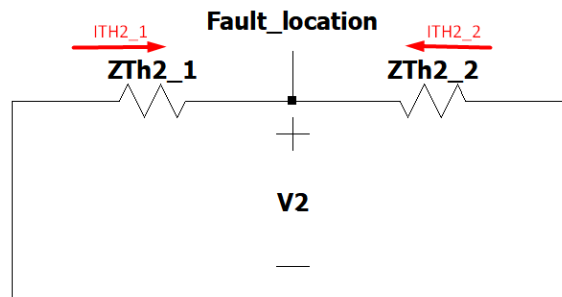
$$Z_{Th2_1} = \frac{\frac{2(2mZ_2 + m^2Z_2Y_2Z_{G1_2} + 2Z_{G1_2})}{(2+mY_2Z_{G1_2})mY_2}}{\frac{2}{mY_2} + \left(\frac{2mZ_2 + m^2Z_2Y_2Z_{G1_2} + 2Z_{G1_2}}{2+mY_2Z_{G1_2}}\right)} \quad (2.9)$$

2.3.2 Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin δεξιά του σημείου σφάλματος

Εργαζόμαστε ομοίως με πριν για το εκ δεξιών κύκλωμα για να βρούμε την σύνθετη αντίσταση αρνητικής ακολουθίας δεξιά του σφάλματος. Ο δείκτης 2 στο τέλος του όρου Z_{Th2_2} συμβολίζει ότι βρισκόμαστε δεξιά του σφάλματος. Ο δείκτης 2 στο τέλος των υπόλοιπων όρων δηλώνει ότι πρόκειται για όρους αρνητικής ακολουθίας.

$$Z_{Th2_2} = Z_{Th1_2} = \frac{\frac{2(2(1-m)Z_2 + (1-m)^2Z_2Y_2Z_{G2_2} + 2Z_{G2_2})}{(2+(1-m)Y_2Z_{G2_2})(1-m)Y_2}}{\frac{2}{(1-m)Y_2} + \left(\frac{2(1-m)Z_2 + (1-m)^2Z_2Y_2Z_{G2_2} + 2Z_{G2_2}}{2+(1-m)Y_2Z_{G2_2}}\right)} \quad (2.10)$$

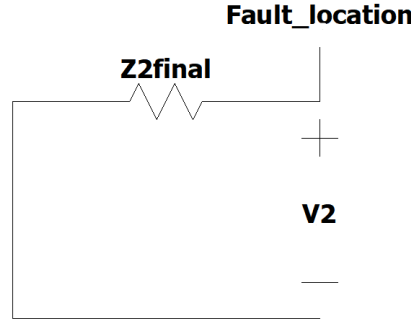
Μέχρι τώρα έχουμε κατασκευάσει το εξής κύκλωμα αρνητικής ακολουθίας:



Εικόνα 2.7: Ισοδύναμα κυκλώματα Thevenin αρνητικής ακολουθίας του δικτύου αριστερά και δεξιά του σημείου σφάλματος.

2.3.3 Τελική μορφή κυκλώματος αρνητικής ακολουθίας

Η τελική μορφή του κυκλώματος αρνητικής ακολουθίας είναι η παρακάτω:



Εικόνα 2.8: Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin αρνητικής ακολουθίας του δικτύου.

όπου σύνθετη αντίσταση αρνητικής ακολουθίας ισούται με:

$$Z_{2final} = \frac{Z_{Th2_1}Z_{Th2_2}}{Z_{Th2_1}+Z_{Th2_2}} = \frac{Z_{Th1_1}Z_{Th1_2}}{Z_{Th1_1}+Z_{Th1_2}} = Z_{1final} \quad (2.11)$$

ενώ το κύκλωμα αρνητικής ακολουθίας ως γνωστών δεν θα περιέχει πηγή τάσης

2.4 Υπολογισμός των παραμέτρων του κυκλώματος μηδενικής ακολουθίας

Σε αυτήν την παράγραφο θα υπολογιστούν οι παράμετροι μηδενικής ακολουθίας δημιουργώντας τα ισοδύναμα κυκλώματα Thevenin εξ 'αριστερών και εκ 'δεξιών του σημείου σφάλματος.

2.4.1 Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin αριστερά του σημείου σφάλματος

Αρχικά θα υπολογιστεί η ισοδύναμη αντίσταση Thevenin αριστερά του σημείου σφάλματος. Ο δείκτης 1 στο τέλος του όρου Z_{Th0_1} συμβολίζει ότι βρισκόμαστε αριστερά του σφάλματος. Ο δείκτης 0 στο τέλος των υπόλοιπων όρων δηλώνει ότι πρόκειται για όρους μηδενικής ακολουθίας. Παρόμοια με την θετική και αρνητική ακολουθία βρίσκουμε ότι:

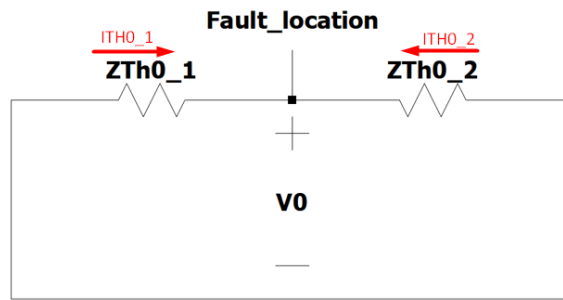
$$Z_{Th0_1} = \frac{\frac{2(2mZ_0+m^2Z_0Y_0Z_{G10}+2Z_{G10})}{(2+mY_0Z_{G10})mY_0}}{\frac{2}{mY_0}+(\frac{2mZ_0+m^2Z_0Y_0Z_{G10}+2Z_{G10}}{2+mY_0Z_{G10}})} \quad (2.12)$$

2.4.2 Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin δεξιά του σημείου σφάλματος

Εργαζόμαστε ομοίως με πριν για το εκ δεξιών κύκλωμα για να βρούμε την σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας δεξιά του σφάλματος. Ο δείκτης 2 στο τέλος του όρου Z_{Th0_2} συμβολίζει ότι βρισκόμαστε δεξιά του σφάλματος. Ο δείκτης 0 στο τέλος των υπόλοιπων όρων δηλώνει ότι πρόκειται για όρους μηδενικής ακολουθίας.

$$Z_{Th0_2} = \frac{\frac{2(2(1-m)Z_0+(1-m)^2Z_0Y_0Z_{G20}+2Z_{G20})}{(2+(1-m)Y_0Z_{G20})(1-m)Y_0}}{\frac{2}{(1-m)Y_1}+(\frac{2(1-m)Z_0+(1-m)^2Z_0Y_0Z_{G20}+2Z_{G20}}{2+(1-m)Y_0Z_{G20}})} \quad (2.13)$$

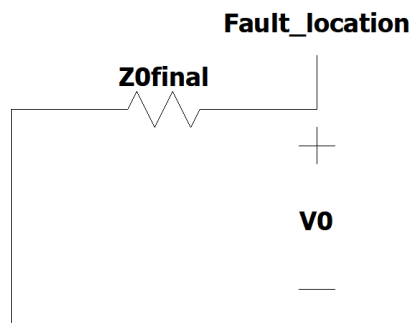
Μέχρι τώρα έχουμε κατασκευάσει το εξής κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας:



Εικόνα 2.9: Ισοδύναμα κυκλώματα Thevenin μηδενικής ακολουθίας του δικτύου αριστερά και δεξιά του σημείου σφάλματος.

2.4.3 Τελική μορφή κυκλώματος μηδενικής ακολουθίας

Η μορφή του κυκλώματος μηδενικής ακολουθίας είναι η παρακάτω:

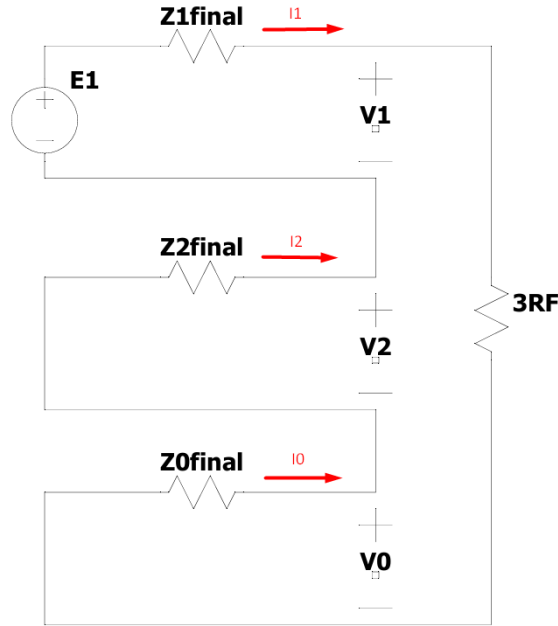


Εικόνα 2.10 : Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin μηδενικής ακολουθίας του δικτύου.

Η σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας ισούται με:

$$Z_{0final} = \frac{Z_{Th0_1} Z_{Th0_2}}{Z_{Th0_1} + Z_{Th0_2}} \quad (2.14)$$

ενώ το κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας ως γνωστών δεν θα περιέχει πηγή τάσης.

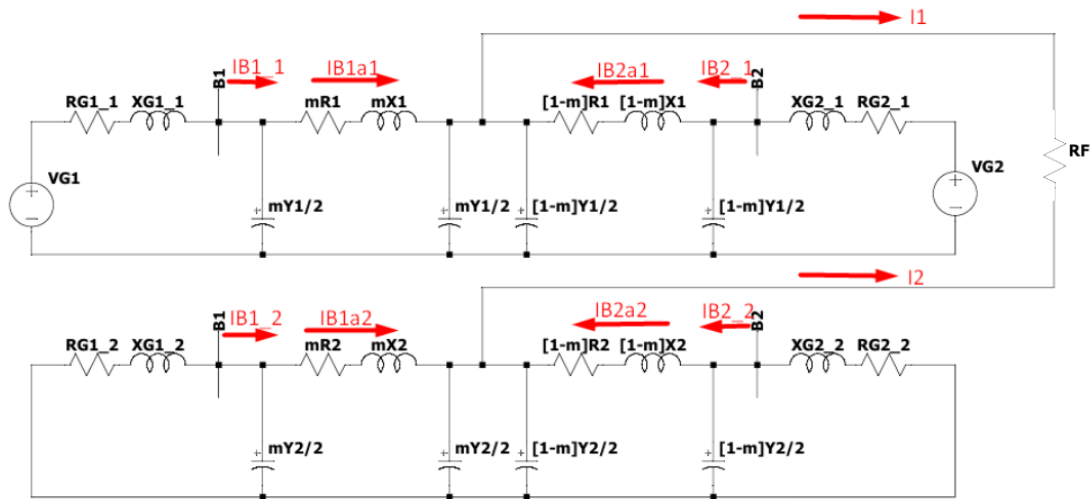


Εικόνα 3.2: Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας σε μονοφασικό προς γη σφάλμα.

3.2 Διφασικό βραχυκύκλωμα

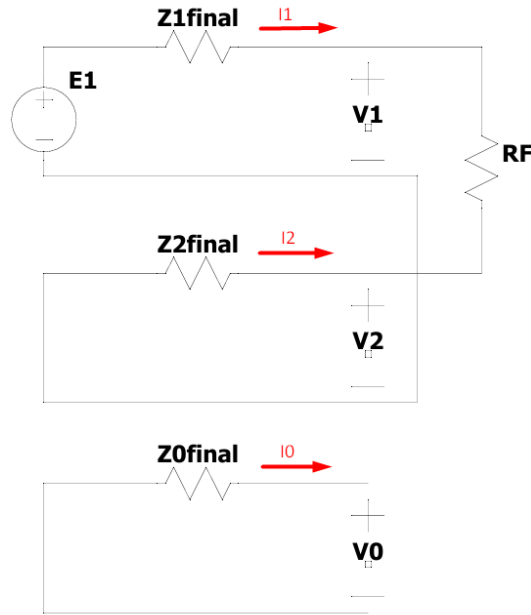
3.2.1 Διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη με αντίσταση σφάλματος R_F

Στην Εικόνα 2.3 παρουσιάζεται ένα διφασικό χωρίς γη βραχυκύκλωμα, με το δίκτυο στην αρχική του μορφή, που συμβαίνει σε απόσταση m από το άκρο αναχώρησης B1, με αντίσταση σφάλματος R_F .



Εικόνα 3.3: Διφασικό χωρίς γη βραχυκύκλωμα σε γραμμή μεταφοράς μεσαίου μήκους, κυκλώματος π , σε απόσταση m από το άκρο αναχώρησης B1.

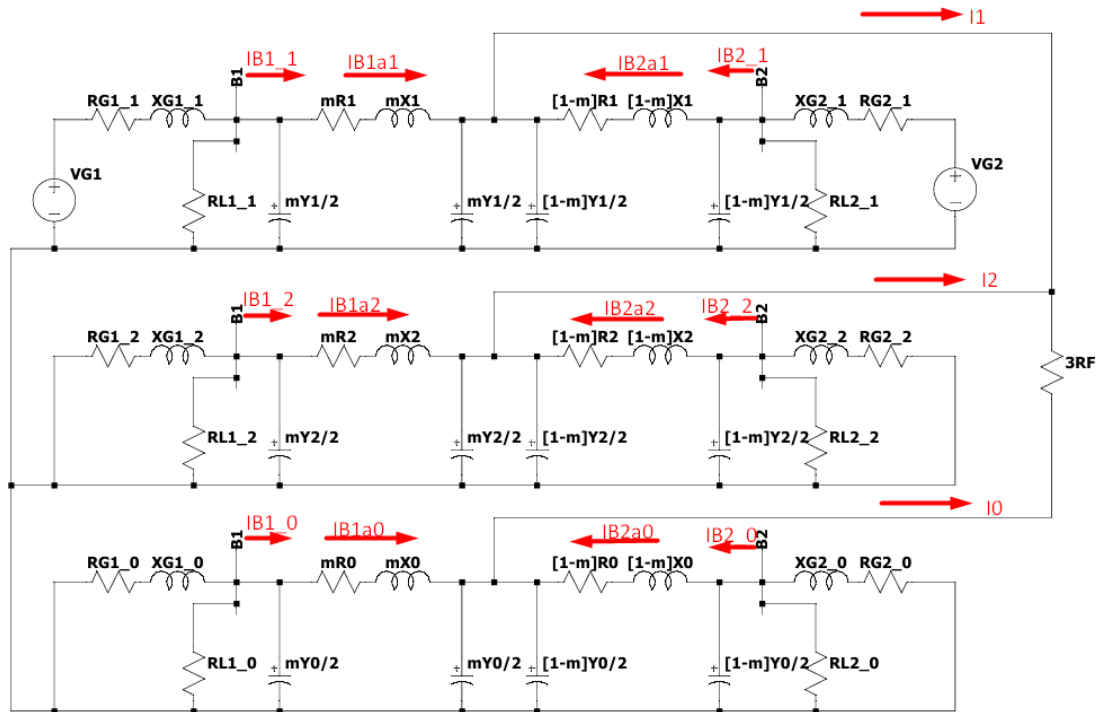
Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο διαμορφώνει το παρακάτω απλοποιημένο κύκλωμα:



Εικόνα 3.4: Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας σε διφασικό χωρίς γη σφάλμα.

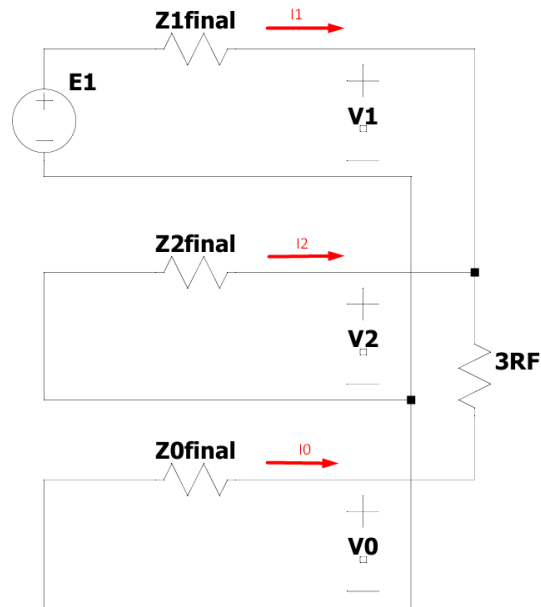
3.2.2 Διφασικό βραχυκύκλωμα προς γη με αντίσταση σφάλματος R_F

Στην Εικόνα 2.5 παρουσιάζεται ένα διφασικό προς γη βραχυκύκλωμα, με το δίκτυο στην αρχική του μορφή, που συμβαίνει σε απόσταση m από το άκρο αναχώρησης B1, με αντίσταση σφάλματος R_F .



Εικόνα 3.5: Διφασικό προς γη βραχυκύκλωμα σε γραμμή μεταφοράς μεσαίου μήκους, κυκλώματος π , σε απόσταση m από το άκρο αναχώρησης B1.

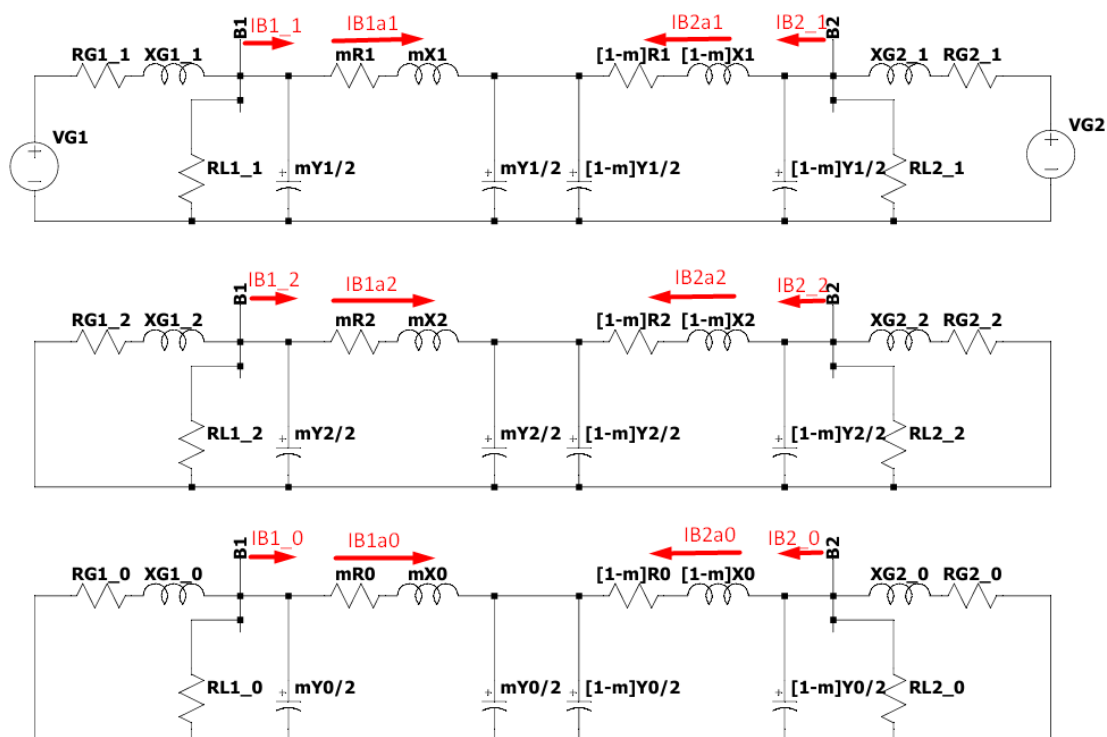
Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο διαμορφώνει το παρακάτω απλοποιημένο κύκλωμα:



Εικόνα 3.6: Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας σε διφασικό προς γη σφάλμα.

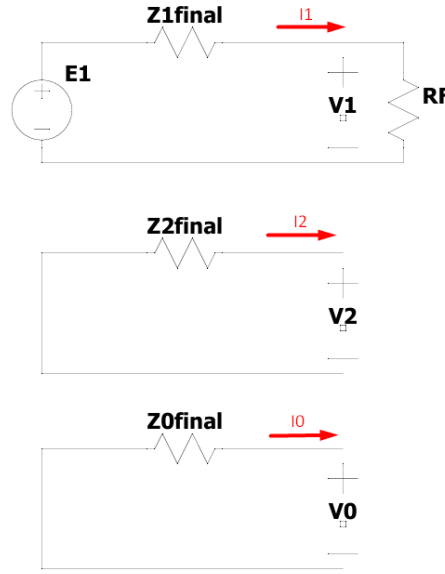
3.3 Τριφασικό βραχυκύκλωμα

Στην *Εικόνα 2.7* παρουσιάζεται ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα, με το δίκτυο στην αρχική του μορφή, που συμβαίνει σε απόσταση m από το άκρο αναχώρησης B1, με αντίσταση σφάλματος R_F . Τα κυκλώματα ακολουθίας είναι ασύνδετα μεταξύ τους.



Εικόνα 3.7: Τριφασικό βραχυκύκλωμα σε γραμμή μεταφοράς μεσαίου μήκους, κυκλώματος π , σε απόσταση m από το άκρο αναχώρησης $B1$.

Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο διαμορφώνει το παρακάτω απλοποιημένο κύκλωμα:



Εικόνα 3.8: Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας σε τριφασικό προς γη σφάλμα.

3.4 Υπολογισμός σύνθετης αντίστασης Z του ηλεκτρονόμου

Αρχικά, για κάθε είδος βραχυκυκλώματος, θα βρεθούν οι ακολουθιακές τάσεις και ρεύματα στη θέση του σφάλματος. Στην συνέχεια της μελέτης, με κατάλληλη κυκλωματική ανάλυση, θα υπολογιστούν οι τάσεις και τα ρεύματα στα σημεία αναχώρησης (ζυγός B1) και άφιξης (ζυγός B2) της γραμμής μεταφοράς, δηλαδή στα σημεία που τοποθετούνται οι ηλεκτρονόμοι.

3.4.1 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα – απαιτούμενοι υπολογισμοί

Στο μονοφασικό βραχυκύκλωμα τα τρία ακολουθιακά κυκλώματα συνδέονται εν σειρά. (Εικόνα 3.2) . Επομένως τα ακολουθιακά ρεύματα υπολογίζονται ως εξής:

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_{1final} + Z_{2final} + Z_{0final} + 3R_F} \quad (3.1)$$

$$I_2 = I_1 \quad (3.2)$$

$$I_0 = I_1 \quad (3.3)$$

Οπότε στο τριφασικό σύστημα τα ρεύματα στο σημείο βραχυκύκλωσης ευρίσκονται μέσω του πίνακα

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

$$I_{abcF} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Οι τάσεις ακολουθίας υπολογίζονται ως εξής:

$$V_1 = E_1 - I_1 Z_{1final} \quad (3.5)$$

$$V_2 = -I_2 Z_{2final} \quad (3.6)$$

$$V_0 = -I_0 Z_{0final} \quad (3.7)$$

Οπότε στο τριφασικό σύστημα οι φασικές τάσεις στο σημείο βραχυκύκλωσης ευρίσκονται μέσω του

$$\text{πίνακα } A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

$$V_{abcF} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

3.4.2 Διφασικό βραχυκύκλωμα– απαιτούμενοι υπολογισμοί

3.4.2.1 Διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη με αντίσταση σφάλματος R_F

Στο διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη, με βάση την σύνδεση των τριών ακολουθιακών κυκλωμάτων της Εικόνας 2.4, τα ακολουθιακά ρεύματα υπολογίζονται ως εξής:

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_{1final} + Z_{2final} + R_F} \quad (3.9)$$

$$I_2 = -I_1 \quad (3.10)$$

$$I_0 = 0 \quad (3.11)$$

Οπότε στο τριφασικό σύστημα τα ρεύματα στο σημείο βραχυκύκλωσης ευρίσκονται σύμφωνα με την σχέση (3.4):

$$I_{abcF} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

Οι τάσεις ακολουθίας υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις (3.5), (3.6) και (3.7):

$$V_1 = E_1 - I_1 Z_{1final}$$

$$V_2 = -I_2 Z_{2final}$$

$$V_0 = -I_0 Z_{0final}$$

Οπότε στο τριφασικό σύστημα οι φασικές τάσεις στο σημείο βραχυκύκλωσης ευρίσκονται σύμφωνα με την σχέση (3.8):

$$V_{abcF} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

3.4.2.2 Διφασικό βραχυκύκλωμα προς γη με αντίσταση σφάλματος R_F

Στο διφασικό βραχυκύκλωμα προς γη, με βάση την σύνδεση των τριών ακολουθιακών κυκλωμάτων της Εικόνας 3.6, τα ακολουθιακά ρεύματα υπολογίζονται ως εξής:

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_{1final} + Z_{2final} // (Z_{0final} + 3R_F)} \Rightarrow \quad (3.12)$$

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_{1final} + \frac{Z_{2final}(Z_{0final} + 3R_F)}{Z_{2final} + Z_{0final} + 3R_F}} \quad (3.12)$$

$$I_2 = -I_1 \frac{Z_{0final} + 3R_F}{Z_{0final} + Z_{1final} + 3R_F} \quad (3.13)$$

$$I_0 = -I_1 \frac{Z_{2final}}{Z_{0final} + Z_{1final} + 3R_F} \quad (3.14)$$

Οπότε στο τριφασικό σύστημα τα ρεύματα στο σημείο βραχυκύκλωσης ευρίσκονται σύμφωνα με την σχέση (3.4):

$$I_{abcF} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

Οι τάσεις ακολουθίας υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις (3.5), (3.6) και (3.7):

$$\begin{aligned} V_1 &= E_1 - I_1 Z_{1final} \\ V_2 &= -I_2 Z_{2final} \\ V_0 &= -I_0 Z_{0final} \end{aligned}$$

Οπότε στο τριφασικό σύστημα οι φασικές τάσεις στο σημείο βραχυκύκλωσης ευρίσκονται σύμφωνα με την σχέση (3.8):

$$V_{abcF} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

3.4.3 Τριφασικό βραχυκύκλωμα– απαιτούμενοι υπολογισμοί

Στο τριφασικό βραχυκύκλωμα προς γη ή χωρίς γη, με βάση την σύνδεση των τριών ακολουθιακών κυκλωμάτων της Εικόνας 3.8, τα ακολουθιακά ρεύματα υπολογίζονται ως εξής:

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_{1final} + R_F} \quad (3.15)$$

$$I_2 = 0 \quad (3.16)$$

$$I_0 = 0 \quad (3.17)$$

Οπότε στο τριφασικό σύστημα τα ρεύματα στο σημείο βραχυκύκλωσης ευρίσκονται σύμφωνα με την σχέση (3.4):

$$I_{abcF} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

Οι τάσεις ακολουθίας υπολογίζονται ως εξής:

$$V_1 = E_1 - I_1 Z_{1final} = I_1 R_F \quad (3.18)$$

$$V_2 = 0 \quad (3.19)$$

$$V_0 = 0 \quad (3.20)$$

Οπότε στο τριφασικό σύστημα οι φασικές τάσεις στο σημείο βραχυκύκλωσης ευρίσκονται σύμφωνα με την σχέση (3.8):

$$V_{abcF} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

Τώρα με βάση τις ακολουθιακές τάσεις και ρεύματα στη θέση του σφάλματος θα υπολογιστούν οι τάσεις και τα ρεύματα στα σημεία αναχώρησης (ζυγός B1) και άφιξης (ζυγός B2) της γραμμής μεταφοράς, δηλαδή στα σημεία που τοποθετούνται οι ηλεκτρονόμοι. Για να επιτευχθεί αυτό είναι αναγκαία η κυκλωματική ανάλυση εσωτερικά των ακολουθιακών κυκλωμάτων σύμφωνα με τους νόμους του Kirchhoff. Η παρακάτω ανάλυση είναι κοινή για όλα τα είδη των βραχυκυκλωμάτων.

Από διαίρεση ρεύματος στο σημείο βραχυκύκλωσης και με βάση τα αναγραφόμενα ρεύματα στις Εικόνες 3.1, 3.3, 3.5, 3.7 έχουμε για τα τρία ακολουθιακά κυκλώματα αντίστοιχα:

- Θετική Ακολουθία

$$I_{Th1_1} = I_1 \left(\frac{Z_{Th1_2}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} \right) + \frac{V_{Th1} - V_{Th2}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} \quad (3.21)$$

Έχει εφαρμοστεί η Αρχή της Υπέρθεσης για το κύκλωμα χωρίς πηγές (πρώτος όρος) και παρουσία πηγών (δεύτερος όρος). Ομοίως για το ρεύμα δεξιά του σφάλματος:

$$I_{Th1_2} = I_1 \left(\frac{Z_{Th1_1}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} \right) + \frac{V_{Th2} - V_{Th1}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} \quad (3.22)$$

- Αρνητική Ακολουθία

$$I_{Th2_1} = I_2 \left(\frac{Z_{Th2_2}}{Z_{Th2_1} + Z_{Th2_2}} \right) \quad (3.23)$$

$$I_{Th2_2} = I_2 \left(\frac{Z_{Th2_1}}{Z_{Th2_1} + Z_{Th2_2}} \right) \quad (3.24)$$

- Μηδενική Ακολουθία

$$I_{Th0_1} = I_0 \left(\frac{Z_{Th0_2}}{Z_{Th0_1} + Z_{Th0_2}} \right) \quad (3.25)$$

$$I_{Th0_2} = I_0 \left(\frac{Z_{Th0_1}}{Z_{Th0_1} + Z_{Th0_2}} \right) \quad (3.26)$$

Εισχωρώντας βαθύτερα στα κυκλώματα:

- Θετική Ακολουθία

$$I_{B1a1} = I_{Th1_1} + \frac{V_1 m Y_1}{2} \quad (3.27)$$

$$I_{B2a1} = I_{Th1_2} + \frac{V_2 (1-m) Y_1}{2} \quad (3.28)$$

- Αρνητική Ακολουθία

$$I_{B1a2} = I_{Th2_1} + \frac{V_2 m Y_2}{2} \quad (3.29)$$

$$I_{B2a2} = I_{Th2_2} + \frac{V_2 (1-m) Y_2}{2} \quad (3.30)$$

- Μηδενική Ακολουθία

$$I_{B1a0} = I_{Th0_1} + \frac{V_0 m Y_0}{2} \quad (3.31)$$

$$I_{B2a0} = I_{Th0_2} + \frac{V_0 (1-m) Y_0}{2} \quad (3.32)$$

Τέλος, φθάνοντας στους ζυγούς B1 και B2, οι τάσεις ακολουθίας:

- Θετική Ακολουθία

$$V_{B1_1} = V_1 + m Z_1 I_{B1a1} \quad (3.33)$$

$$V_{B2_1} = V_1 + (1-m) Z_1 I_{B2a1} \quad (3.34)$$

- Αρνητική Ακολουθία

$$V_{B1_2} = V_2 + m Z_2 I_{B1a2} \quad (3.35)$$

$$V_{B2_2} = V_2 + (1-m) Z_2 I_{B2a2} \quad (3.36)$$

- Μηδενική Ακολουθία

$$V_{B1_0} = V_0 + m Z_0 I_{B1a0} \quad (3.37)$$

$$V_{B2_0} = V_0 + (1-m) Z_0 I_{B2a0} \quad (3.38)$$

Ενώ τα ρεύματα ακολουθίας στους B1 και B2:

- Θετική Ακολουθία

$$I_{B1_1} = I_{B1a1} + \frac{V_{B1_1}mY_1}{2} \quad (3.39)$$

$$I_{B2_1} = I_{B2a1} + \frac{V_{B2_1}(1-m)Y_1}{2} \quad (3.40)$$

- Αρνητική Ακολουθία

$$I_{B1_2} = I_{B1a2} + \frac{V_{B1_2}mY_2}{2} \quad (3.41)$$

$$I_{B2_2} = I_{B2a2} + \frac{V_{B2_2}(1-m)Y_2}{2} \quad (3.42)$$

- Μηδενική Ακολουθία

$$I_{B1_0} = I_{B1a0} + \frac{V_{B1_0}mY_0}{2} \quad (3.43)$$

$$I_{B2_0} = I_{B2a0} + \frac{V_{B2_0}(1-m)Y_0}{2} \quad (3.44)$$

Επομένως συγκεντρωτικά οι φασικές τάσεις και ρεύματα του τριφασικού συστήματος, για όλα τα είδη σφαλμάτων, στις θέσεις των ζυγών B1 και B2 προκύπτουν:

- Ζυγός B1

$$\begin{bmatrix} V_{B1_a} \\ V_{B1_b} \\ V_{B1_c} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_{B1_0} \\ V_{B1_1} \\ V_{B1_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{B1_0} \\ V_{B1_1} \\ V_{B1_2} \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

$$\begin{bmatrix} I_{B1_a} \\ I_{B1_b} \\ I_{B1_c} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} I_{B1_0} \\ I_{B1_1} \\ I_{B1_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{B1_0} \\ I_{B1_1} \\ I_{B1_2} \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

- Ζυγός B2

$$\begin{bmatrix} V_{B2_a} \\ V_{B2_b} \\ V_{B2_c} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_{B2_0} \\ V_{B2_1} \\ V_{B2_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{B2_0} \\ V_{B2_1} \\ V_{B2_2} \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

$$\begin{bmatrix} I_{B2_a} \\ I_{B2_b} \\ I_{B2_c} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} I_{B2_0} \\ I_{B2_1} \\ I_{B2_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{B2_0} \\ I_{B2_1} \\ I_{B2_2} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

3.4.4 Τελικές τιμές σύνθετων αντιστάσεων

Οι παρακάτω τιμές θα υπολογιστούν για όλα τα παραπάνω είδη βραχυκυκλωμάτων.

- Σύνθετες αντιστάσεις πολικών τάσεων και ρευμάτων
Στον ζυγό B1, ο ηλεκτρονόμος υπολογίζει:

$$Z_{ab_{B1}} = \frac{V_{B1_a} - V_{B1_b}}{I_{B1_a} - I_{B1_b}} \quad (3.49)$$

$$Z_{bc_{B1}} = \frac{V_{B1_b} - V_{B1_c}}{I_{B1_b} - I_{B1_c}} \quad (3.50)$$

$$Z_{ca_{B1}} = \frac{V_{B1_c} - V_{B1_a}}{I_{B1_c} - I_{B1_a}} \quad (3.51)$$

ενώ στον ζυγό B2:

$$Z_{ab_{B2}} = \frac{V_{B2_a} - V_{B2_b}}{I_{B2_a} - I_{B2_b}} \quad (3.52)$$

$$Z_{bc_{B2}} = \frac{V_{B2_b} - V_{B2_c}}{I_{B2_b} - I_{B2_c}} \quad (3.53)$$

$$Z_{ca_{B2}} = \frac{V_{B2_c} - V_{B2_a}}{I_{B2_c} - I_{B2_a}} \quad (3.54)$$

ο Σύνθετες αντιστάσεις φασικών τάσεων και ρευμάτων

Θα χρειαστεί να οριστεί ο λεγόμενος Compensation Factor k_0 , ο οποίος εξαρτάται από τις σύνθετες αντιστάσεις θετικής και μηδενικής ακολουθίας της γραμμής μεταφοράς. Συγκεκριμένα:

$$k_0 = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \quad (2.55)$$

Έχοντας υπολογίσει τον Compensation Factor και γνωρίζοντας ότι το ρεύμα του ουδετέρου ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα των ρευμάτων των φάσεων a, b και c, τελικά στον ζυγό B1, ο ηλεκτρονόμος υπολογίζει:

$$Z_{a_{B1}} = \frac{V_{B1_a}}{I_{B1_a} + k_0 I_n} = \frac{V_{B1_a}}{I_{B1_a} + k_0 (I_{B1_a} + I_{B1_b} + I_{B1_c})} \quad (3.56)$$

$$Z_{b_{B1}} = \frac{V_{B1_b}}{I_{B1_b} + k_0 (I_{B1_a} + I_{B1_b} + I_{B1_c})} \quad (3.57)$$

$$Z_{c_{B1}} = \frac{V_{B1_c}}{I_{B1_c} + k_0 (I_{B1_a} + I_{B1_b} + I_{B1_c})} \quad (3.58)$$

ενώ στον ζυγό B2 ομοίως:

$$Z_{a_{B2}} = \frac{V_{B2_a}}{I_{B2_a} + k_0 (I_{B2_a} + I_{B2_b} + I_{B2_c})} \quad (3.59)$$

$$Z_{b_{B2}} = \frac{V_{B2_b}}{I_{B2_b} + k_0 (I_{B2_a} + I_{B2_b} + I_{B2_c})} \quad (3.60)$$

$$Z_{c_{B2}} = \frac{V_{B2_c}}{I_{B2_c} + k_0 (I_{B2_a} + I_{B2_b} + I_{B2_c})} \quad (3.61)$$

ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΕΡΟΣ: Προσομοίωση βραχυκυκλωμάτων όλων των ειδών στο προγραμματιστικό περιβάλλον Simulink

4ο Κεφάλαιο

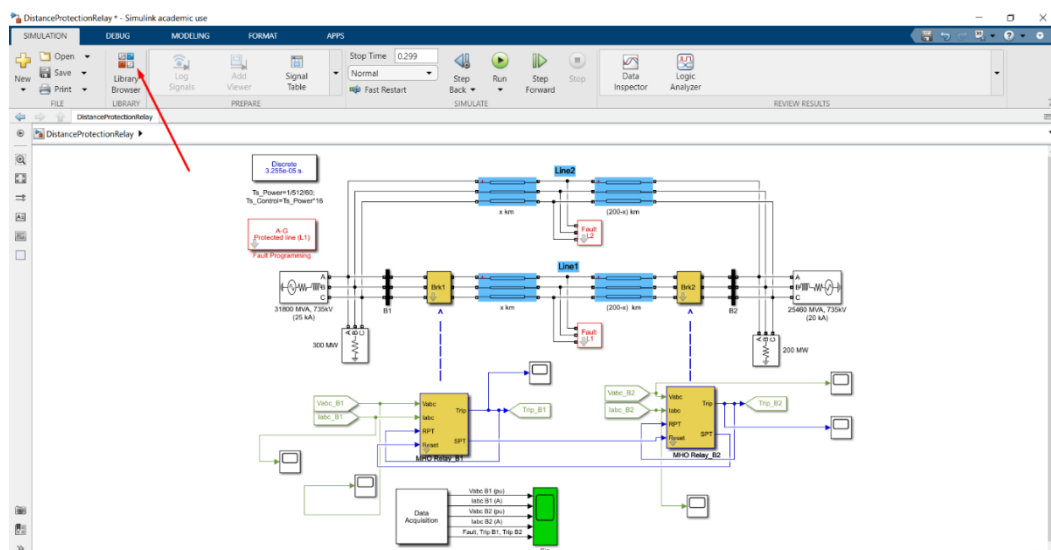
Υλοποίηση εκτελέσιμου αρχείου στο Simulink

4.1 Εισαγωγή

Χρησιμοποιώντας το προγραμματιστικό εργαλείο Simulink, είναι εφικτό να δημιουργηθεί ένα τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας δυο ζυγών, να προσομοιωθούν όλα τα πιθανά είδη βραχυκυκλωμάτων στην γραμμή του και ταυτόχρονα να παρακολουθηθεί η λειτουργία των προστατευτικών ηλεκτρονόμων που χρησιμοποιούνται για την προστασία του.

4.2 Solver

Το πρώτο Block που θα πρέπει να προστεθεί αφορά τον solver της προσομοίωσης μας. Ανοίγοντας τον Library Browser,



Εικόνα 4.1: Εύρεση του “Library Browser” από την επιφάνεια εργασίας.

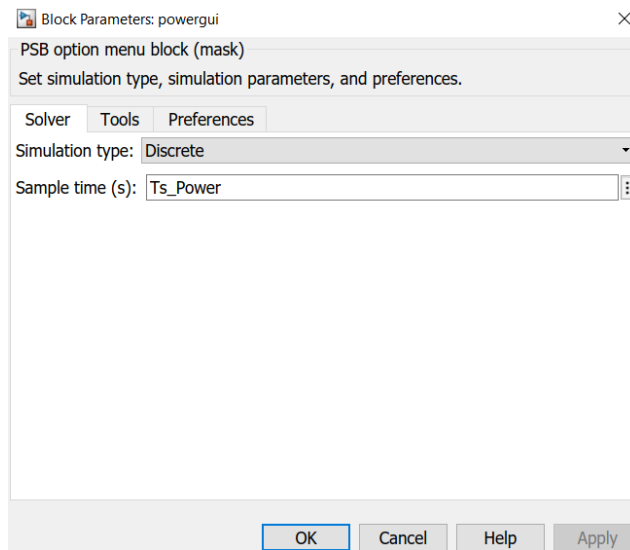
Ακολουθούμε την εξής πορεία: Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Fundamental Blocks. Από τα εμφανιζόμενα blocks επιλέγουμε το powergui και το σύρουμε στην αρχική οθόνη του αρχείου Simulink.



Εικόνα 4.2: “Powergui” block.

Κάνοντας διπλό κλικ πάνω του μπορούμε να δηλώσουμε τη μέθοδο επίλυσης του προβλήματος μας. Επιλέγουμε Discrete (επίλυση με μέθοδο διακριτού χρόνου) και ορίζουμε τον χρόνο

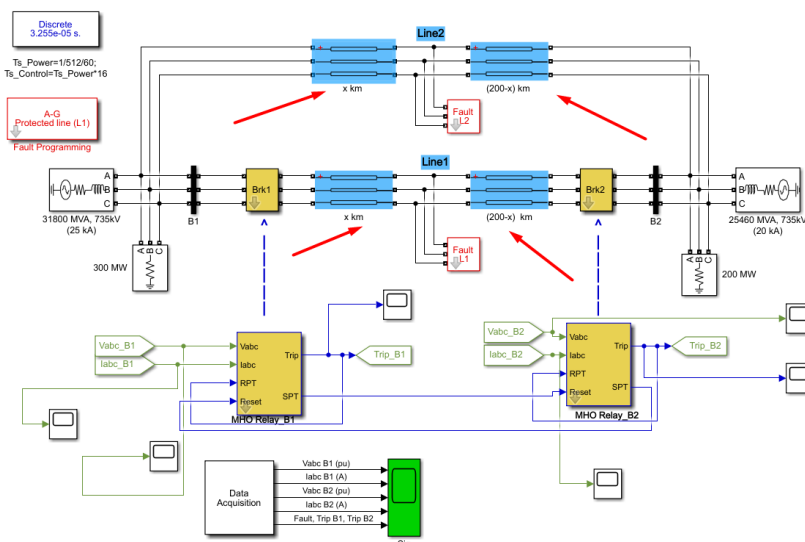
δειγματοληψίας που επιθυμούμε. Εν προκειμένω επιλέγεται η Ts_Power η οποία έχει ορισθεί στο Matlab και ισούται με $3.2552083333333333 \times 10^{-5}$ second.



Εικόνα 4.3: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Powergui” block.

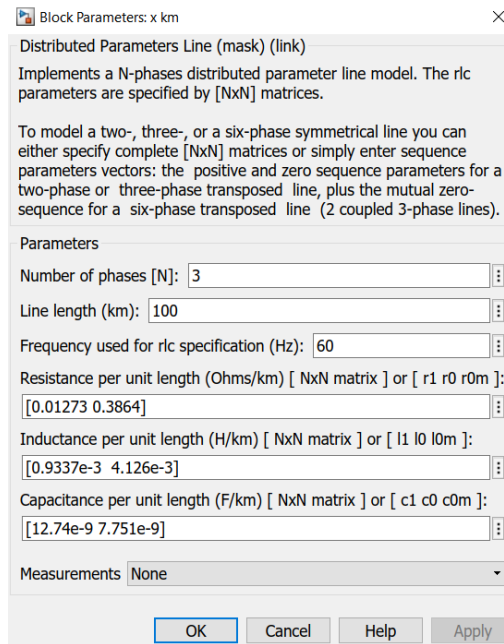
4.3 Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Στο σύστημα μας θα τοποθετήσουμε δύο παράλληλες γραμμές μεταφοράς οι οποίες δεν θα είναι ενιαίες. Η κάθε μια θα χωρίζεται σε δυο μέρη ώστε στη σύνδεσή τους να εισαγάγουμε το επιθυμητό σφάλμα. Επομένως, πατάμε τον Library Browser και εισάγουμε τέσσερις φορές από την διαδρομή Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Fundamental Blocks / Elements το στοιχείο “Distributed Parameters Line”.



Εικόνα 4.4: Block των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

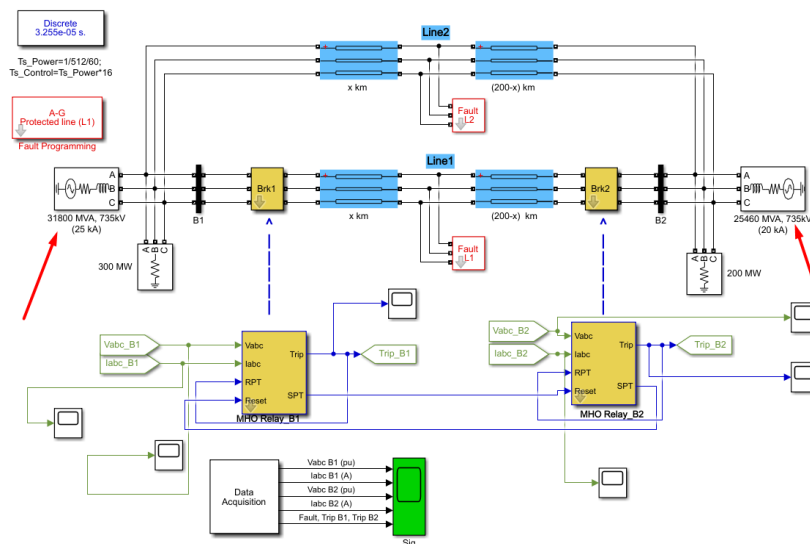
Με διπλό κλικ πάνω τους μπορούμε να εισάγουμε τα δεδομένα που επιθυμούμε.



Εικόνα 4.5: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων των block των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

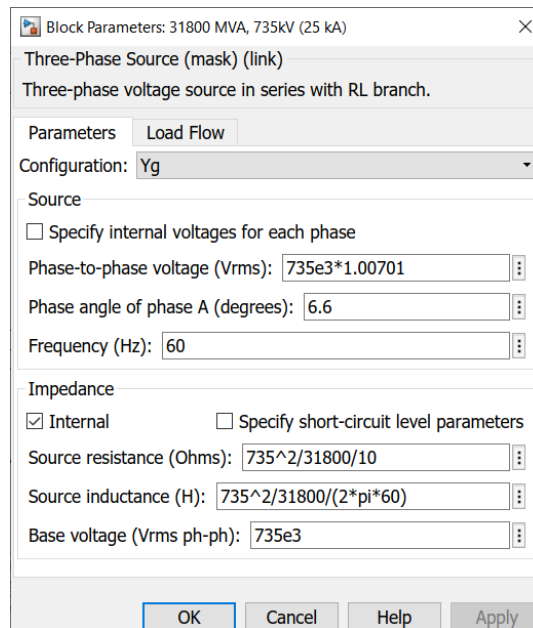
4.4 Τριφασικές πηγές τάσης

Οι τριφασικές πηγές τάσης εισάγονται από την διαδρομή Library Browser/Simscap / Electrical / Specialized Power Systems / Fundamental Blocks / Electrical Sources και επιλογή στο block “Three-Phase Source”.



Εικόνα 4.6: Block των τριφασικών πηγών τάσεων.

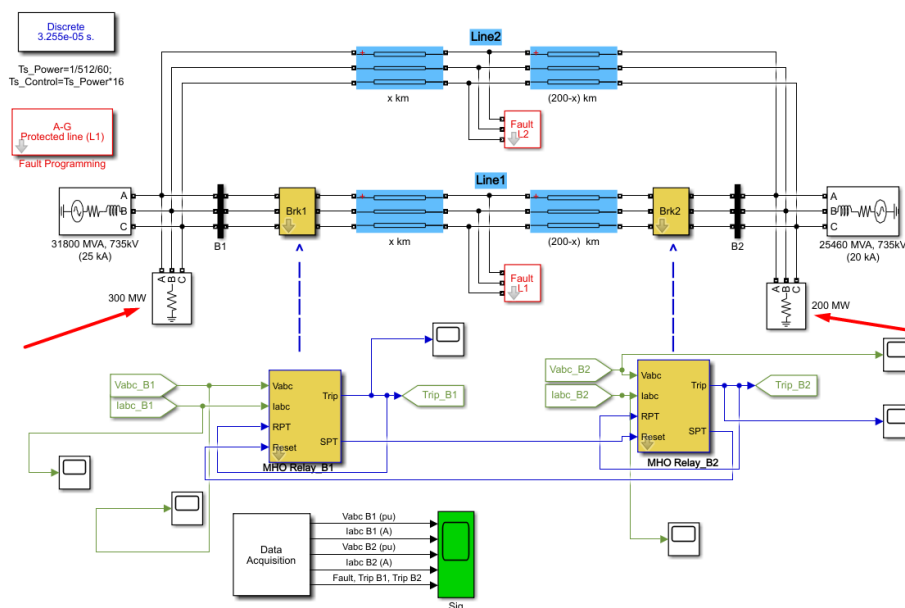
Με διπλό κλικ πάνω τους μπορούμε να εισάγουμε τα δεδομένα που επιθυμούμε.



Εικόνα 4.7: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων των block των τριφασικών πηγών τάσεων.

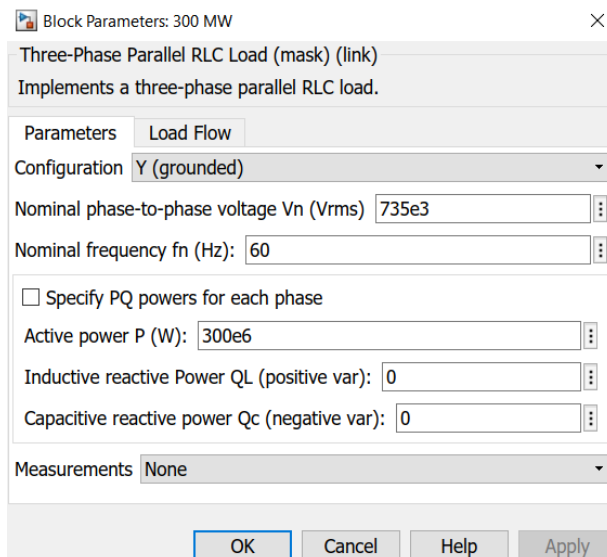
4.5 Τριφασικά φορτία

Ομοίως, τα τριφασικά φορτία εισάγονται από την διαδρομή Library Browser/Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Fundamental Blocks / Elements και επιλογή στο block “Three-Phase Parallel RLC Load”.



Εικόνα 4.8: Block των τριφασικών φορτίων.

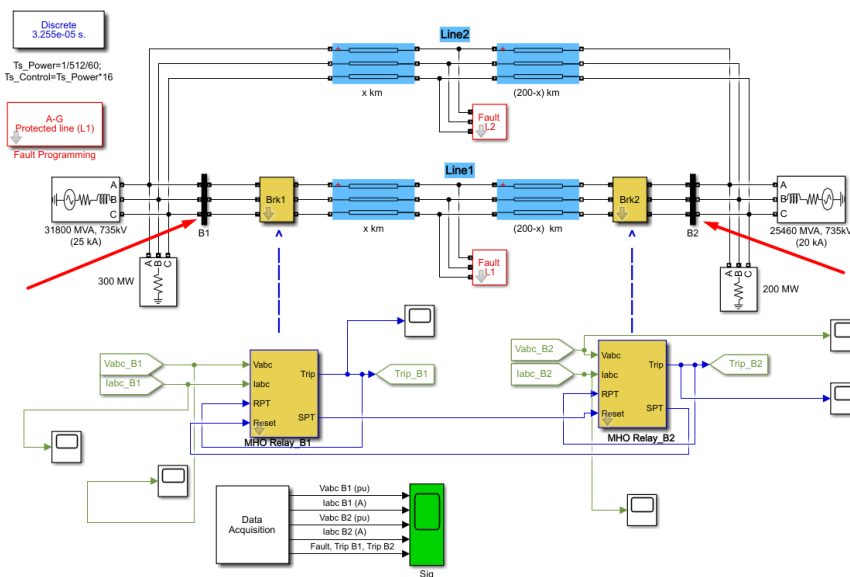
Με διπλό κλικ πάνω τους μπορούμε να εισάγουμε τα δεδομένα που επιθυμούμε.



Εικόνα 4.9: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων των block των τριφασικών φορτίων.

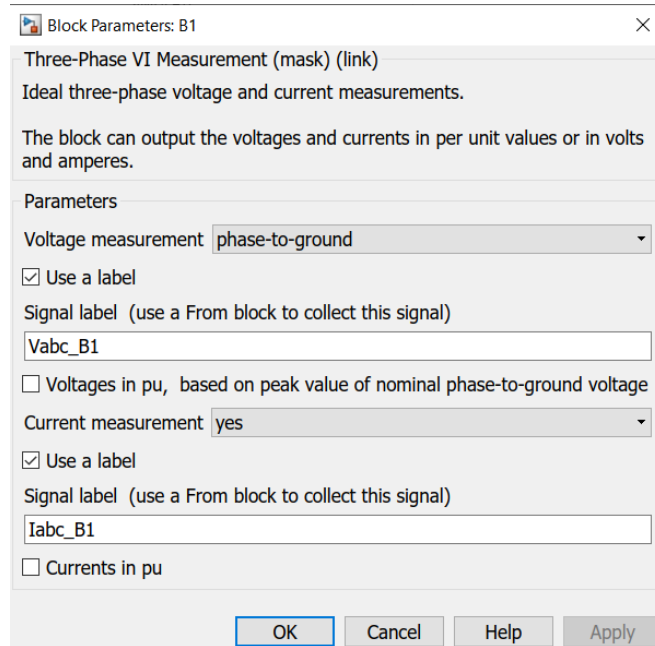
4.6 Ζυγοί

Οι ζυγοί B1 και B2 είναι blocks είναι μετρητές που παρακολουθούν και καταχωρούν τις στιγμιαίες τριφασικές τάσεις και ρεύματα στις μεταβλητές Vabc_B1, Vabc_B2, Iabc_B1 και Iabc_B2 αντίστοιχα. Αυτά τα block μπορούν να εισαχθούν από την διαδρομή Library Browser / Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Fundamental Blocks / Measurements και επιλογή του “Three-Phase V-I Measurement”.



Εικόνα 4.10: Block των ζυγών “B1” και “B2”.

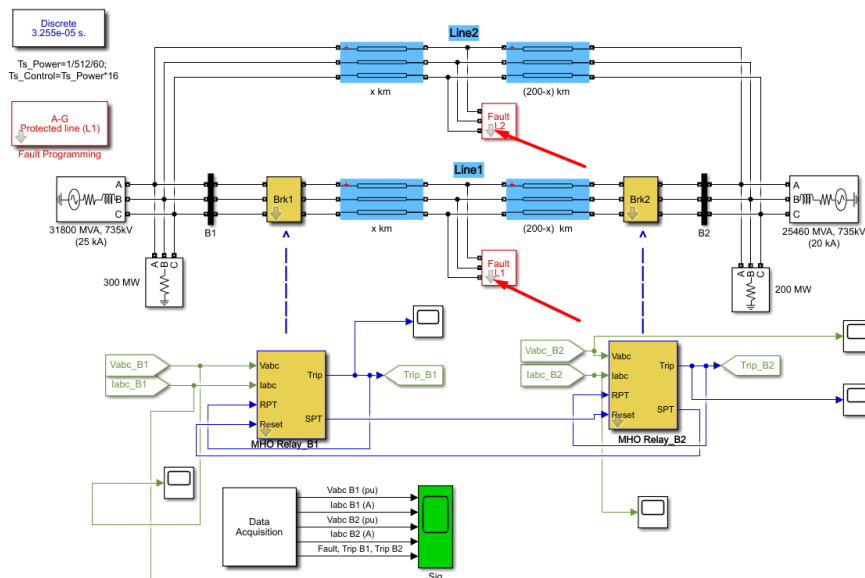
Με διπλό κλικ πάνω τους μπορούμε να εισάγουμε τα δεδομένα που επιθυμούμε.



Εικόνα 4.11: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων των block των ζυγών “B1” και “B2”.

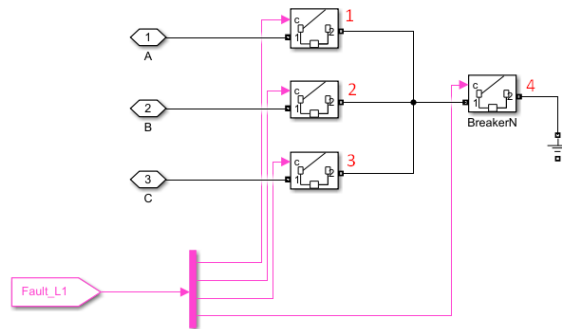
4.7 Σφάλμα

Τώρα θα γίνει μια προσπάθεια να μοντελοποιηθούν τα διάφορα πιθανά σφάλματα στις δύο γραμμές μεταφοράς Line 1 και Line 2. Και για τις δύο γραμμές η ανάλυση είναι παρόμοια. Πατώντας στο βέλος “Look inside mask” στο κάτω αριστερά μέρος του block “Fault L1” (και “Fault L2” αντίστοιχα),



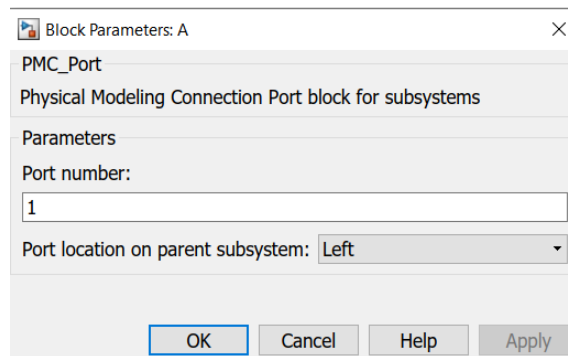
Εικόνα 4.12: Block σφαλμάτων σε κύρια και παράλληλη γραμμή μεταφοράς.

ανοίγεται το υποσύστημα:



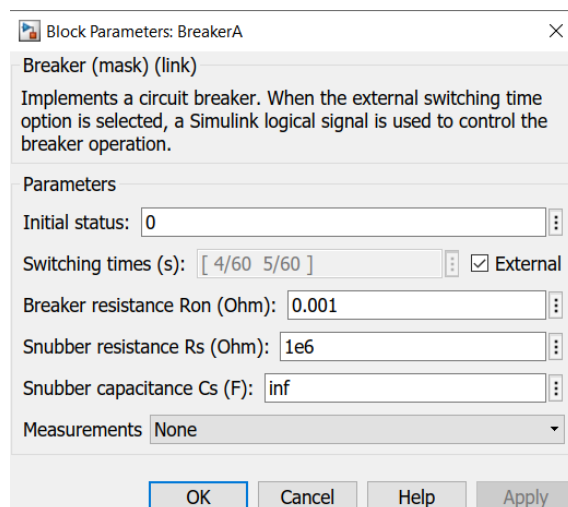
Εικόνα 4.13: Εσωτερικό υποσύστημα των block σφαλμάτων σε κύρια και παράλληλη γραμμή μεταφοράς.

Τα στοιχεία A, B και C αποτελούν τις τρεις φάσεις του ηλεκτρικού δικτύου μας. Έχουν εισαχθεί στο υποσύστημα ως μέσο επικοινωνίας με τις τρεις φάσεις του κύριου συστήματος. Αυτή την ιδιότητα την έχουν τα στοιχεία “Connection Port” τα οποία εισάγονται από την διαδρομή Library Browser/ Simscape / Utilities και επιλογή “Connection Port”. Με διπλό κλικ επιλέγουμε το port που θέλουμε να αντιστοιχίσουμε.



Εικόνα 4.14: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων των “PMC_Port” blocks των block σφαλμάτων σε κύρια και παράλληλη γραμμή μεταφοράς.

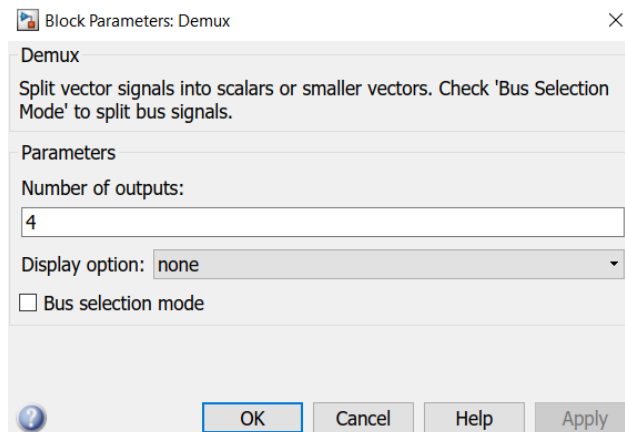
Τα blocks 1, 2, 3 και 4 που απεικονίζονται είναι ελεγχόμενοι διακόπτες εισαγόμενοι από την διαδρομή Library Browser / Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Fundamental Blocks / Elements και επιλογή του block “Breaker”. Με διπλό κλικ ορίζουμε τα φυσικά του χαρακτηριστικά.



Εικόνα 4.15: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων των “Breaker” blocks των block σφαλμάτων σε κύρια και παράλληλη γραμμή μεταφοράς.

Η γείωση που συνδέεται στον τέταρτο διακόπτη εισάγεται ως εξής: Library Browser / Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Fundamental Blocks / Elements και επιλογή “Ground” και προσομοιάζει την φυσική γη.

Ο αποπλέκτης (demux) 1 σε 4 εισάγεται από την διαδρομή Library Browser/ Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Demux”. Με διπλό κλικ ορίζεται το πλήθος των εξόδων του.



Εικόνα 4.16: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Demux” block των block σφαλμάτων σε κύρια και παράλληλη γραμμή μεταφοράς.

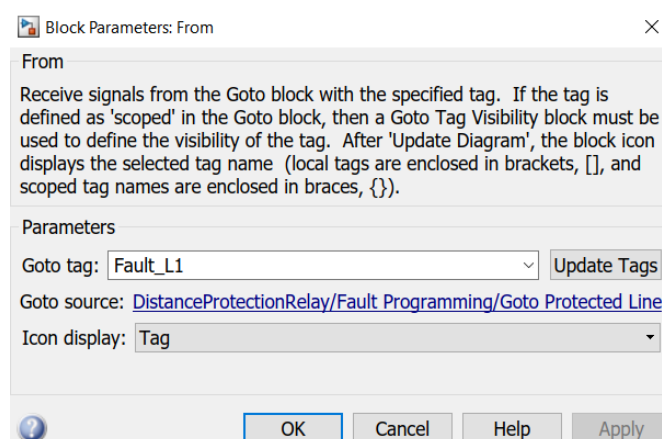
Στην είσοδο του δέχεται ως σήμα έναν ελεγχόμενο μοναδιαίο τετραγωνικό παλμό ενεργοποίησης “Fault_L1” (ή “Fault_L2” αντίστοιχα).

Οι τέσσερις εξοδοί του αποτελούν τα σήματα ελέγχου (control) των διακοπών 1, 2, 3 και 4.

Συγκεκριμένα, η λογική της παραπάνω υλοποίησης είναι ότι για σφάλμα :

1. Μονοφασικό προς γη A-G: Θα κλείσουν οι διακόπτες 1 και 4.
2. Διφασικό B-C: Θα κλείσουν οι διακόπτες 2 και 3.
3. Διφασικό προς γη B-C-G: Θα κλείσουν οι διακόπτες 2, 3 και 4.
4. Τριφασικό A-B-C: Θα κλείσουν οι διακόπτες 1, 2 και 3.
5. Τριφασικό προς γη A-B-C-G: Θα κλείσουν οι διακόπτες 1, 2, 3 και 4.

Το σήμα ελέγχου “Fault_L1” (και το “Fault_L2” για την παράλληλη γραμμή αντίστοιχα) είναι ένα “From block” εισαγόμενο από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Signal Routing και επιλογή “From”, το οποίο δέχεται είσοδο ή αλλιώς ελέγχεται από το ορισμένο “Go to” block του. Με διπλό κλικ πάνω του:

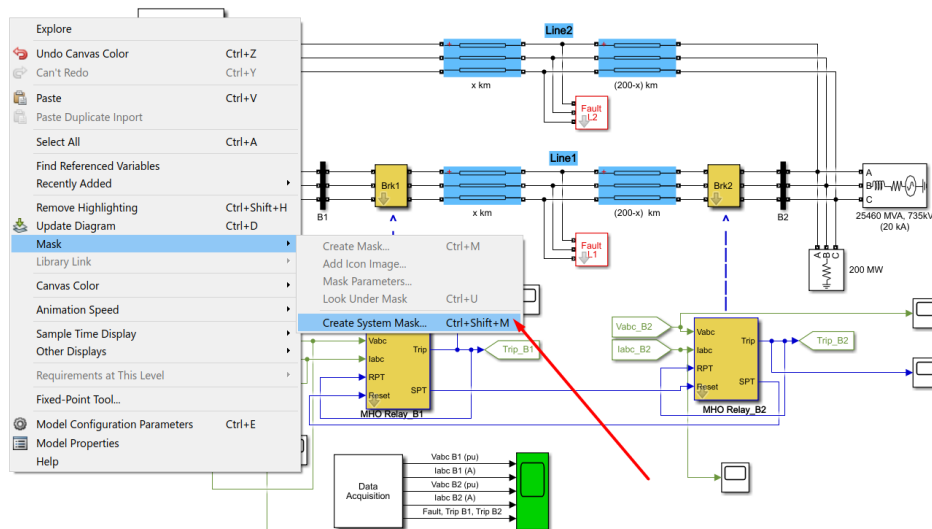


Εικόνα 4.17: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “From” block των block σφαλμάτων σε κύρια και παράλληλη γραμμή μεταφοράς.

Το “Go to” block του “Fault_L1” θα αναλυθεί με λεπτομέρεια αργότερα.

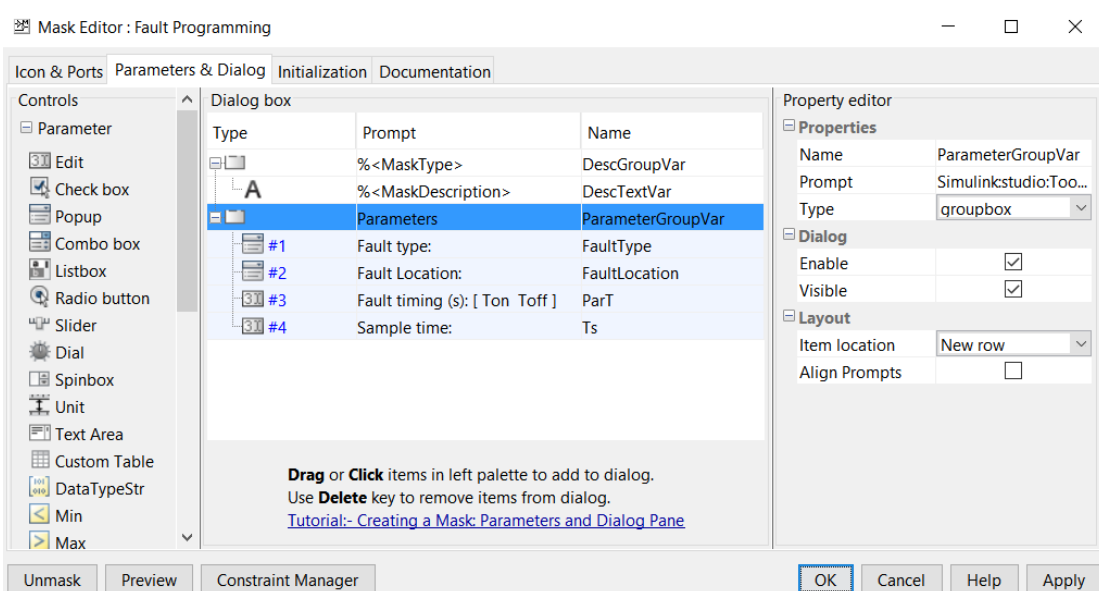
Για να προσομοιωθεί το σφάλμα που επιθυμεί ο χρήστης θα πρέπει να δημιουργηθεί ένα block που θα δέχεται ως μεταβλητές τον τύπο του σφάλματος “Fault type”, τη γραμμή που θα συμβεί το σφάλμα “Fault Location”, τη διάρκεια του σφάλματος “Fault timing” και τον χρόνο δειγματοληψίας “Sample time” και μέσα από εσωτερικές διεργασίες που θα εξηγηθούν θα στέλνονται παλμοί στους αντίστοιχους διακόπτες 1, 2, 3 και 4 (σύμφωνα με τα παραπάνω).

Αυτά τα block που περιέχουν εσωτερικές διεργασίες είναι τύπου mask και για να ορισθούν κάνουμε δεξί κλικ στην επιφάνεια του αρχικού συστήματος και επιλέγουμε “Mask” και “Create mask system”.



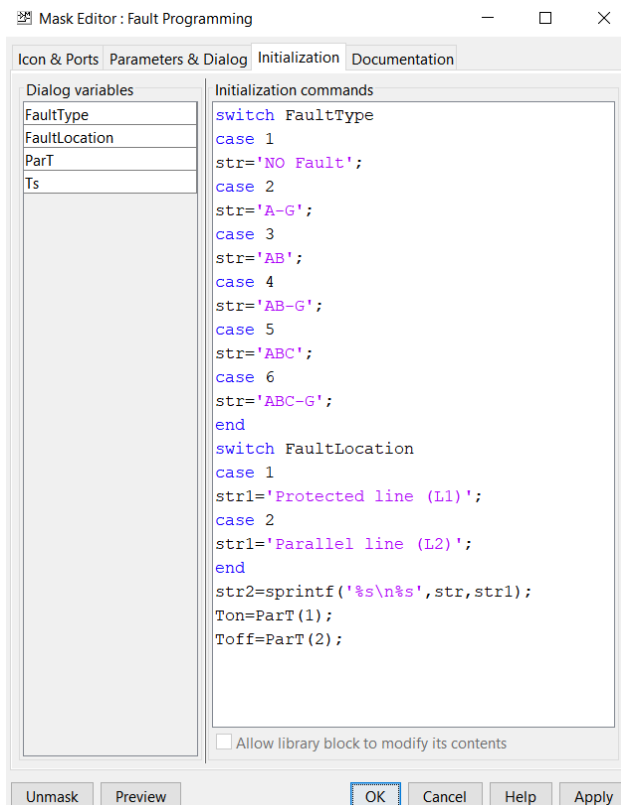
Εικόνα 4.18: Δημιουργία συστήματος “Fault Programming” τύπου Mask.

Στον Mask Editor που ανοίγει, στην καρτέλα “Parameters & Dialog” εισάγουμε τις μεταβλητές που αναφέραμε.



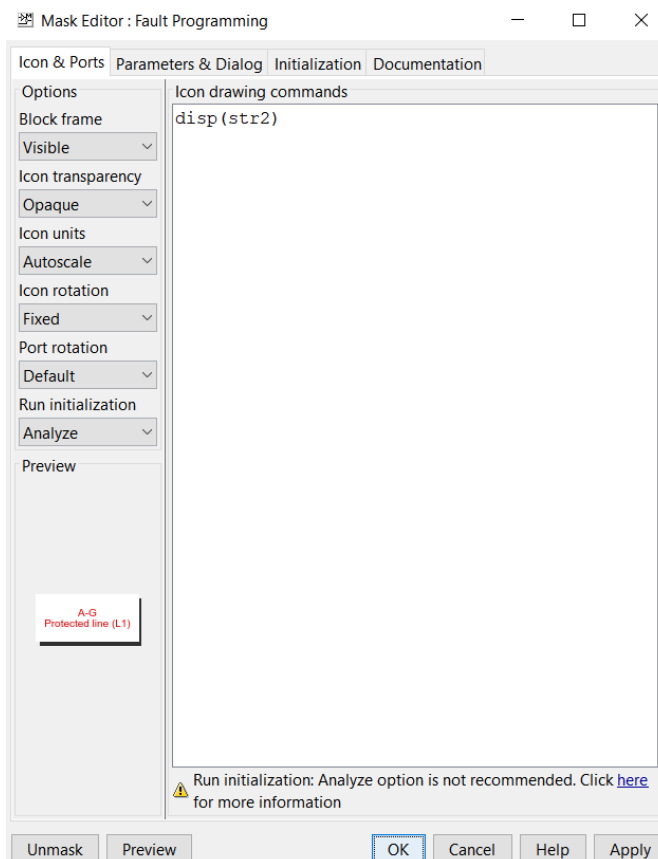
Εικόνα 4.19: Καρτέλα Parameters & Dialog του συστήματος “Fault Programming” τύπου Mask.

Στην καρτέλα “Initialization” μπορούμε να προγραμματίσουμε τον τρόπο που θα εμφανίζονται οι μεταβλητές όταν πρέπει να τις επιλέξει ο χρήστης. Εν προκειμένω:



Εικόνα 4.20: Καρτέλα Initialization του συστήματος “Fault Programming” τύπου Mask.

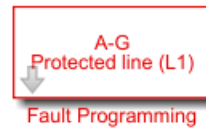
Στην καρτέλα “Icon & Ports” μπορούμε να επεξεργαστούμε την εμφάνιση του block που δημιουργούμε. Για παράδειγμα,



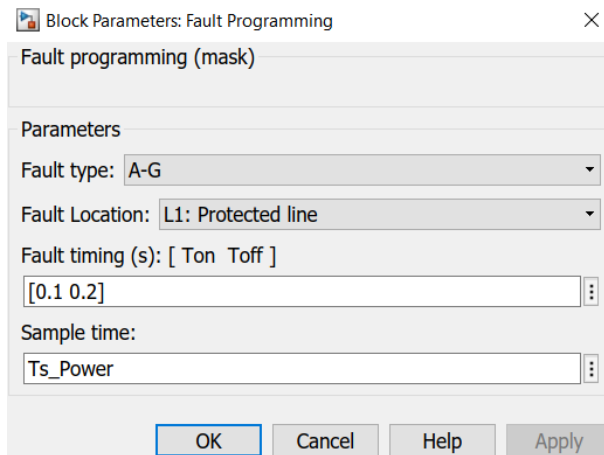
Εικόνα 4.21: Καρτέλα Icon & Ports του συστήματος “Fault Programming” τύπου Mask.

εδώ επιλέχθηκε να απεικονίζεται το $\text{str2}=\text{sprintf}(\text{'\%s\\n\%s'},\text{str},\text{str1})$, δηλαδή το είδος σφάλματος που επιλέχθηκε από τον χρήστη (μεταβλητή str) και η επιλεγμένη γραμμή από τον χρήστη (μεταβλητή str1).

Μόλις δημιουργήσαμε ένα $\text{block}(\text{mask})$ με μορφή

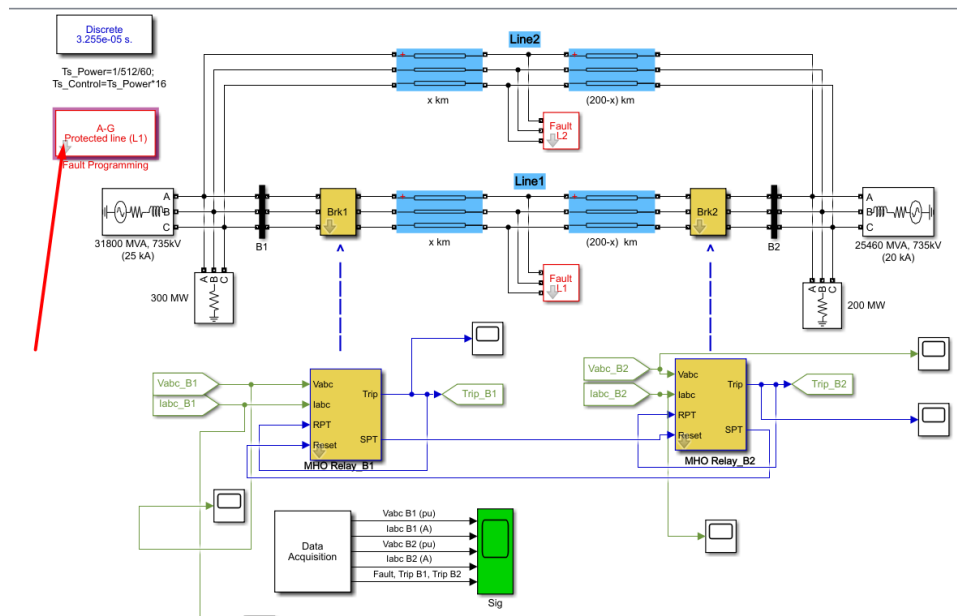


Που με διπλό κλικ πάνω του ανοίγει το μενού επιλογών για την δήλωση των επιθυμητών μεταβλητών.



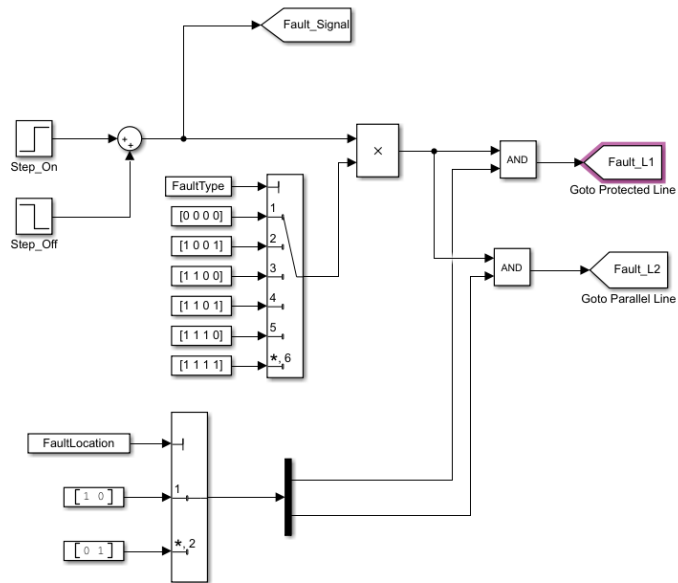
Εικόνα 4.22: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Fault Programming” block.

Εσωτερικά του block τώρα (πατώντας “Look inside mask”) θα δημιουργήσουμε ένα υποσύστημα που η λειτουργία του θα είναι να επεξεργάζεται τις παραπάνω μεταβλητές και να στέλνει κατάλληλους παλμούς στους διακόπτες των block “Fault L1” ή “Fault L2” ώστε να εφαρμοστεί το ορισμένο από τον χρήστη σφάλμα.



Εικόνα 4.23: “Fault Programming” block.

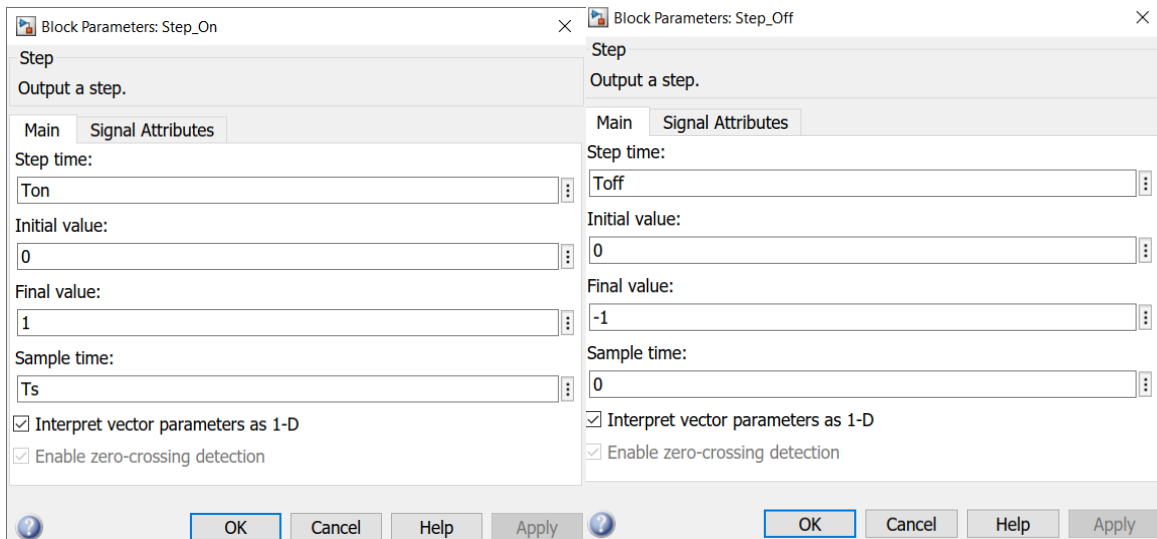
Το υποσύστημα:



Εικόνα 4.24: Εσωτερικό υποσύστημα του “Fault Programming” block.

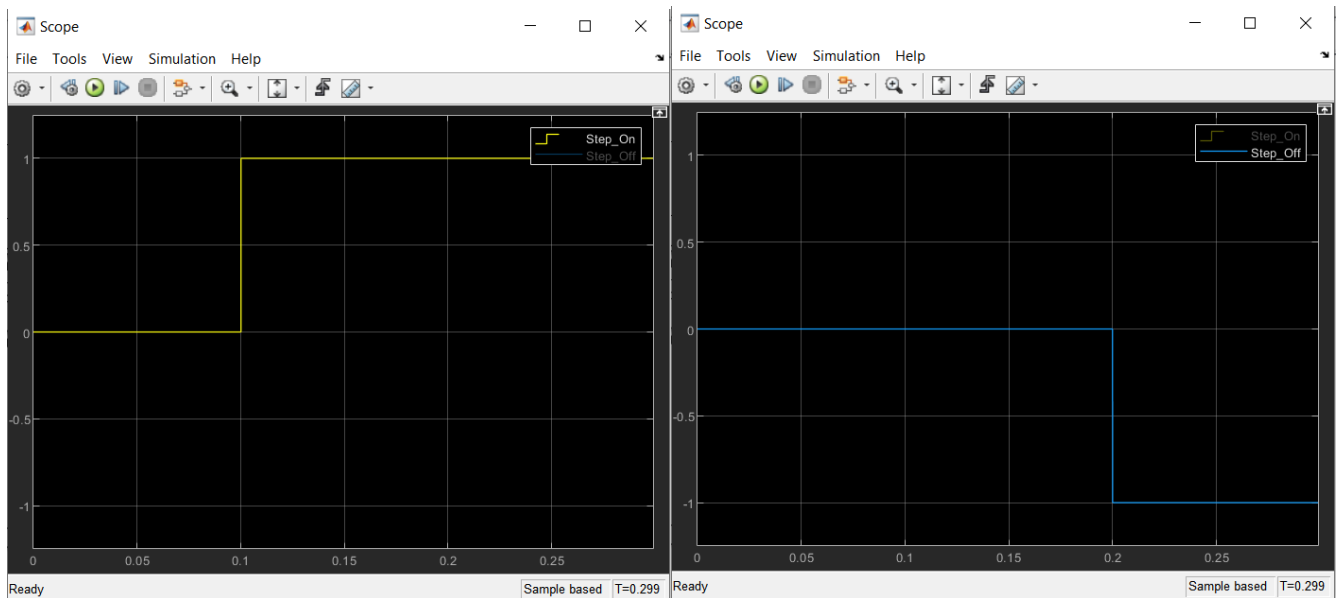
Τρόπος Λειτουργίας Υποσυστήματος:

Στοχεύουμε αρχικά στην δημιουργία ενός μοναδιαίου τετραγωνικού παλμού με εύρος που θα ορίζεται από τον χρήστη [Ton,Toff]. Η χρονική διάρκεια αυτή θα είναι και η διάρκεια του σφάλματος. Η υλοποίηση της παραπάνω ιδέας πραγματοποιείται με την άθροιση δυο βηματικών ως προς τον χρόνο κυματομορφών. Τα αντίστοιχα block των κυματομορφών αυτών ευρίσκονται από την διαδρομή Library browser / Simulink / Sources και επιλογή “Step”. Θέλουμε η μια βηματική να είναι θετική και ανοδική με χρόνο έναυσης Ton και η δεύτερη να είναι καθοδική και αρνητική με χρόνο έναυσης Toff. Κάνοντας διπλό κλικ πάνω τους ορίζουμε τις κατάλληλες παραμέτρους.



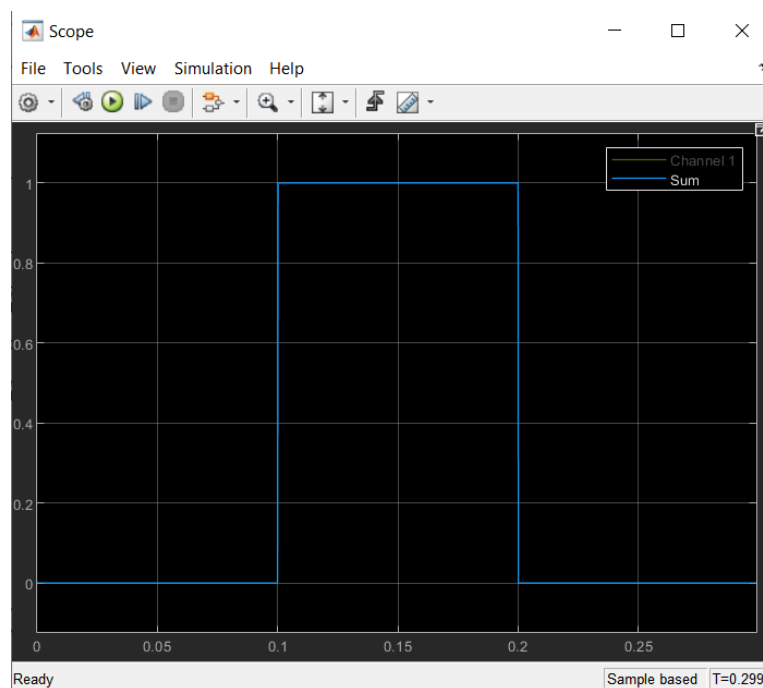
Εικόνα 4.25: Παράθυρα ορισμού παραμέτρων των “Step” blocks εντός του “Fault Programming” block.

Γραφικά:



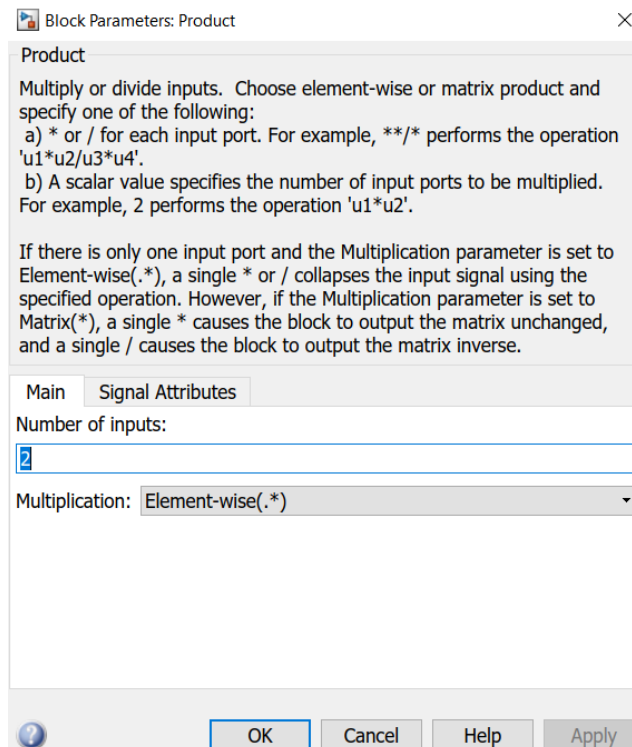
Εικόνα 4.26: Γραφικές απεικονίσεις βηματικών συναρτήσεων.

Η άθροιση τους δημιουργεί τον επιθυμητό παλμό σφάλματος εύρους $[T_{on}, T_{off}] = [0.1, 0.2]$.



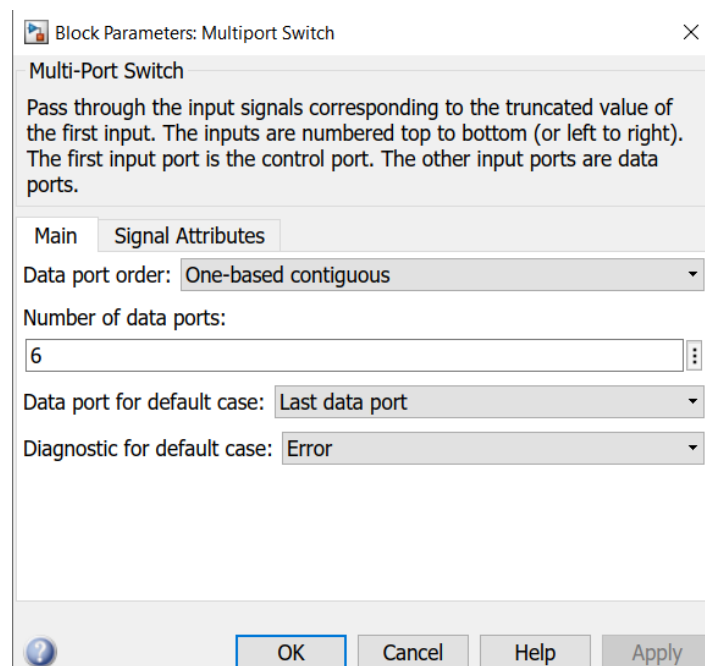
Εικόνα 4.27: Γραφική απεικόνιση παλμού σφάλματος.

Αυτός ο παλμός (για να σταλθεί στους σωστούς διακόπτες των block “Fault L1” και “Fault L2”) πρέπει να εισαχθεί σε ένα “Product” block δυο εισόδων ,μαζί με το επιλεγμένο είδος σφάλματος. Το Product block ευρίσκεται στη διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Product”. Με διπλό κλικ στο “Product” block εισάγουμε δύο εισόδους.



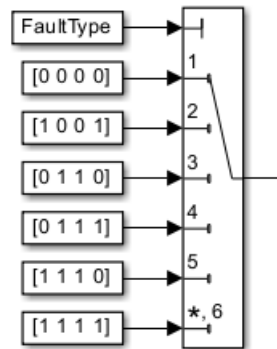
Εικόνα 4.28: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του Product block εντός του “Fault Programming” block.

Το επιλεγμένο είδος σφάλματος θα προκύπτει ως έξοδος από ένα “Multiport Switch” block (Library Browser / Simulink / Signal Routing). Τα συγκεκριμένα block από ένα πλήθος εισόδων, με βάση κάποιο σήμα ελέγχου, εξάγουν μια και μόνο είσοδο. Στην εφαρμογή μας έχουμε συνολικά έξι καταστάσεις, μια ουδέτερη (κανένα σφάλμα) και άλλες πέντε, μια για κάθε ένα είδος σφάλματος. Άρα με διπλό κλικ πάνω στο block “Multiport Switch” επιλέγουμε “Number of data ports” 6.



Εικόνα 4.29: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του Multi-Port Switch block εντός του “Fault Programming” block.

Το σήμα ελέγχου φυσικά θα είναι η μεταβλητή “Fault Type” στην οποία είναι καταχωρημένη η επιλογή του χρήστη για το είδος του σφάλματος που θα πλήξει την γραμμή και είναι αυτή που θα περνάει κάθε φορά στην έξοδο. Η τελική κατασκευή του block έχει τη μορφή :

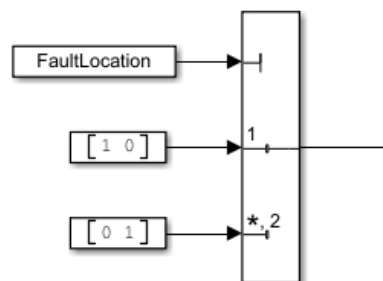


Εικόνα 4.30: Multi-Port Switch block με έξι Constant blocks ως εισόδους και ένα σήμα ελέγχου “Fault Type”.

Οι 6 διαφορετικές καταστάσεις κωδικοποιούνται με βάση τις φάσεις που εμπλέκονται στο σφάλμα. Για αυτό τον λόγο θα χρησιμοποιήσουμε πίνακες γραμμής με 4 στοιχεία (φάση A, φάση B, φάση C και γη) σε μορφή [A, B, C, G]. Συγκεκριμένα :

1. Απουσία σφάλματος, δεν εμπλέκεται καμία φάση, ούτε η γη, δηλαδή ο πίνακας γραμμής είναι [A, B, C, G]=[0, 0, 0, 0].
2. Στο μονοφασικό σφάλμα στη φάση A προς γη, θα εμπλέκεται η φάση A και η γη δηλαδή ο πίνακας γραμμής είναι [A, B, C, G]=[1, 0, 0, 1].
3. Στο διφασικό σφάλμα χωρίς γη μεταξύ φάσης B και φάσης C, θα εμπλέκονται οι φάσεις B και C, δηλαδή ο πίνακας γραμμής είναι [A, B, C, G]=[0, 1, 1, 0].
4. Στο διφασικό σφάλμα προς γη μεταξύ φάσης B, φάσης C και γης, θα εμπλέκονται οι φάσεις B, C και η γη, δηλαδή ο πίνακας γραμμής είναι [A, B, C, G]=[0, 1, 1, 1].
5. Στο τριφασικό σφάλμα χωρίς γη, θα εμπλέκεται η φάση A, B και C δηλαδή ο πίνακας γραμμής είναι [A, B, C, G]=[1, 1, 1, 0].
6. Στο τριφασικό σφάλμα προς γη, θα εμπλέκεται η φάση A, B, C και η γη δηλαδή ο πίνακας γραμμής είναι [A, B, C, G]=[1, 1, 1, 1].

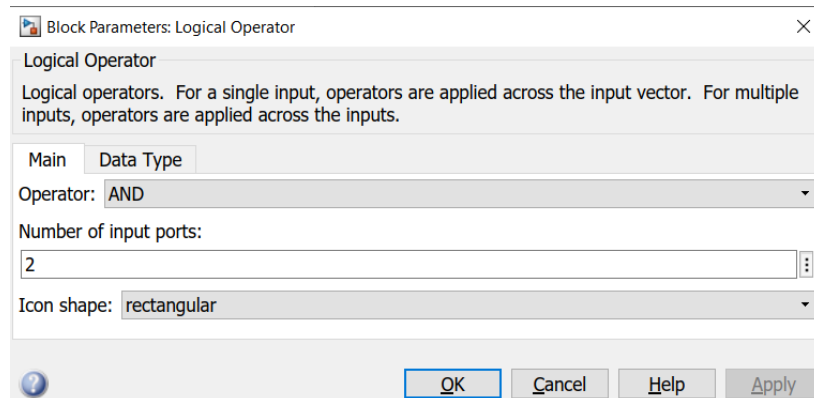
Στο υποσύστημα, θα χρειαστεί να προσθέτουμε άλλο ένα “Multiport Switch” block δύο εισόδων για την επιλογή μιας εκ των δυο γραμμών Line 1 (προστατευόμενη) ή Line 2 (παράλληλη). Σήμα ελέγχου φυσικά θα είναι η μεταβλητή “FaultLocation” στην οποία είναι καταχωρημένη η επιλογή του χρήστη και είναι αυτή που θα περνάει κάθε φορά στην έξοδο.



Εικόνα 4.31: Multi-Port Switch block με δυο Constant blocks ως εισόδους και ένα σήμα ελέγχου “FaultLocation”.

Η κωδικοποίηση των εισόδων θα γίνει με πίνακες γραμμής δύο στοιχείων (γραμμή 1 και γραμμή 2) σε μορφή [Line1, Line2]. Οι δυνατές καταστάσεις είναι δυο. Είτε συμβαίνει σφάλμα στην γραμμή 1, δηλαδή ο πίνακας γραμμής είναι [1, 0] είτε συμβαίνει σφάλμα στην γραμμή 2, δηλαδή ο πίνακας γραμμής είναι [0, 1].

Εν τέλη, η έξοδος του “Product” block και η έξοδος του δεύτερου “Multiport Switch” των δυο εισόδων θα πρέπει να περνάνε μέσα από λογικές πύλες “AND” προκειμένου να στέλνεται ο παλμός έναυσης στον σωστό συνδυασμό διακοπών και ταυτόχρονα στην σωστή γραμμή. Η εισαγωγή των block λογικής AND πραγματοποιείται από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή του “Logical Operator”. Έπειτα, με διπλό κλικ πάνω του επιλέγουμε Operator “AND” και “Number of input ports “2”.

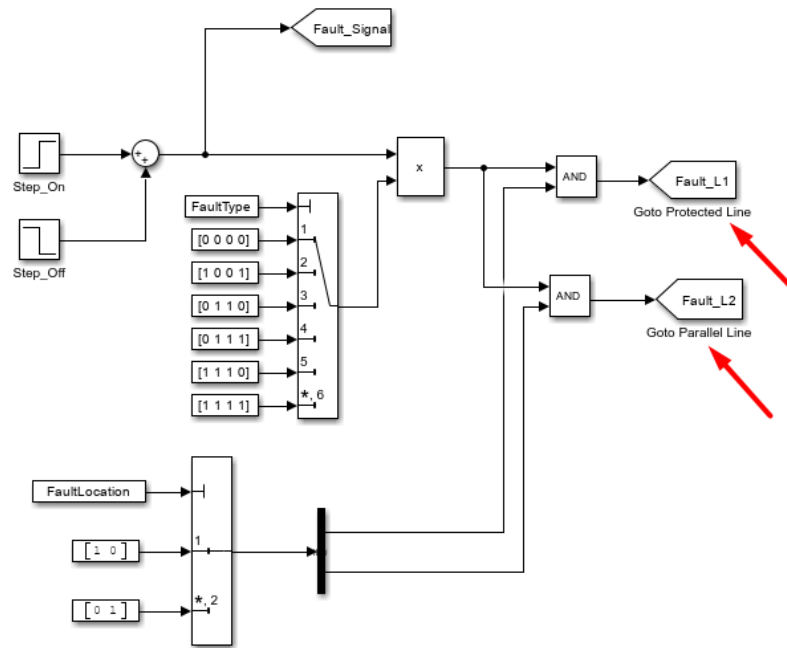


Εικόνα 4.32: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του Logical Operator block εντός του “Fault Programming” block.

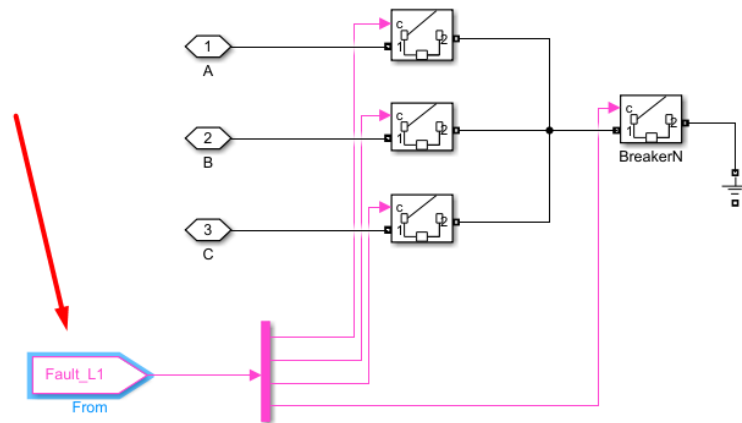
Στην έξοδο των λογικών πυλών AND συνδέουμε τα “Go to” blocks των “From” blocks “Fault L1” και “Fault L2”.

Σύνοψη Υλοποίησης του Σφάλματος :

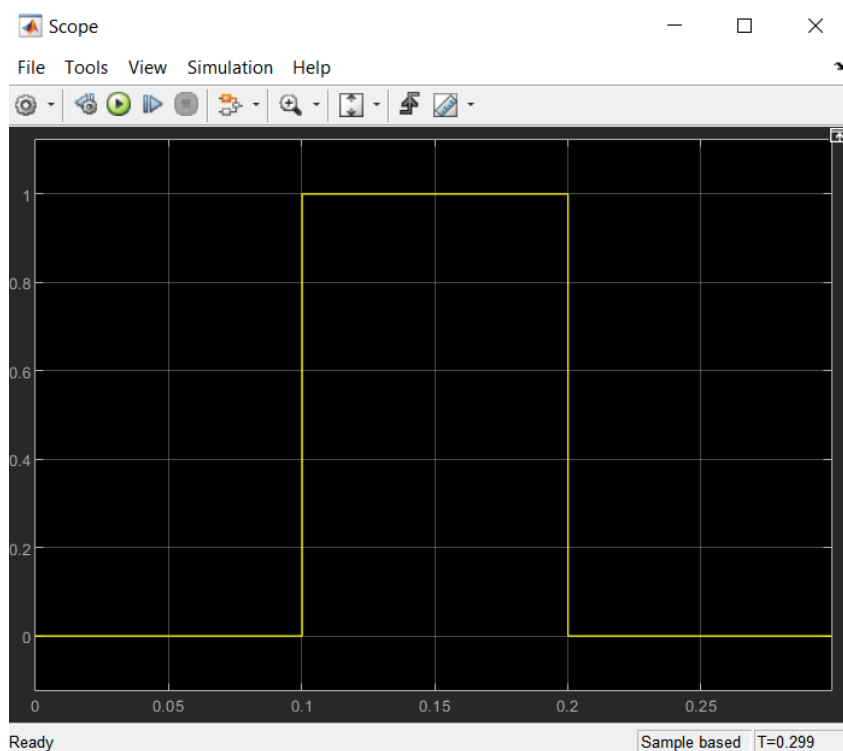
1. Ο χρήστης στο block “Fault Programming” με διπλό κλικ εισάγει το είδος του σφάλματος “Fault Type”, τη τοποθεσία του σφάλματος “Fault Location”, την διάρκεια του σφάλματος “Fault timing” και τον χρόνο δειγματοληψίας “Sample Time”.(Συστήνεται ο χρόνος δειγματοληψίας να είναι ίσος με αυτόν της προσομοίωσης “Ts_Power”).
2. Δημιουργείται ένας μοναδιαίος παλμός έναυσης με εύρος ίσο με την διάρκεια του σφάλματος ο οποίος εφοδιάζεται με την πληροφορία του είδους του σφάλματος “Fault Type” μέσω του “Product” block.
3. Οι λογικές πύλες εξασφαλίζουν ότι για όσο η πληροφορία “Fault type” είναι ενεργή (μοναδιαία για διάρκεια “Fault timing”), η μεταβλητή “FaultLocation” θα εξάγει τον παλμό είτε στο block “Fault L1” είτε στο block “Fault L2”, σύμφωνα με τον χρήστη.
4. Τα “Go to” blocks “Fault L1”, “Fault L2”



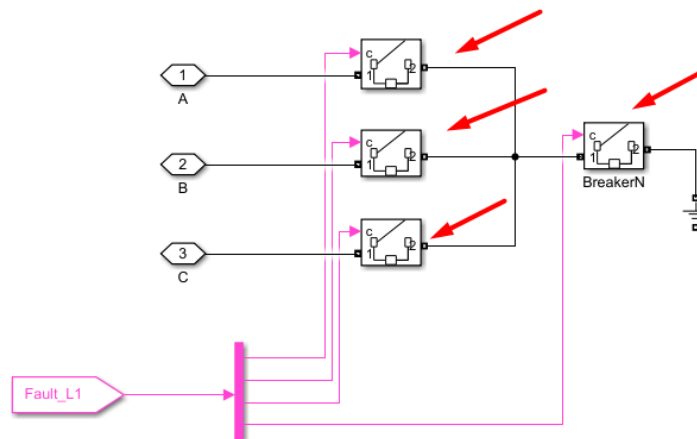
Εικόνα 4.33: Goto blocks “Fault_L1” και “Fault_L2” του “Fault Programming” block. με την σειρά τους στέλνουν το σήμα που έλαβαν στα “From” blocks “Fault L1”, “Fault L2”



Εικόνα 4.34: From blocks “Fault_L1” και “Fault_L2” του “Fault Programming” block. και περιέχουν τον παλμό έναυσης της Εικόνας 4.27 με όλες τις απαραίτητες πληροφορίες.



Έτσι ανοίγουν οι διακόπτες που μοντελοποιούν σωστά το επιλεγμένο από τον χρήστη σφάλμα, στη σωστή γραμμή και για χρόνο “Fault timing”.



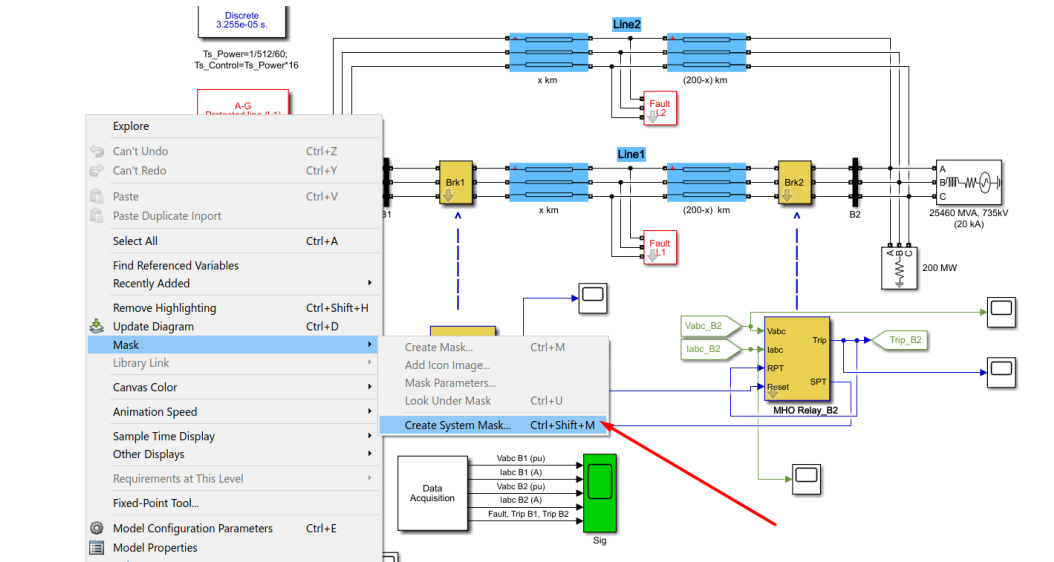
Εικόνα 4.35: Breaker blocks για τις τρεις φάσεις a, b, c και τον ουδέτερο.

4.8 Ηλεκτρονόμοι τύπου Mho στους ζυγούς B1 και B2

4.8.1 Κύρια blocks ηλεκτρονόμων

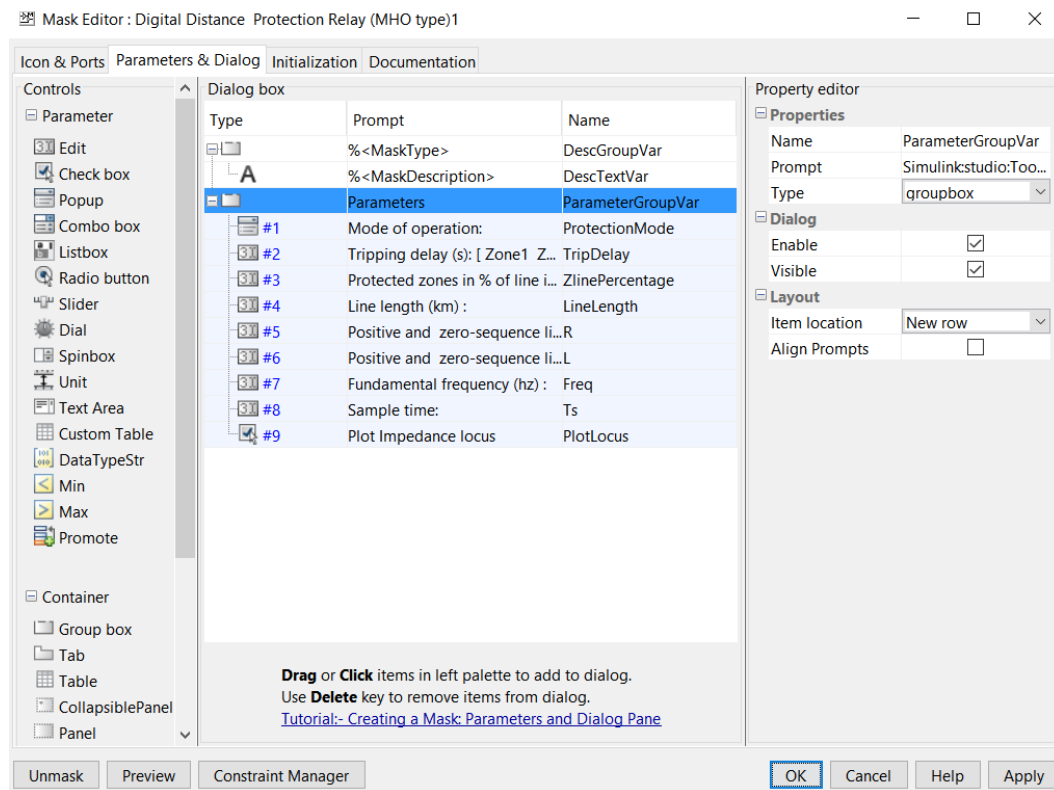
Για να μοντελοποιηθούν οι ηλεκτρονόμοι πρέπει να φτιάξουμε blocks τύπου mask που να δέχονται ως εισόδους τις τριφασικές τάσεις και ρεύματα V_{abc_B1} , V_{abc_B2} , I_{abc_B1} και I_{abc_B2} και στην έξοδο να εξάγουν έναν παλμό ενεργοποίησης προς τους διακόπτες με τους οποίους επικοινωνούν όταν πρόκειται να ενεργοποιηθούν. Ταυτόχρονα κρίνεται απαραίτητο να υπάρχουν συστήματα επικοινωνίας μεταξύ των ηλεκτρονόμων που θα εξασφαλίζουν την διαλειτουργικότητα

τους για την βέλτιστη υποστήριξη στο δίκτυο. Τα συστήματα αυτά υλοποιούνται με εισόδους “RPT” και “Reset” και εξόδους “SPT” στα block των ηλεκτρονόμων. Τέλος, θέλουμε να μπορούμε να ρυθμίσουμε τις ζώνες προστασίας, τις καθυστερήσεις λειτουργίας για τις δύο ζώνες, το μήκος της γραμμής, τις ανά χιλιόμετρο σύνθετες αντιστάσεις θετικής και μηδενικής ακολουθίας (η αρνητική είναι ίση με την θετική ακολουθία), τη θεμελιώδη συχνότητα και τον χρόνο δειγματοληψίας. Επομένως θα δημιουργήσουμε ένα “System Mask” κάνοντας δεξί κλικ στην αρχική επιφάνεια του Simulink, επιλέγοντας “Mask” και έπειτα “Create System Mask”.

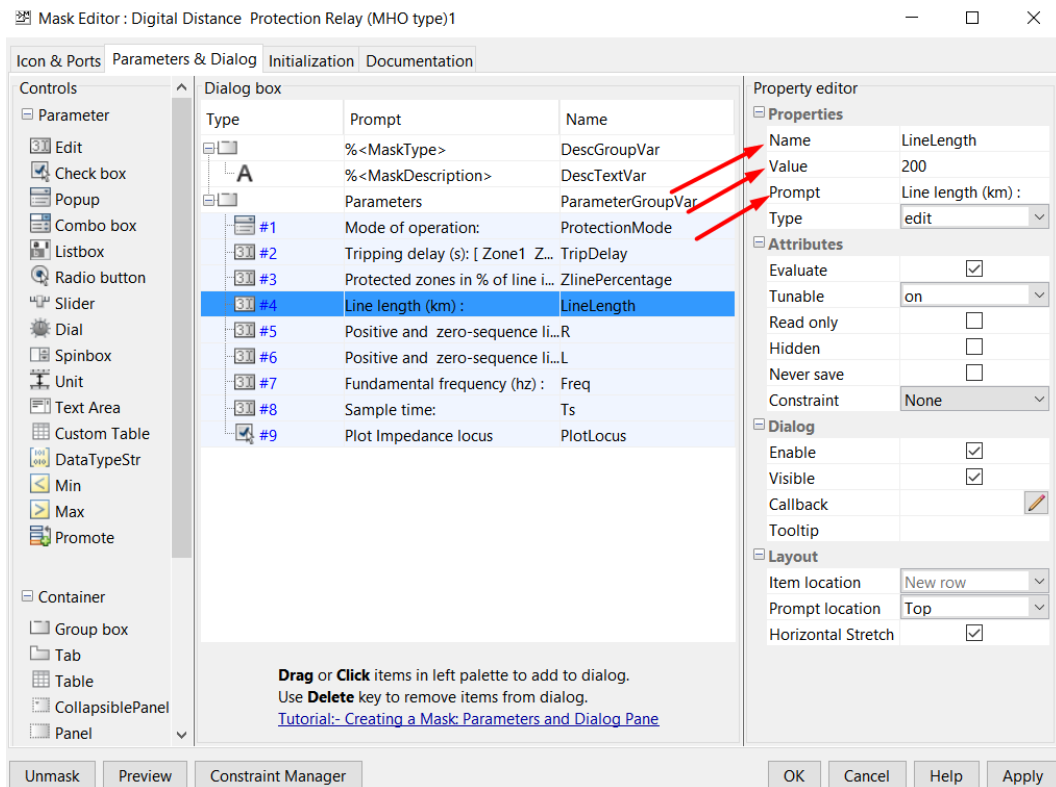


Εικόνα 4.36: Δημιουργία συστημάτων “MHO Relay B1” και “MHO Relay B2” τύπου Mask.

Στον Mask Editor που ανοίγει επιλέγουμε την καρτέλα “Parameters & Dialog” και θα εισάγουμε τις μεταβλητές που αναφέραμε παραπάνω με όνομα, τιμή και ετικέτα:

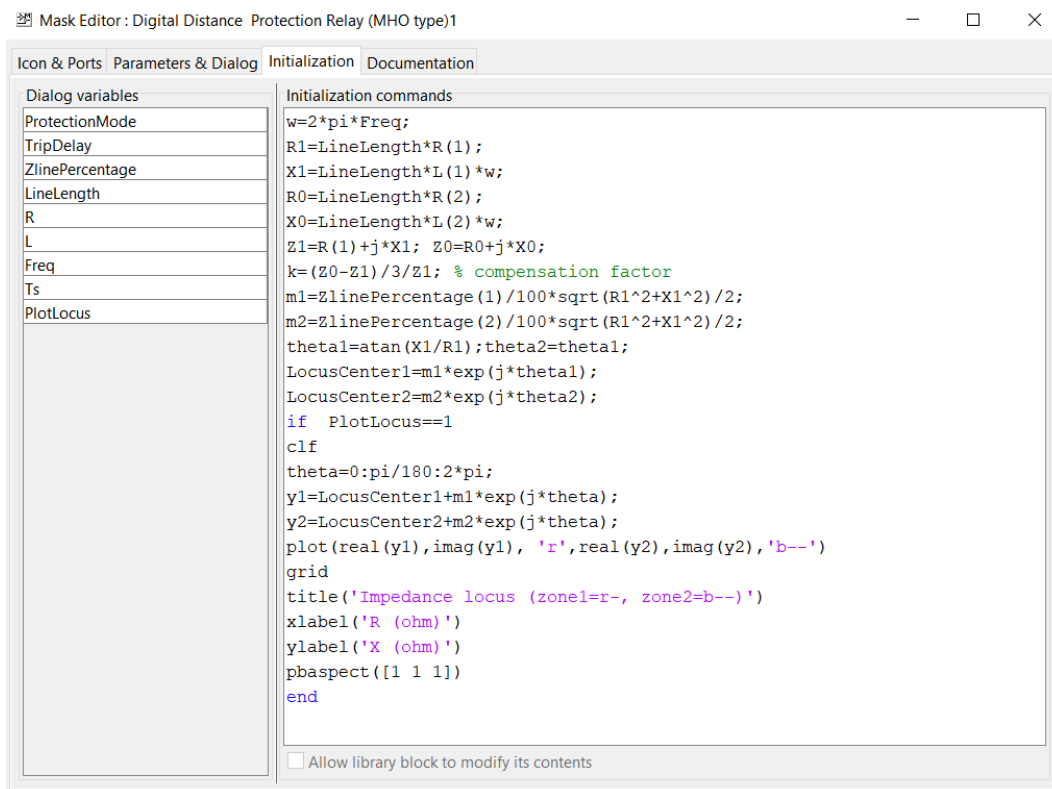


Εικόνα 4.37: Καρτέλα *Parameters & Dialog* των συστημάτων “MHO Relay B1” και “MHO Relay B2” τύπου *Mask*.



Εικόνα 4.38: Όνομα, τιμή και ετικέτα των μεταβλητών της καρτέλας *Parameters & Dialog* των συστημάτων “MHO Relay B1” και “MHO Relay B2” τύπου *Mask*.

Πίσω από κάθε μια μεταβλητή πρέπει να υπάρχει κώδικας που να υλοποιεί τις λειτουργίες τους. Συγκεκριμένα στην καρτέλα *initialization*:



Εικόνα 4.39: Καρτέλα Initialization των συστημάτων “MHO Relay B1” και “MHO Relay B2” τύπου Mask.

Μόλις φτιάξαμε ένα σύστημα-block με όνομα “MHO Relay B1” (και “MHO Relay B2” αντίστοιχα) που με διπλό κλικ ο χρήστης δηλώνει τις παραμέτρους που επιθυμεί,

Block Parameters: Digital Distance Protection Relay (MHO type)1

Digital Distance Protection Relay (MHO type) (mask)

Parameters

Mode of operation: Protection of zone 1 and 2

Tripping delay (s): [Zone1 Zone2]
[0.5/60 4/60]

Protected zones in % of line impedance: [Zone1 Zone2]
[80 120]

Line length (km) :
200

Positive and zero-sequence line resistance [R1 R0] (ohm/km)
[0.01273 0.3864]

Positive and zero-sequence line Inductance [L1 L0] (H/km) :
[0.9337e-3 4.126e-3]

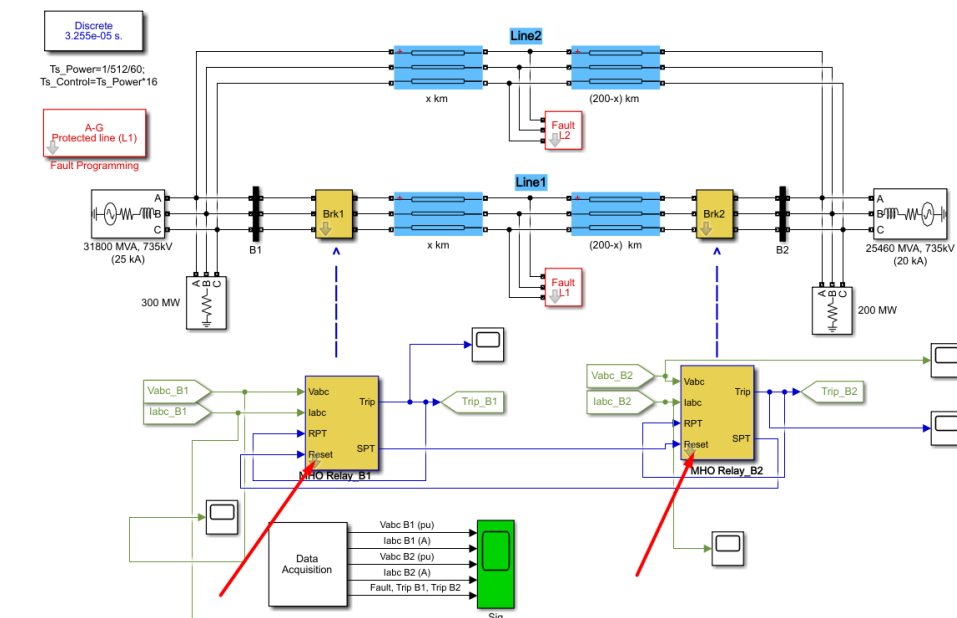
Fundamental frequency (hz) :
60

Sample time:
Ts_Control

☐ Plot Impedance locus

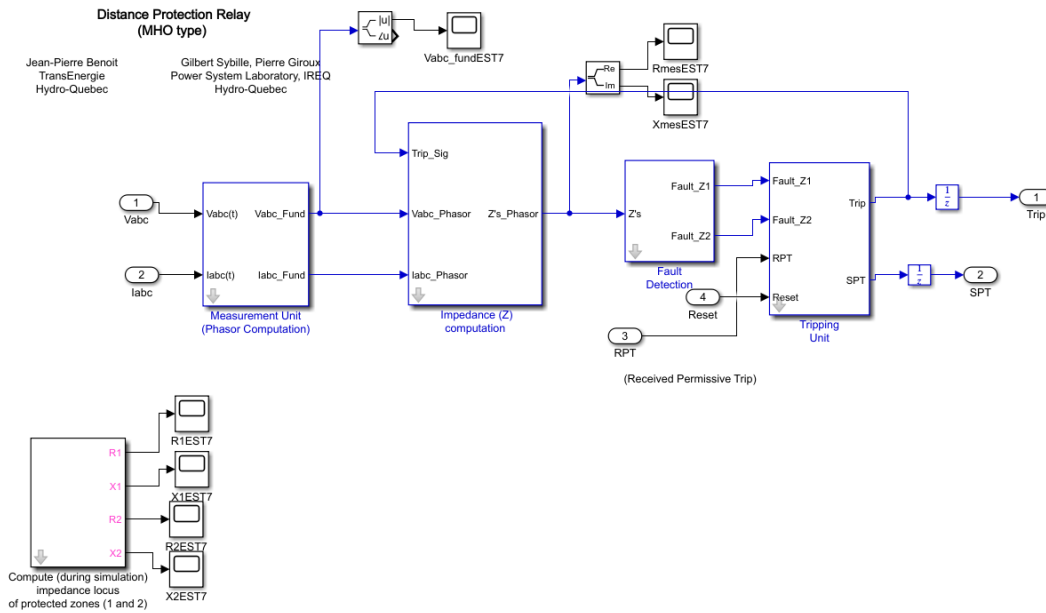
OK Cancel Help Apply

Εικόνα 4.40: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων των “MHO Relay B1” και “MHO Relay B2” blocks. ενώ με επιλογή στο βέλος “Look inside mask”



Εικόνα 4.41: “MHO Relay B1” και “MHO Relay B2” blocks.

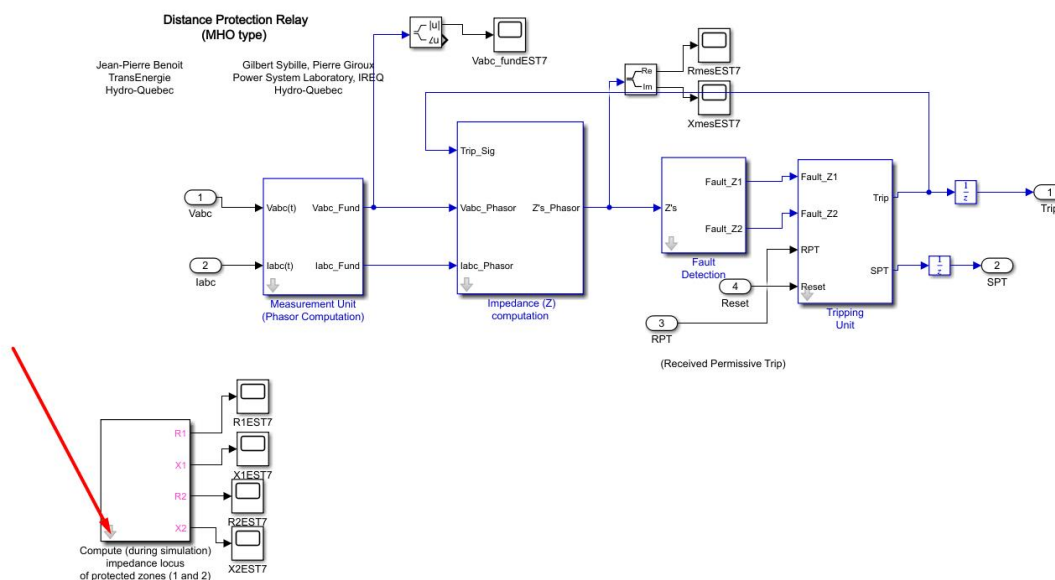
οδηγούμαστε στο εσωτερικό υποσύστημα. Το εσωτερικό σύστημα πρέπει να έχει την παρακάτω μορφή:



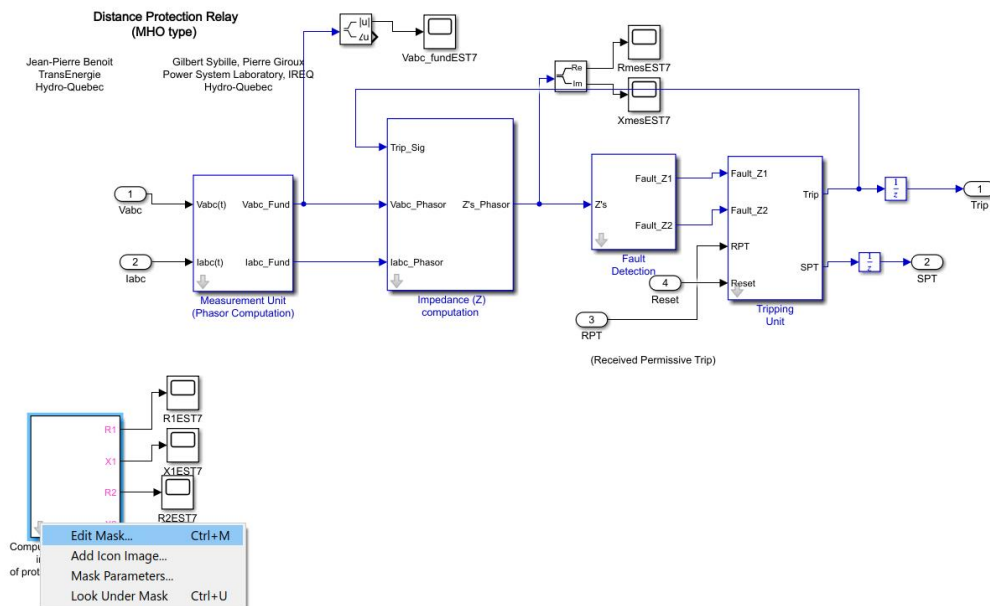
Εικόνα 4.42: Εσωτερικό υποσύστημα των “MHO Relay B1” και “MHO Relay B2” blocks.

4.8.2 Δημιουργία κύκλων Mho για τις ζώνες 1 και 2

Πρέπει να δημιουργήσουμε ένα σύστημα -block που να του δίνει ο χρήστης ως δεδομένα τις ακτίνες των κύκλων MHO για τις δυο ζώνες, τα κέντρα των κύκλων MHO για τις δύο ζώνες, τη συχνότητα σχεδίασης των κύκλων (συστήνεται 10 Hz) και το χρόνο δειγματοληψίας (προτείνεται T_s) και αυτό να εξάγει τις χαρακτηριστικές λειτουργίες του ηλεκτρονόμου (δυο κύκλοι MHO, ένας για κάθε ζώνη). Στον Mask Editor του block μας (δεξί κλικ στο σημείο “Look inside mask” του block και επιλογή “Edit Mask”)

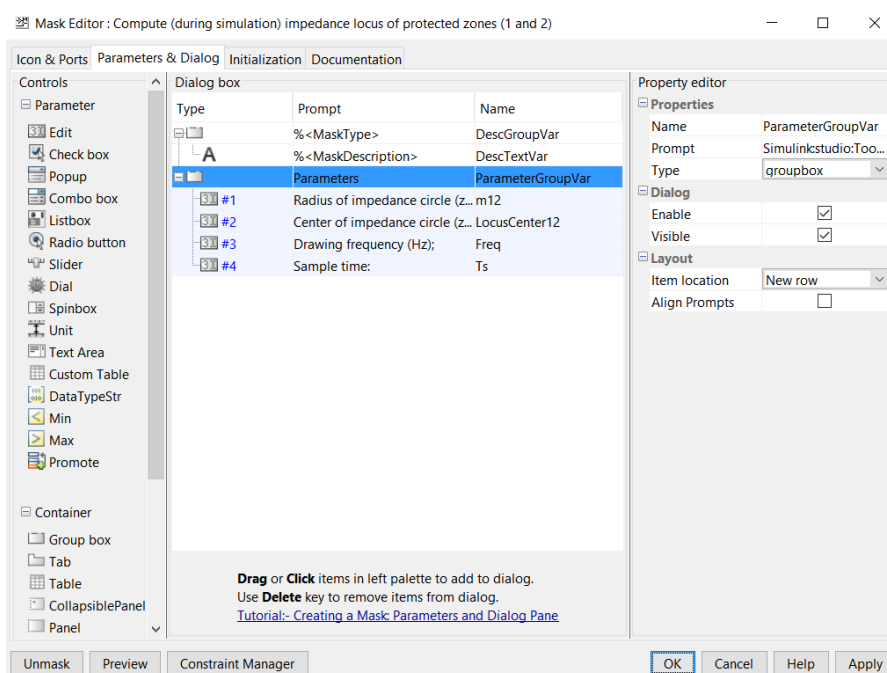


Εικόνα 4.43: “Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and 2)” block.

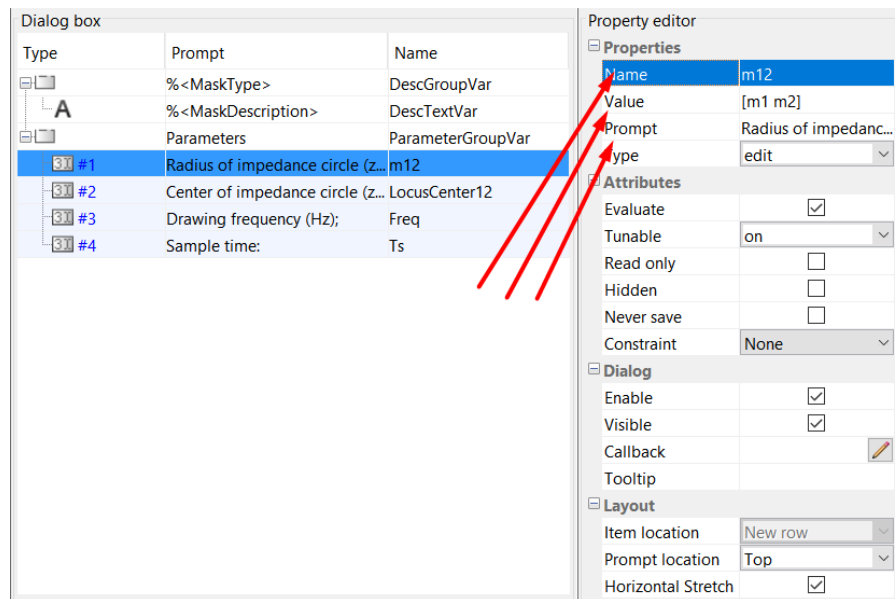


Εικόνα 4.44: Επεξεργασία του “Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and 2)” block τύπου Mask.

επιλέγουμε την καρτέλα “Parameters & Dialog”
και εισάγουμε τις παραμέτρους που αναφέραμε με όνομα, τιμή και ετικέτα:

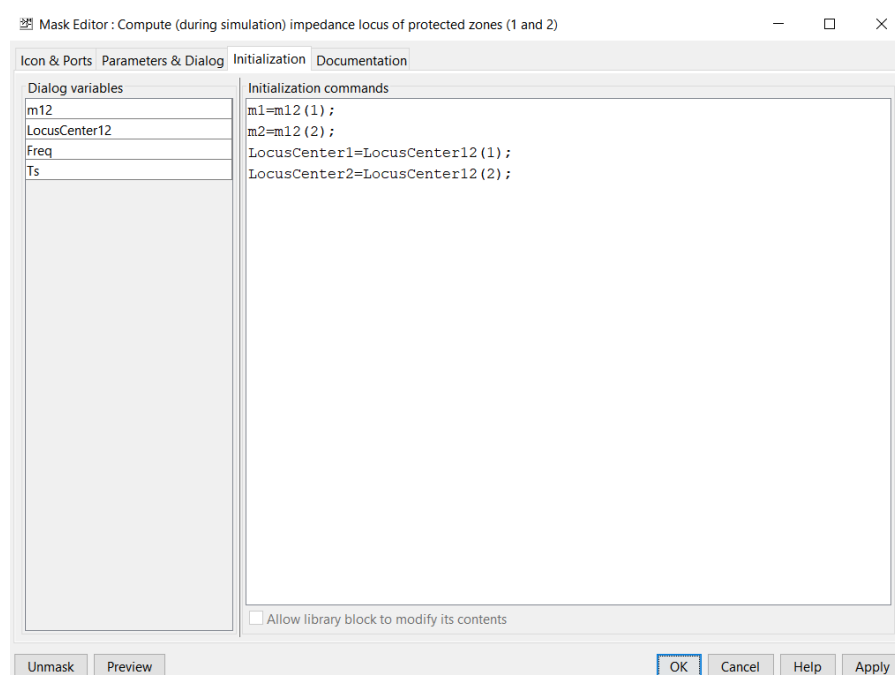


Εικόνα 4.45: Καρτέλα Parameters & Dialog του “Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and 2)” block τύπου Mask.



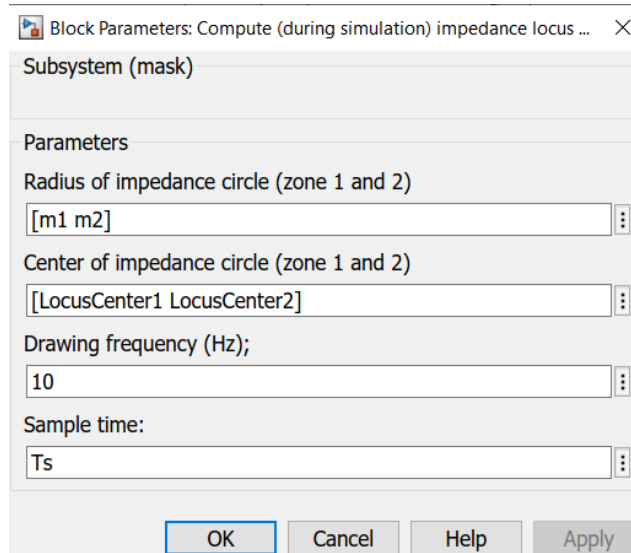
Εικόνα 4.46: Όνομα, τιμή και περιγραφή των παραμέτρων της καρτέλας *Parameters & Dialog* του “*Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and 2)*” block τύπου *Mask*.

Στη καρτέλα “Initialization” προγραμματίζουμε τα απαιτούμενα πεδία. Οι ακτίνες και τα κέντρα των κύκλων M_{ho} των ζωνών 1 και 2 ορίζονται ως μεταβλητές πίνακες δυο στοιχείων στο Matlab με τιμές [m1 m2] και [LocusCenter1 LocusCenter2] αντίστοιχα.



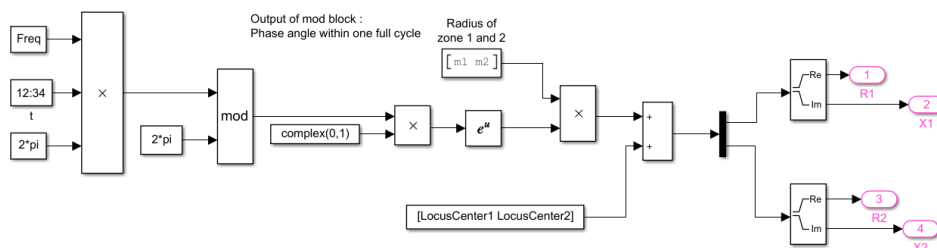
Εικόνα 4.47: Καρτέλα *Initialization* του “*Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and 2)*” block τύπου *Mask*.

Μόλις φτιάξαμε ένα σύστημα-block με όνομα “ *Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and 2)*” που με διπλό κλικ ο χρήστης δηλώνει τις παραμέτρους που επιθυμεί,



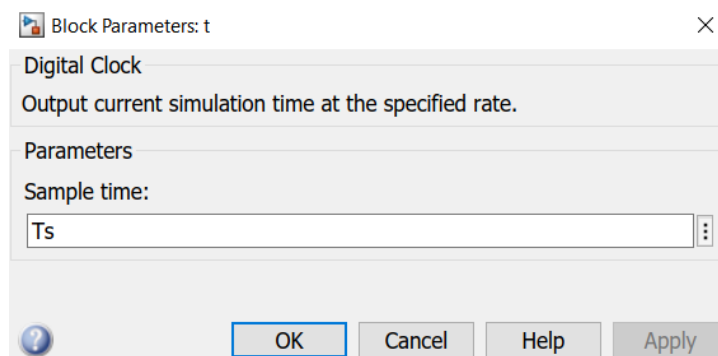
Εικόνα 4.48: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and 2)” block.

ενώ με επιλογή στο βέλος “Look inside mask” σύμφωνα με την Εικόνα 4.43 οδηγούμαστε στο εσωτερικό του υποσυστήμα. Το εσωτερικό υποσύστημα πρέπει να έχει την παρακάτω μορφή:



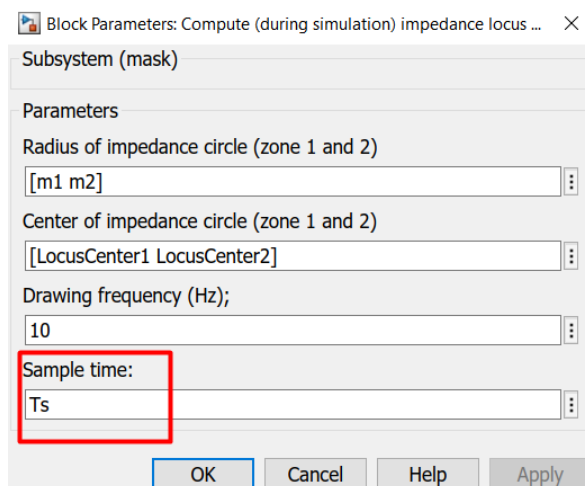
Εικόνα 4.49: Εσωτερικό υποσύστημα του “Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and 2)” block.

Από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Sources και επιλογή “Digital Clock” εισάγουμε αρχικά ένα ψηφιακό ρολόι το οποίο εξάγει τον χρόνο της προσομοίωσης σε διακριτή μορφή με χρόνο δειγματοληψίας που ορίζεται από τον χρήστη με διπλό κλικ πάνω του.



Εικόνα 4.50: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Digital Clock” block εντός του “Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and 2)” block.

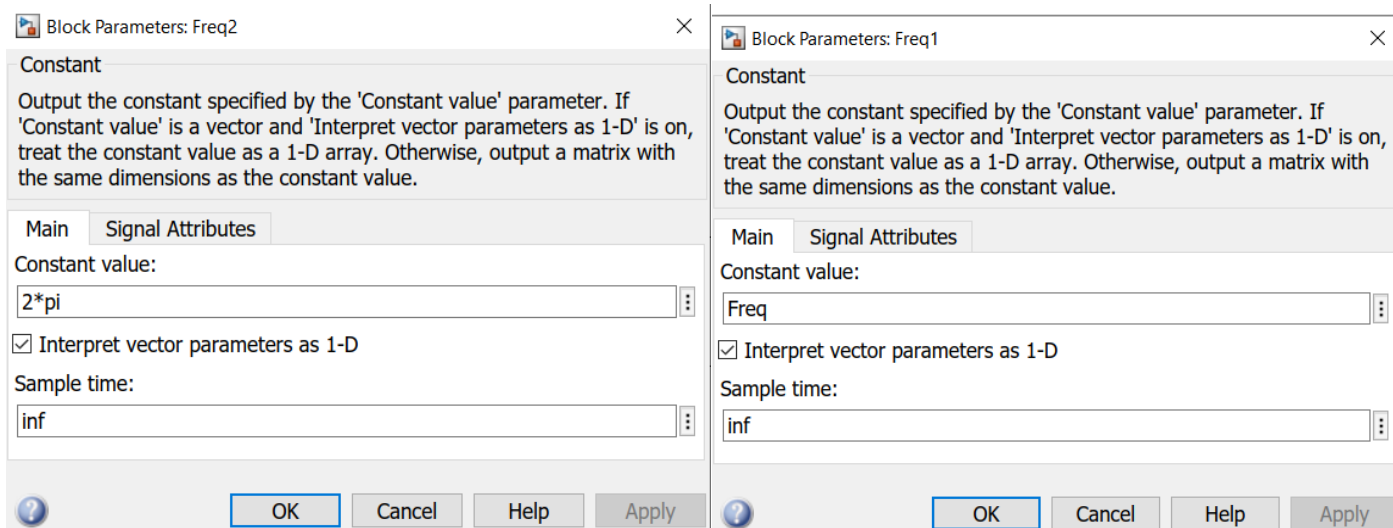
Ο χρόνος δειγματοληψίας πρέπει να είναι αυτός του Mask-block:



Εικόνα 4.51: Πεδίο “Sample time” στο παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and 2)” block.

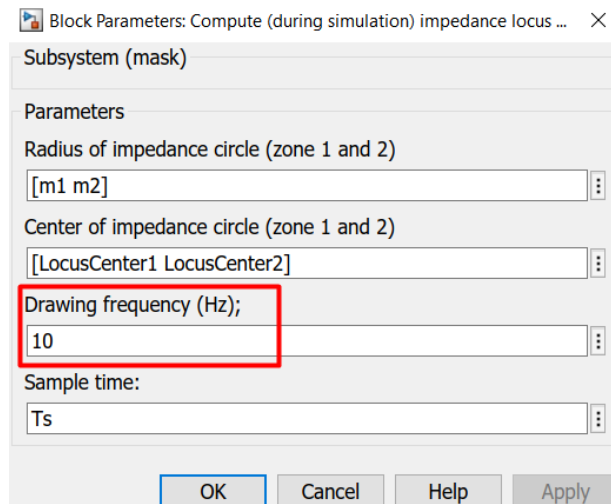
Έπειτα θα εισάγουμε δυο “Constant” blocks τα οποία θα αναπαριστούν τον όρο 2π και την συχνότητα σχεδίασης από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Constant”.

Με διπλό κλικ πάνω στα “Constant” blocks ορίζουμε τις τιμές τους:



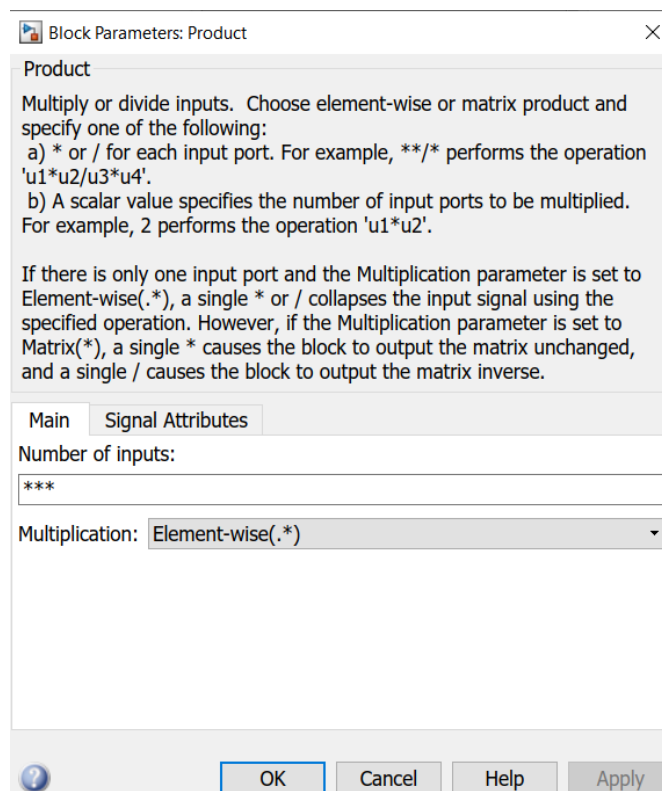
Εικόνα 4.52: Παράθυρα ορισμού παραμέτρων των “Constant” blocks “Freq1” και “Freq2” εντός του “Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and 2)” block.

Η συχνότητα σχεδίασης πρέπει να είναι αυτή του Mask-block:



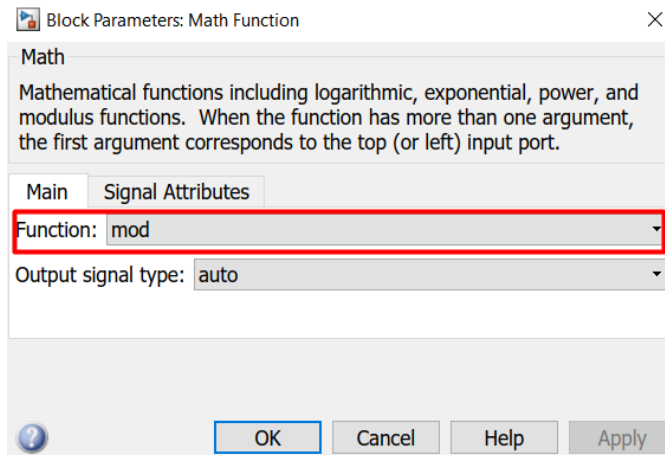
Εικόνα 4.53: Πεδίο “Drawing frequency” στο παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and 2)” block.

Τη συχνότητα, τον διακριτό χρόνο και τον όρο 2π θα τα περάσουμε μέσα από ένα “Product” block τριών εισόδων ώστε να δημιουργήσουμε τον όρο $2\pi ft (= \omega t)$. Από τη διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks επιλέγουμε “Product” και πατάμε διπλό κλικ πάνω του:



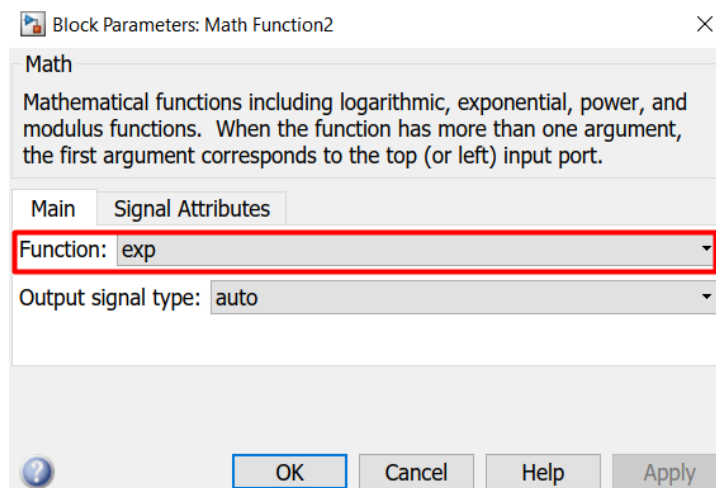
Εικόνα 4.54: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Product” block εντός του “Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and 2)” block.

Στο πεδίο “Number of inputs” εισάγουμε τρία σύμβολα πολλαπλασιασμού “***”. Στη συνέχεια από τον Library Browser / Simulink / Math Operations, επιλογή “Math Function” και διπλό κλικ στο δημιουργούμενο block μπορούμε να δηλώσουμε το είδος της μαθηματικής πράξης που θέλουμε να εκτελέσουμε:



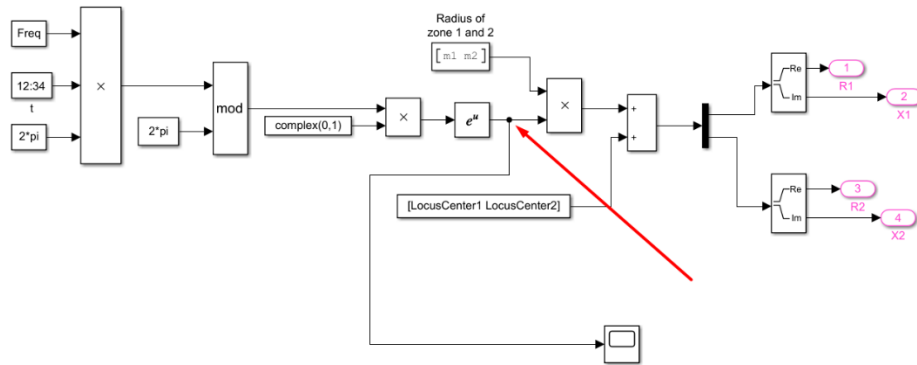
Εικόνα 4.55: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Math” block εντός του “Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and 2)” block.

Επιλέγουμε “mod”, πατάμε “OK” και στη μια είσοδο συνδέουμε την έξοδο του “Product” block ενώ στην άλλη ένα “Constant” block με τιμή “2π”. Στην έξοδο του “mod” block λαμβάνουμε το αποτέλεσμα της πράξης $(2\pi f t) \bmod (2\pi)$ το οποίο αντιστοιχεί σε φασική γωνία θ ενός πλήρους κύκλου περιόδου $1/f$. Προκειμένου να πολλαπλασιάσουμε τη φασική γωνία θ με το μιγαδικό j θα περάσουμε σε ένα “Product” block (Library Browser/Simulink/Commonly Used Blocks/Product) την έξοδο του “mod” block και ενός “Constant” block (Library Browser/Simulink/Commonly Used Blocks/Constant) με τιμή $\text{complex}(0,1)$. Στο Matlab η συνάρτηση $\text{complex}(a,b)$ ισούται με $a+jb$, επομένως η $\text{complex}(0,1)$ ισούται με j . Ο όρος $e^{j\theta}$ θα δημιουργηθεί αν εισάγουμε το αποτέλεσμα $j\theta$ σε μια συνάρτηση εκθετικού. Από τον Library Browser / Simulink / Math Operations, επιλογή “Math Function” και διπλό κλικ στο δημιουργούμενο block επιλέγουμε το εκθετικό “exp”:



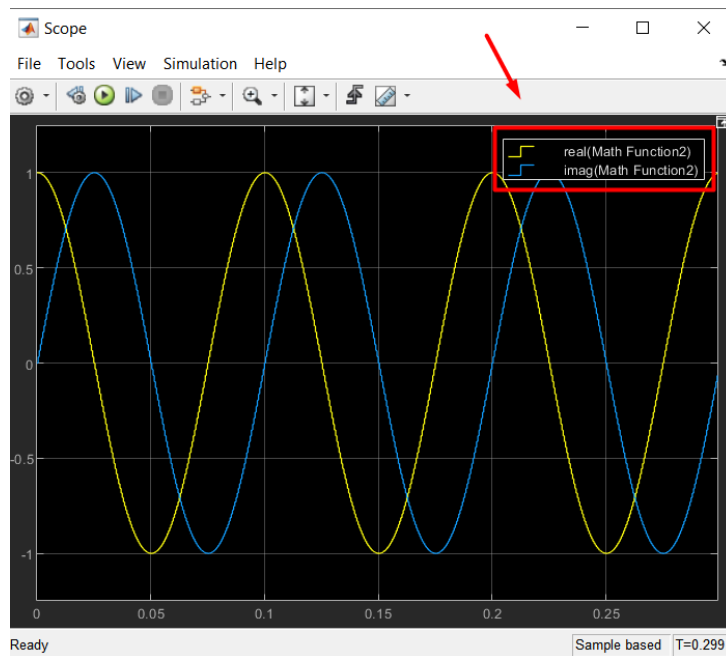
Εικόνα 4.56: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του δεύτερου “Math” block εντός του “Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and 2)” block.

Μόλις δημιουργήσαμε ένα μιγαδικό εκθετικό μοναδιαίου πλάτους το οποίο θα πρέπει να υπακούει στο τύπο του Euler, δηλαδή $e^{j\theta} = \cos\theta + j * \sin\theta$. Πράγματι αν εισάγουμε ένα “scope” παρακολούθησης από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Sinks και επιλογή “Scope” και το συνδέσουμε στην έξοδο του εκθετικού,



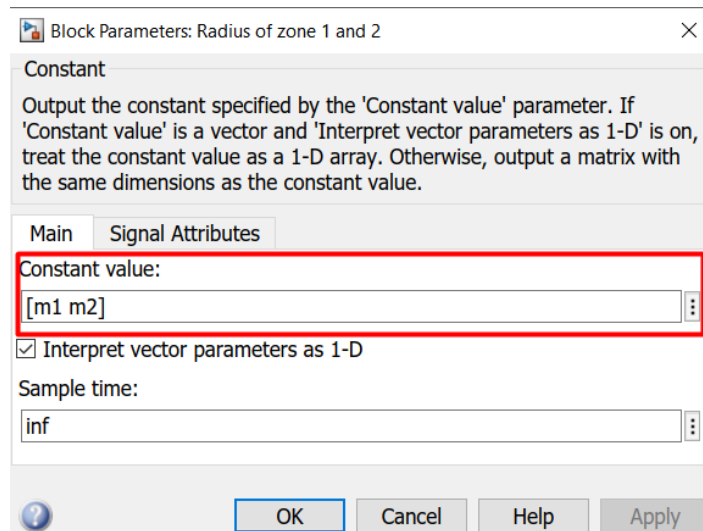
Εικόνα 4.57: Σημείο σύνδεσης του “Scope” block εντός του “Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and 2)” block.

θα δούμε ότι κάνοντας “run” την προσομοίωση και με διπλό κλικ πάνω του θα απεικονίζει ένα συνημίτονο στο πραγματικό του μέρος και ένα ημίτονο στο φανταστικό του μέρος ($e^{j\theta} = \cos\theta + j * \sin\theta$):



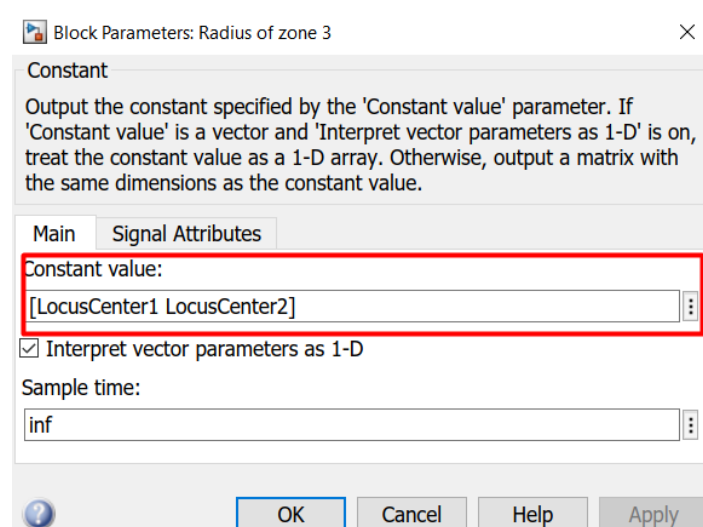
Εικόνα 4.58: Γραφική απεικόνιση του “Scope” block εντός του “Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and 2)” block.

Θέλουμε στο μιγαδικό κύκλο που δημιουργήσαμε να επεμβαίνουμε στην ακτίνα του. Εισάγουμε σε ένα “Product” block (Library Browser/Simulink/Commonly Used Blocks/Product) την έξοδο του εκθετικού και ένα “Constant” block (Library Browser/Simulink/Commonly Used Blocks/Constant). Στο “Constant” block θέλουμε να εισάγουμε δυο τιμές, μια μικρή ακτίνα για την πρώτη ζώνη και μια μεγαλύτερη ακτίνα για την δεύτερη ζώνη επομένως με διπλό κλικ πάνω του θα εισάγουμε ως τιμή έναν 1x2 πίνακα [m1,m2].



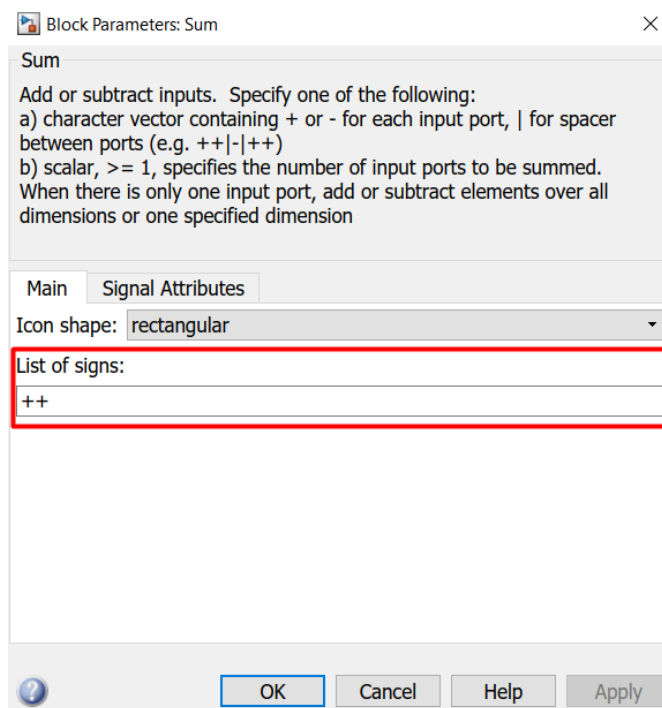
Εικόνα 4.59: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Constant” block “Radius of zone 1 and 2” εντός του “Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and 2)” block.

Ο πίνακας [m1,m2] έχει ορισθεί στο Matlab με ορίσματα τις τιμές των ακτινών των δυο ζωνών. Σε επόμενο βήμα, πρέπει να μπορούμε να μετατοπίζουμε τους κύκλους των δυο ζωνών ως προς την αρχή των αξόνων (0,0). Ορίζουμε στο Matlab δυο μεταβλητές “LocusCenter1” και “LocusCenter2” οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις συντεταγμένες των κέντρων των κύκλων και τις αποθηκεύουμε σε έναν πίνακα 2x1 [LocusCenter1 , LocusCenter2]. Στο Simulink πλέον εισάγουμε ένα “Constant” block (Library Browser/Simulink/Commonly Used Blocks/Constant) με τιμή αυτή των κέντρων των κύκλων. Ο ορισμός πραγματοποιήθηκε με διπλό κλικ:



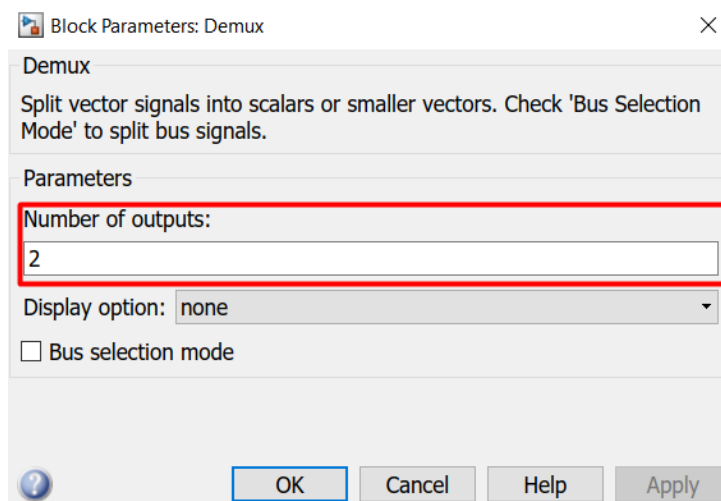
Εικόνα 4.60: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Constant” block “LocusCenter” εντός του “Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and 2)” block.

Οι κύκλοι ΜΗΟ θα δημιουργηθούν με πρόσθεση των μιγαδικών κύκλων (κεντραρισμένων στην αρχή των αξόνων) και των μετατοπίσεων των κέντρων που ορίζει ο χρήστης. Η παραπάνω υλοποίηση θα γίνει με ένα “Sum” block το οποίο ευρίσκεται στη διαδρομή Library Browser / Simulink / Math Operation και επιλογή “Add, Subtract, Sum of Elements, Sum”. Με διπλό κλικ πάνω του στο πεδίο “List of signs” ορίζουμε “++”. Έτσι εξασφαλίζουμε ότι θα γίνει άθροιση δυο όρων.



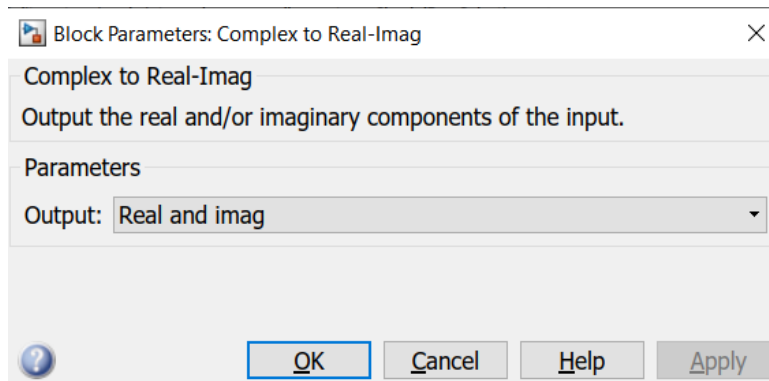
Εικόνα 4.61: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Sum” block εντός του “Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and 2)” block.

Στην έξοδο του “Sum” block έχουμε συλλέξει πλέον όλη την πληροφορία των κύκλων ΜΗΟ. Οι κύκλοι είναι δυο καθώς οι ζώνες προστασίας είναι δυο. Με έναν αποπλέκτη (demux) 1 σε 2 ξεχωρίζουμε τους Μho. Ο αποπλέκτης εισάγεται ως εξής: Library Browser/ Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Demux”. Με διπλό κλικ ορίζεται το πλήθος των εξόδων του.



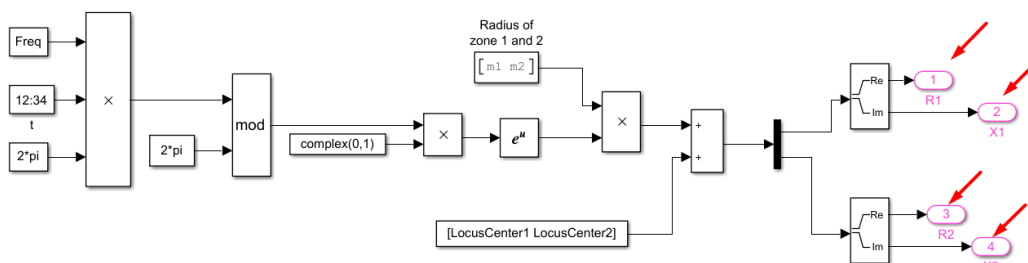
Εικόνα 4.62: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Demux” block εντός του “Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and 2)” block.

Προκειμένου να κατασκευάσουμε τις χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας των ηλεκτρονόμων R-X θα ξεχωρίσουμε το πραγματικό από το φανταστικό μέρος των σύνθετων αντιστάσεων των δυο ζωνών 1 και 2 με δυο “Complex to Real-Imag” blocks. Πατάμε Library Browser / Simulink / Math Operations και επιλογή “Complex to Real-Imag”. Με διπλό κλικ πάνω στα blocks επιλέγουμε έξοδο “Real and imag”:



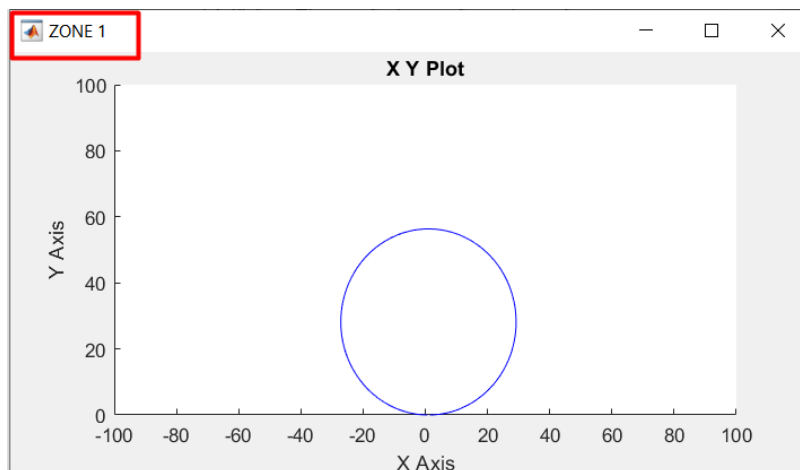
Εικόνα 4.63: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Complex to Real-Imag” block εντός του “Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and 2)” block.

Σε αυτό το υποσύστημα δηλαδή εξάγουμε τα $R1$, $R2$, $X1$ και $X2$ των δυο ζωνών προστασίας:

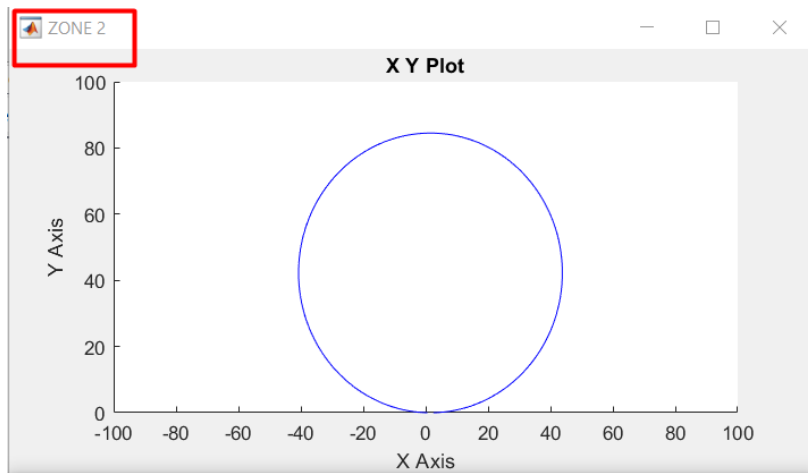


Εικόνα 4.64: Ωμικές αντιστάσεις $R1$, $R2$ και επαγωγικές αντιδράσεις $X1$, $X2$ που τελικώς υπολογίζονται στο “Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and 2)” block.

Απεικόνιση των κύκλων ΜΗΟ των δυο ζωνών προστασίας σε διαγράμματα $X1(R1)$ και $X2(R2)$:

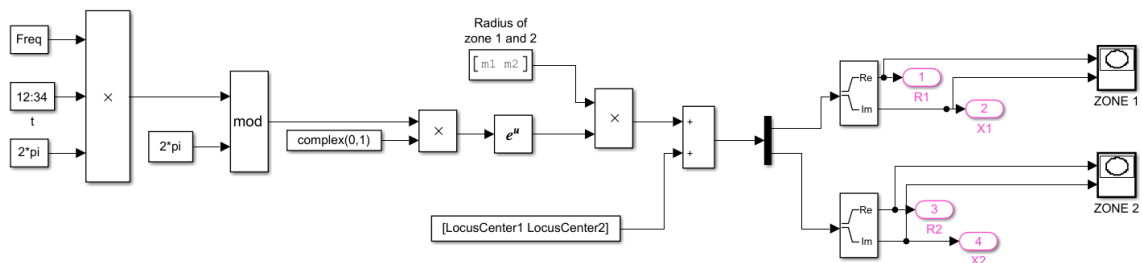


Εικόνα 4.65: Γραφική απεικόνιση του διαγράμματος $X1(R1)$ της ζώνης προστασίας 1.



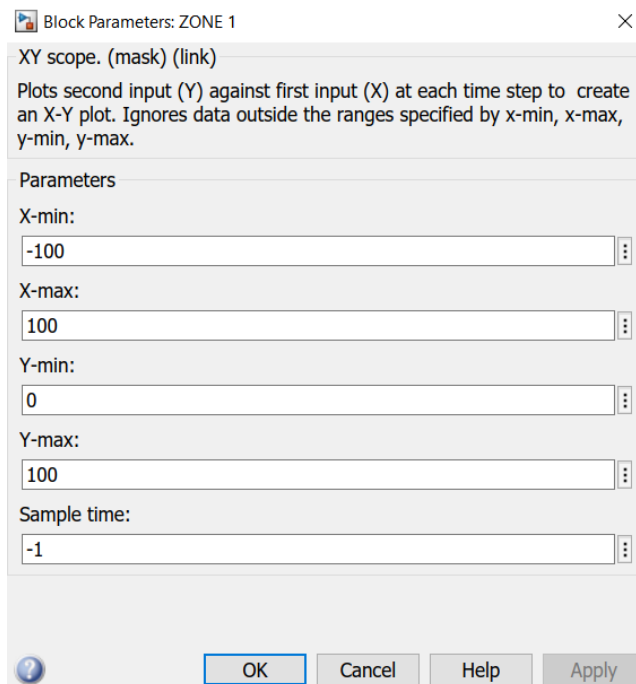
Εικόνα 4.66: Γραφική απεικόνιση του διαγράμματος $X2(R2)$ της ζώνης προστασίας 2.

Η απεικόνιση πραγματοποιήθηκε με “XY Graph” blocks από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Sinks και επιλογή “XY Graph”.



Εικόνα 4.67: “XY scope” blocks “ZONE 1” και “ZONE 2” εντός του “Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and 2)” block.

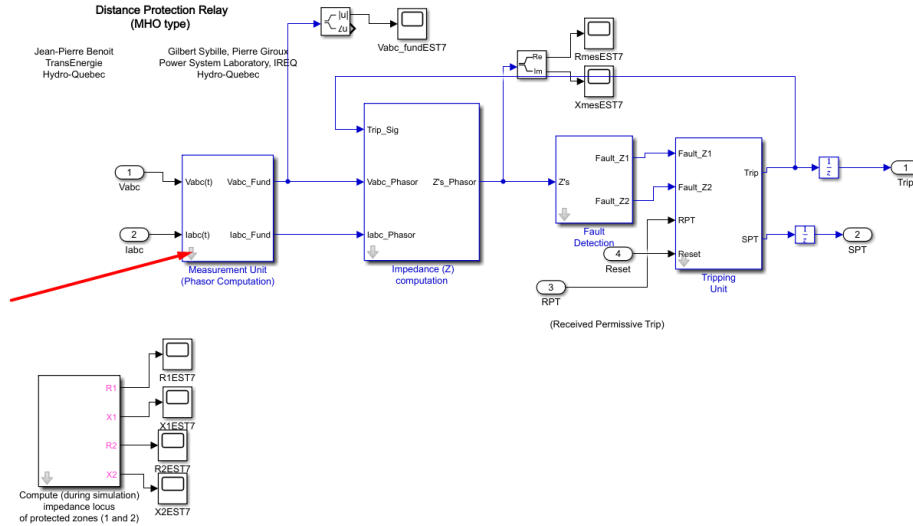
Με διπλό κλικ πάνω τους ρυθμίζουμε τις κλίμακες απεικόνισης (προτείνονται οι παρακάτω):



Εικόνα 4.68: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων των “XY scope” blocks εντός του “Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and 2)” block.

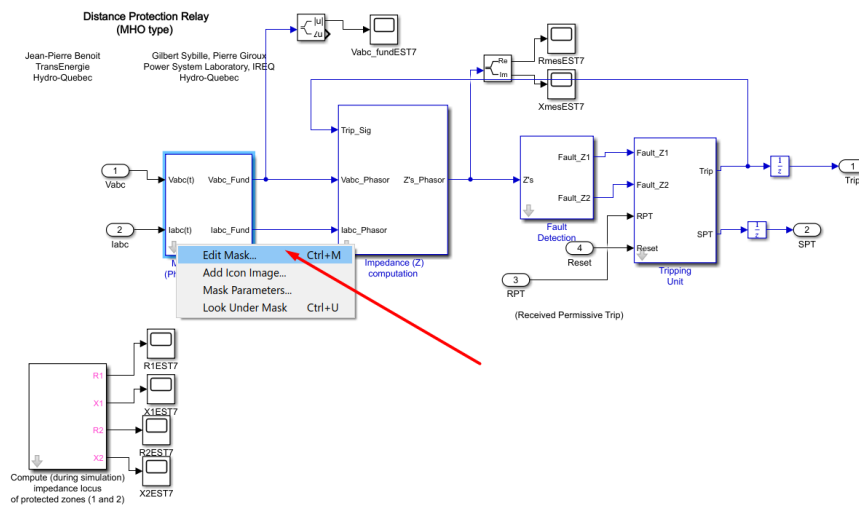
4.8.3 Υπολογισμός μιγαδικών τάσεων και ρευμάτων σε μορφή $a_n + jb_n$

Αρχικά, θα δημιουργήσουμε ένα σύστημα-block το οποίο Θα δέχεται ως είσοδο τις τριφασικές τάσεις και ρεύματα σε ημιτονοειδή μορφή και στην έξοδο του θα παράγει τα ίδια μεγέθη σε μιγαδική μορφή $a_n + jb_n$, με πραγματικό και φανταστικό μέρος. Με δεξί κλικ στο βέλος “Look inside mask”:



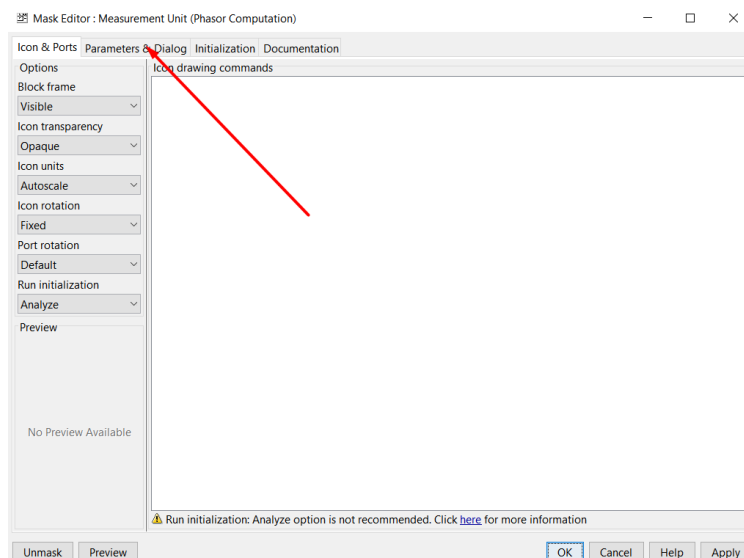
Εικόνα 4.69: “Measurement Unit (Phasor Computation)” block.

Και επιλογή “Edit Mask”:



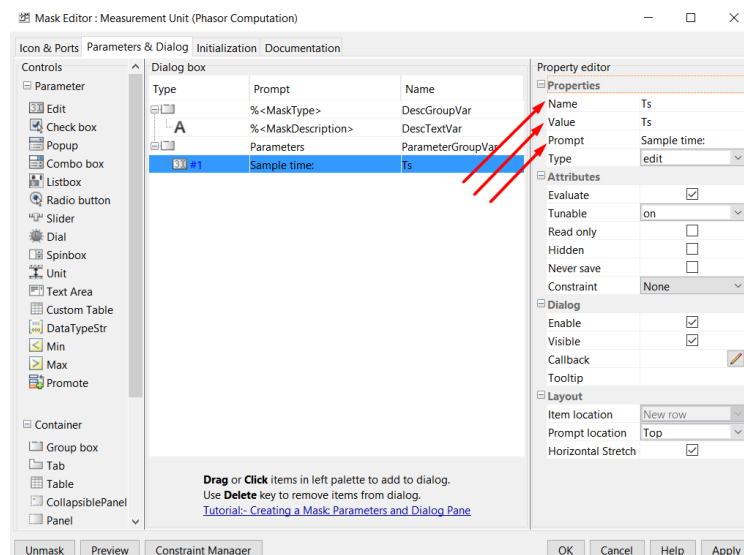
Εικόνα 4.70: Επεξεργασία του “Measurement Unit (Phasor Computation)” block τύπου Mask.

Οδηγούμεστε και πάλι στον “Mask Editor”. Επιλέγοντας την καρτέλα “Parameters & Dialog”:



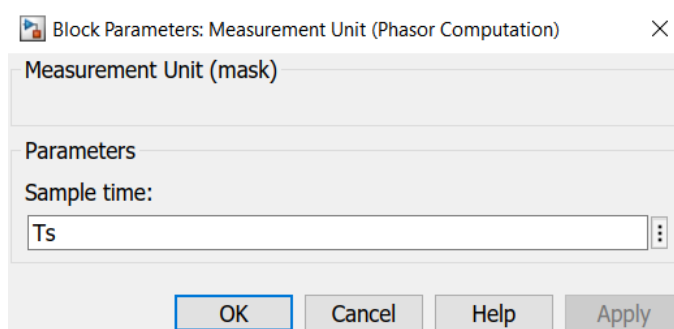
Εικόνα 4.71: Καρτέλα *Parameters & Dialog* του “*Measurement Unit (Phasor Computation)*” block τύπου *Mask*.

Ορίζουμε την μεταβλητή “Sample time” με όνομα, τιμή και περιγραφή.



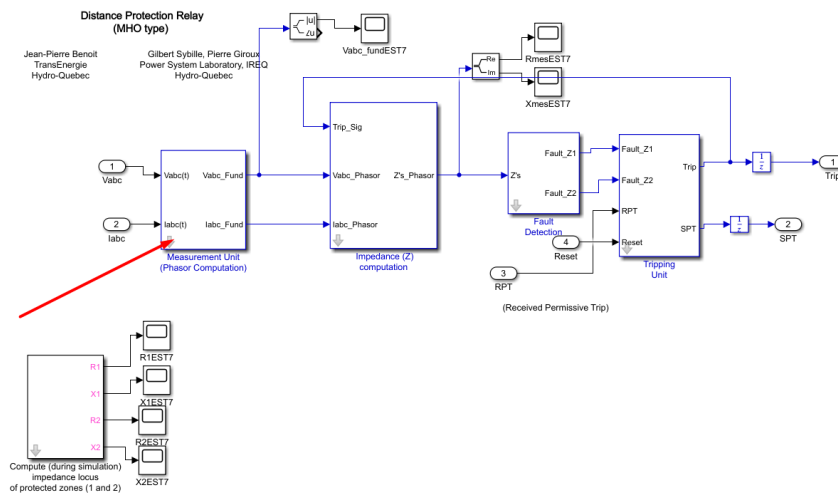
Εικόνα 4.72: Όνομα, τιμή και περιγραφή των παραμέτρων της καρτέλας *Parameters & Dialog* του “*Measurement Unit (Phasor Computation)*” block τύπου *Mask*.

Ο χρήστης με διπλό κλικ πάνω στο μπλοκ εισάγει τον χρόνο δειγματοληψίας που επιθυμεί στο εξής πεδίο:



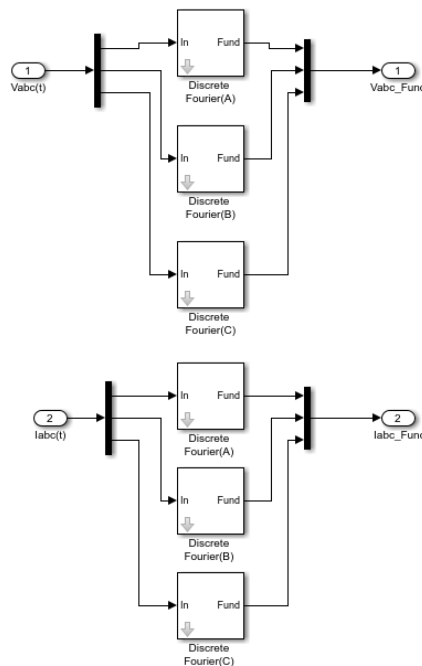
Εικόνα 4.73: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “*Measurement Unit (Phasor Computation)*” block.

Ενώ με επιλογή στο βέλος “Look inside mask” εισέρχεται στο εσωτερικό υποσύστημα.



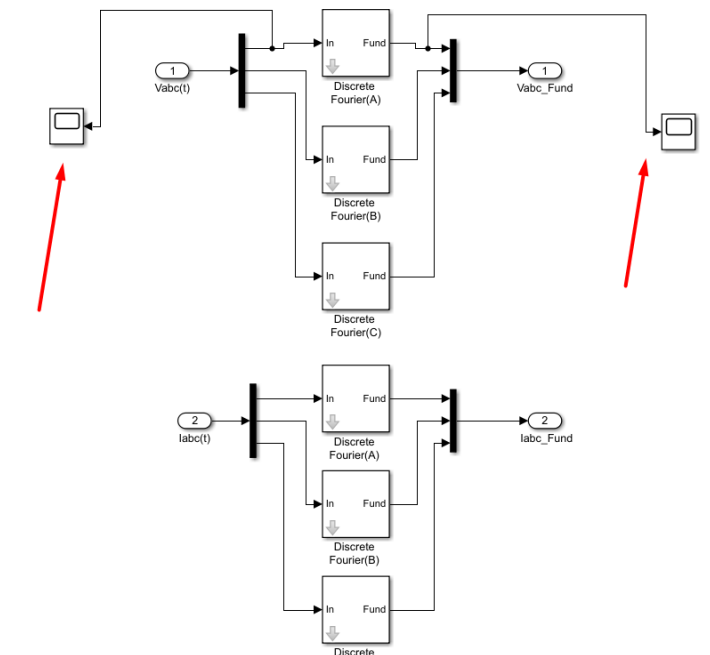
Εικόνα 4.74: Πεδίο “Look inside mask” του “Measurement Unit (Phasor Computation)” block.

Το εσωτερικό υποσύστημα του block “Measurement Unit (Phasor Computation)” πρέπει να έχει την παρακάτω μορφή:



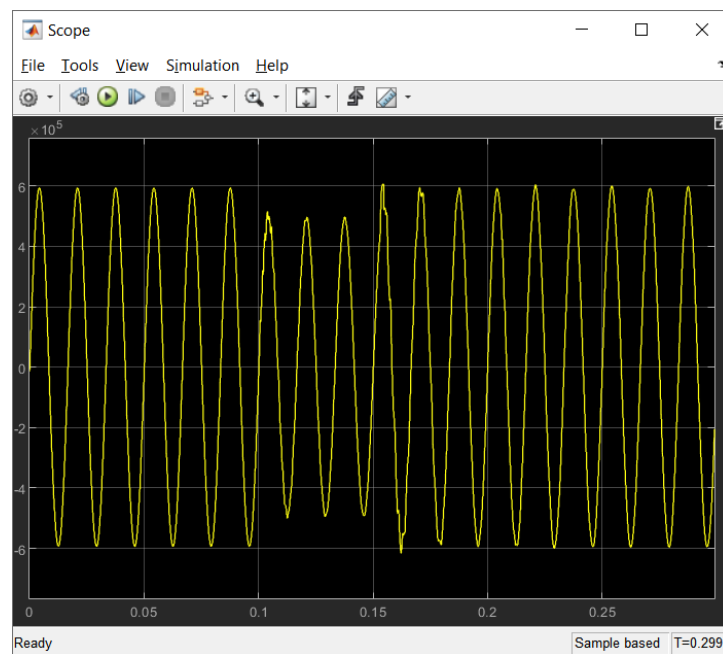
Εικόνα 4.75: Εσωτερικό υποσύστημα του “Measurement Unit (Phasor Computation)” block.

Η κάθε μια από τις τρεις φάσεις της τάσης Vabc και κάθε μια από τις τρεις φάσεις του ρεύματος Iabc εισέρχονται σε blocks εν ονόματι “Discrete Fourier” (θα εξηγηθούν παρακάτω) και από ημιτονοειδή χρονομεταβλητά σήματα μετατρέπονται σε χρονοσταθερά σήματα με στάθμες που αντιστοιχούν στο πραγματικό και το φανταστικό μέρος τους. Με εισαγωγή “Scope” blocks από τη διαδρομή Library Browser / Simulink / Sinks και επιλογή “Scope” μπορούμε να παρακολουθήσουμε τα σήματα εισόδου και εξόδου του συστήματος.



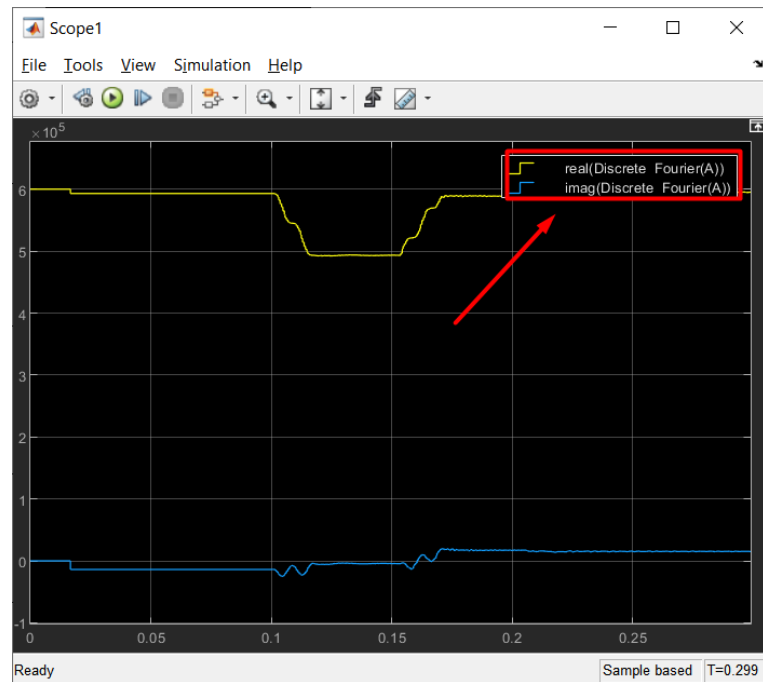
Εικόνα 4.76: : Σημεία σύνδεσης των “Scope” block εντός του “Measurement Unit (Phasor Computation)” block.

Ενδεικτικά για τη φάση α της τάσης V_{abc} , η είσοδος του συστήματος καταγράφεται:



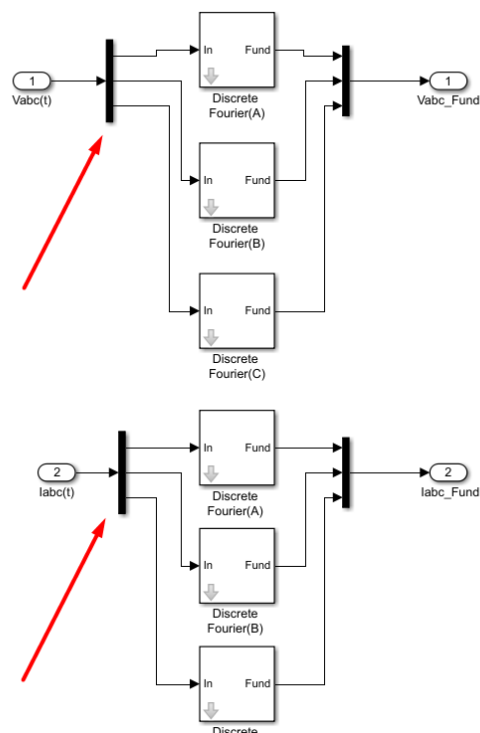
Εικόνα 4.77: Γραφική απεικόνιση της φάσης α της τάσης V_{abc} .

Ενώ το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της εξόδου του συστήματος καταγράφεται:



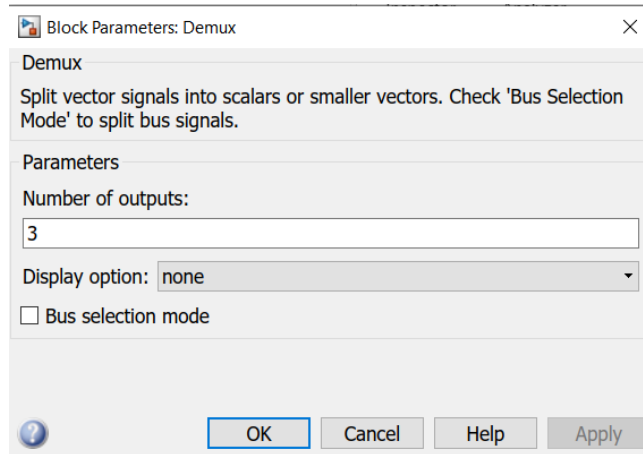
Εικόνα 4.78: Γραφική απεικόνιση του πραγματικού και του φανταστικού μέρους της φάσης α της τάσης V_{abc} .

Για αυτή την υλοποίηση θα χρειαστεί να εισάγουμε δυο αποπλέκτες 1 σε 3 από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Demux”, ώστε να επεξεργαστούμε την κάθε μια από τις τρεις φάσεις είτε της τάσης είτε του ρεύματος ξεχωριστά.



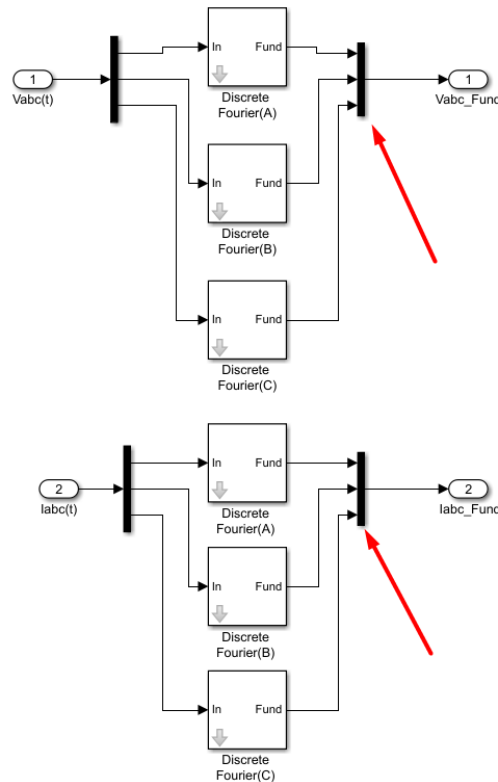
Εικόνα 4.79: “Demux” blocks του “Measurement Unit (Phasor Computation)” block.

Με διπλό κλικ πάνω τους θα ορίσουμε τον αριθμό των εξόδων (3 στην προκειμένη περίπτωση).



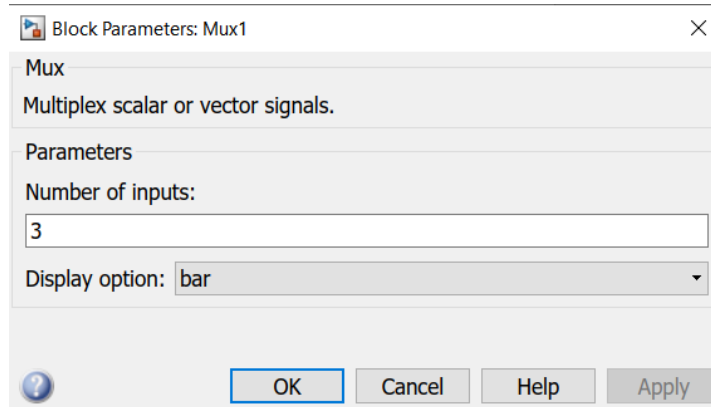
Εικόνα 4.80: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Demux” block εντός του “Measurement Unit (Phasor Computation)” block.

Ταυτόχρονα δυο πολυπλέκτες είναι απαραίτητοι στην έξοδο των “Discrete Fourier” blocks που εισάγονται από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Mux”.



Εικόνα 4.81: “Mux” blocks του “Measurement Unit (Phasor Computation)” block.

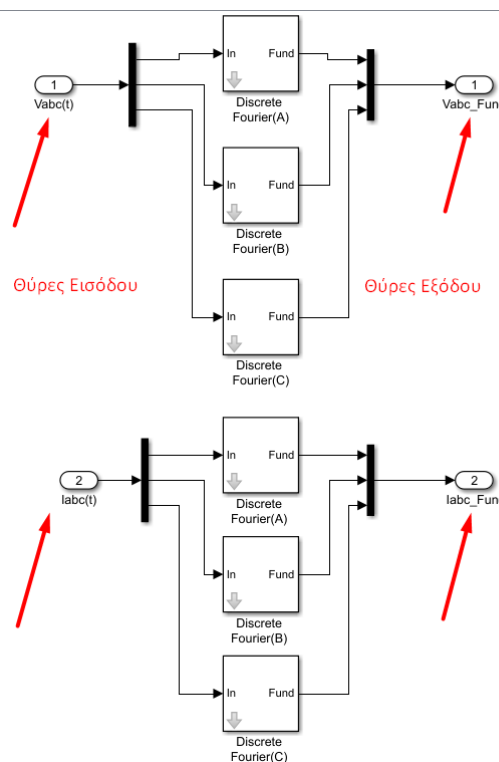
Με διπλό κλικ πάνω τους θα ορίσουμε τον αριθμό των εξόδων (3 στην προκείμενη περίπτωση).



Εικόνα 4.82: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων των “Mux” blocks εντός του “Measurement Unit (Phasor Computation)” block.

Θα χρειαστούν επίσης δυο “Inports” για τις τάσεις V_{abc} και τα ρεύματα I_{abc} και δυο “Outports” για τις τάσεις V_{abc_Fund} και τα ρεύματα I_{abc_Fund} .

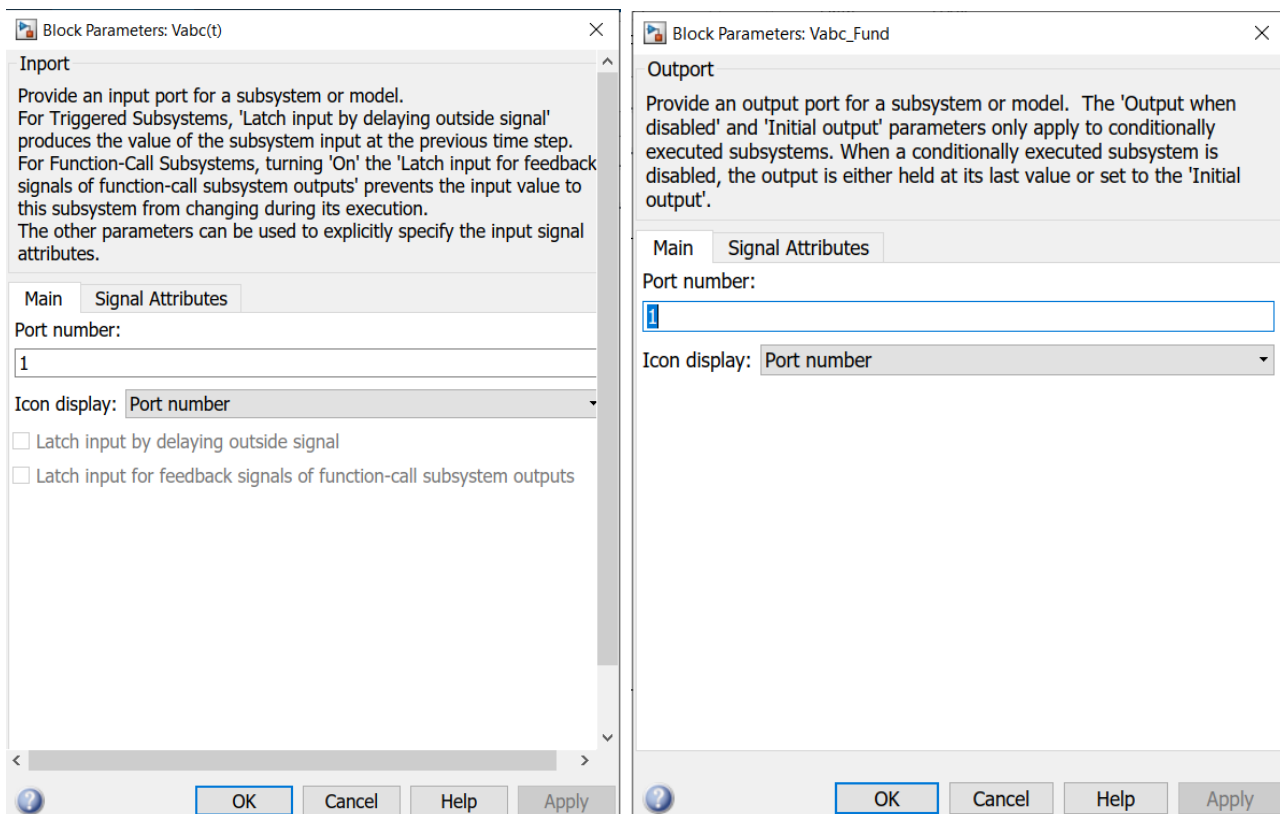
Τα “Inports” και τα “Outports” αποτελούν θύρες εισόδου και εξόδου αντίστοιχα, οι οποίες επικοινωνούν με το υπόλοιπο μοντέλο που έχουμε κατασκευάσει στο Simulink. Εισάγονται από τη διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Inport” ή “Outport”.



Εικόνα 4.83: “Inport” και “Outport” blocks του “Measurement Unit (Phasor Computation)” block.

Με διπλό κλικ πάνω τους εισάγει ο χρήστης τον αριθμό της θύρας που επιθυμεί (1 ή 2

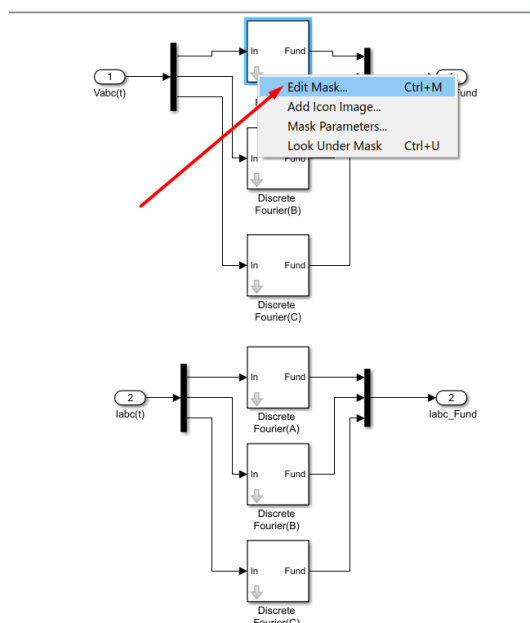
εν προκειμένω).



Εικόνα 4.84: Παράθυρα ορισμού παραμέτρων των “Inport” και “Outport” blocks εντός του “Measurement Unit (Phasor Computation)” block.

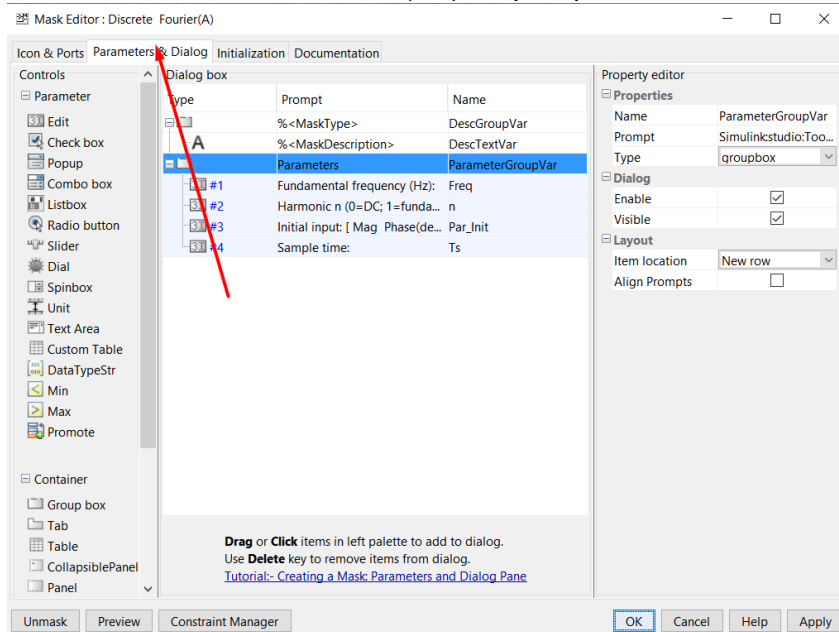
Το block που μετατρέπει τα ημιτονοειδή σήματα σε στάθμες πραγματικού και φανταστικού μέρους όπως είχαμε αναφέρει παραπάνω θα το ονομάσουμε “Discrete Fourier” καθώς εσωτερικά του, θα μετασχηματίζεται με διακριτό μετασχηματισμό Fourier η θεμελιώδης συνιστώσα του σήματος εισόδου.

Με δεξί κλικ στο βέλος “Look inside mask” και επιλογή “Edit Mask”



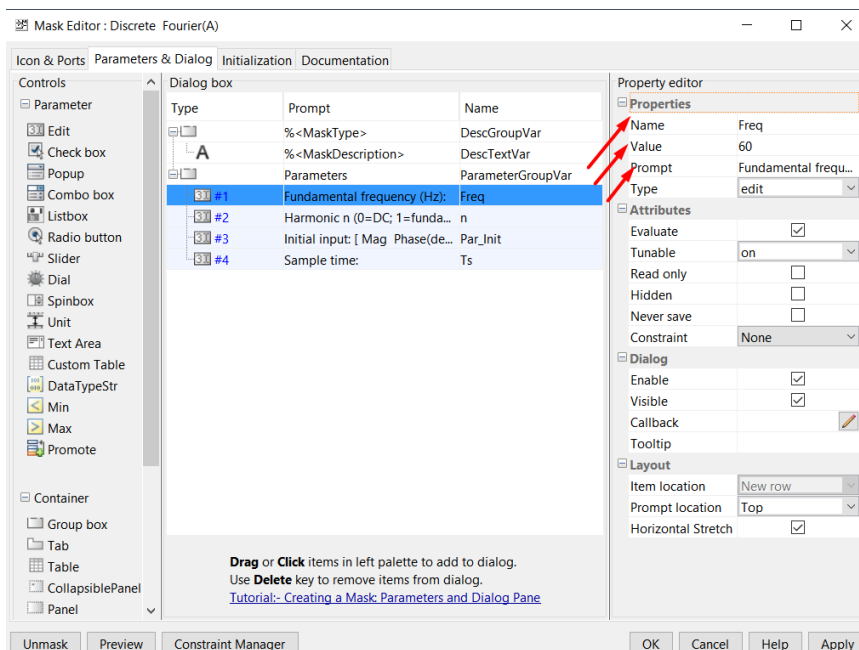
Εικόνα 4.85: Επεξεργασία του “Discrete Fourier” block τύπου Mask.

Ανοίγεται ο “Mask Editor”, από τον οποίο επιλέγουμε την καρτέλα “Parameters & Dialog”.



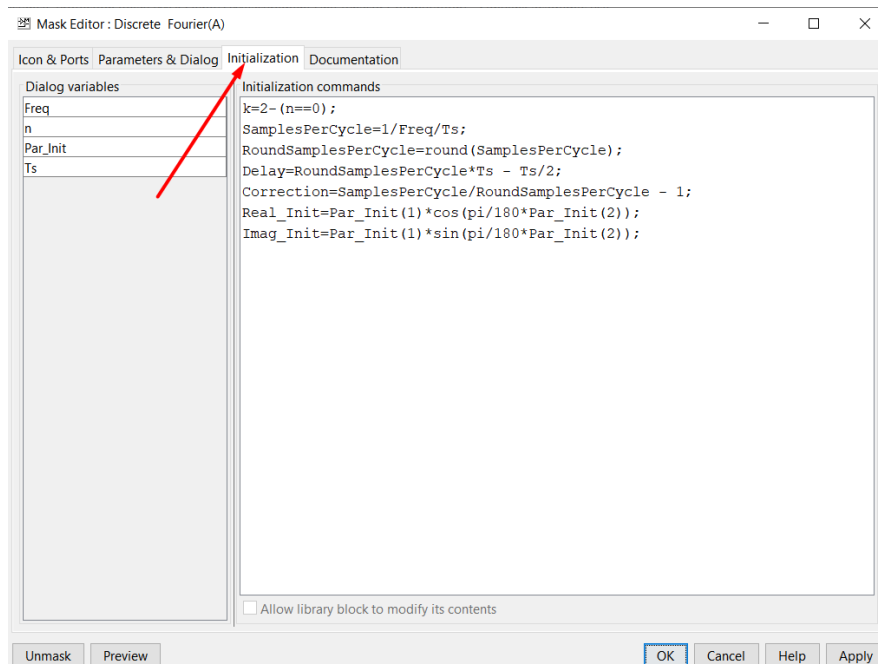
Εικόνα 4.86: Καρτέλα Parameters & Dialog του “Discrete Fourier” block τύπου Mask.

Σε αυτό το σημείο μπορούμε να δηλώσουμε μεταβλητές και να επεξεργαστούμε το όνομα τους, την τιμή τους και την ετικέτα τους. Στην προκειμένη περίπτωση θα χρειαστεί να ορίσουμε τη θεμελιώδη συχνότητα, το πλήθος των αρμονικών συνιστωσών, την αρχική τιμή της εισόδου και τον χρόνο δειγματοληψίας στο δεξί μέρος της καρτέλας.



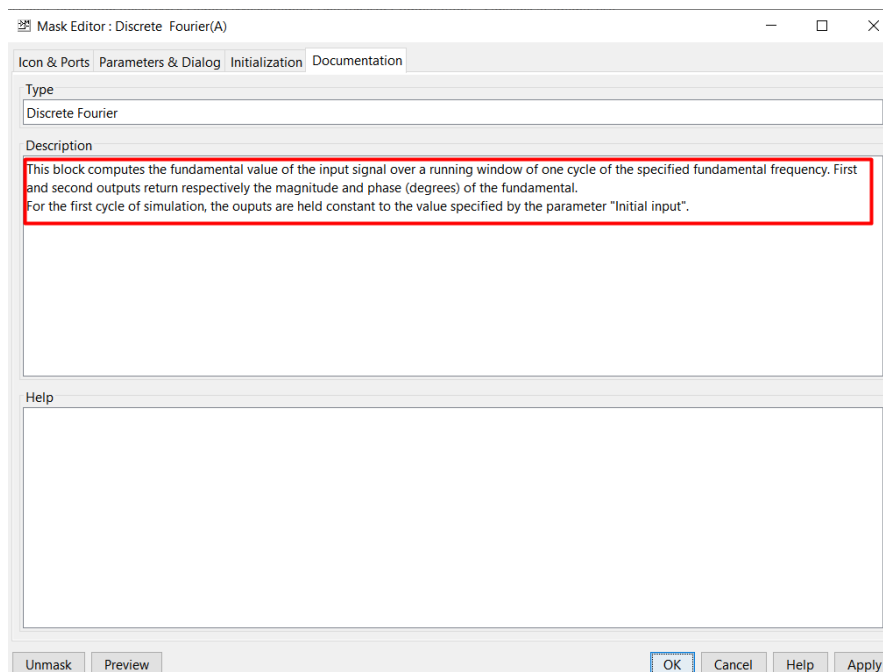
Εικόνα 4.87: Όνομα, τιμή και περιγραφή των παραμέτρων της καρτέλας Parameters & Dialog του “Discrete Fourier” block τύπου Mask.

Στην καρτέλα “Initialization” του “Mask Editor” προγραμματίζονται οι σχέσεις και οι συναρτήσεις των ορισμάτων με μεταβλητές που έχουν ορισθεί στο Matlab.



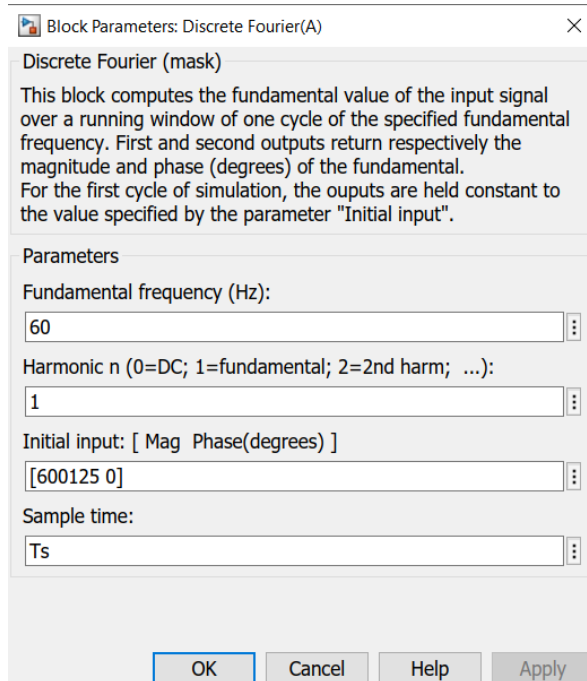
Εικόνα 4.88: Καρτέλα Initialization του “Discrete Fourier” block τύπου Mask.

Αν το επιθυμούμε μπορούμε στην καρτέλα “Documentation” να προσθέσουμε περιγραφή στο block ώστε να γίνεται πιο κατανοητή η λειτουργία του στον χρήστη.



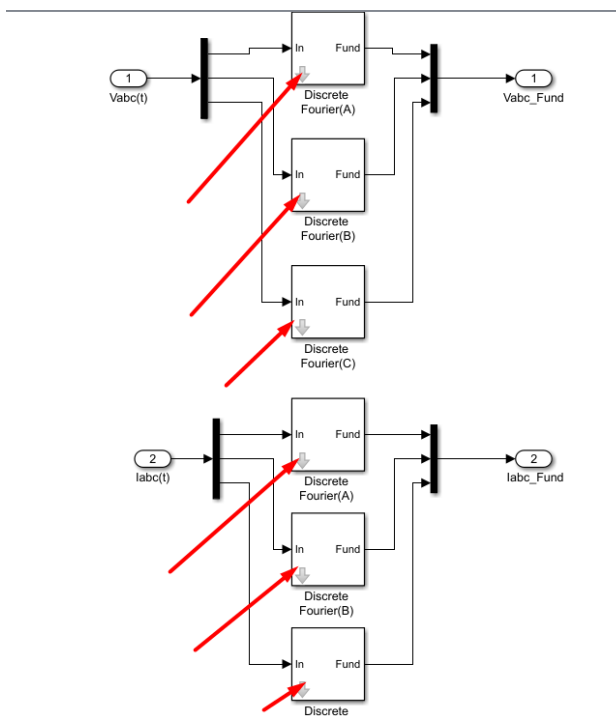
Εικόνα 4.89: Καρτέλα Documentation του “Discrete Fourier” block τύπου Mask.

Έχει κατασκευαστεί έτσι ένα μπλοκ με όνομα “Discrete Fourier” που με διπλό κλικ πάνω του αναγράφεται η περιγραφή του και δηλώνονται οι προαναφερθείσες μεταβλητές.



Εικόνα 4.90: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Discrete Fourier” block.

Στο πεδίο “Fundamental frequency” εισάγεται η θεμελιώδης συχνότητα του δικτύου. Στο πεδίο “Harmonic n” με την εισαγωγή του αριθμού 1, κρατάμε τη θεμελιώδη συνιστώσα του σήματος εισόδου. Στο πεδίο “Initial input” εισάγεται το πλάτος του σήματος εισόδου και η φασική του γωνία (για την φάση α, η οποία είναι η φάση αναφοράς, προφανώς η γωνία είναι μηδενική). Στο πεδίο “Sample time” εισάγεται ο επιθυμητός χρόνος δειγματοληψίας. Στο εσωτερικό του μπλοκ “Discrete Fourier”, πατώντας το βέλος “Look inside mask”,

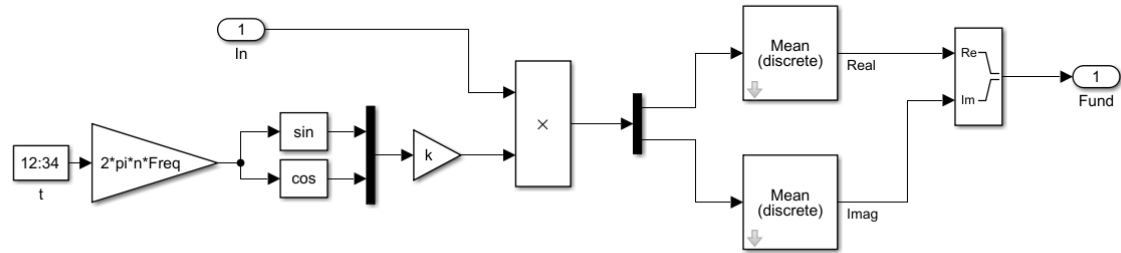


Εικόνα 4.91: Πεδία “Look inside mask” των “Discrete Fourier” blocks των φάσεων a, b, c των τάσεων V_{abc} και των ρευμάτων I_{abc} .

θα πρέπει να περιέχεται το παρακάτω υποσύστημα:

Discrete Fourier

Pierre Giroux, Gilbert Sybille
Power System Simulation Laboratory
IREQ, Hydro-Quebec



Εικόνα 4.92: Εσωτερικό υποσύστημα του “Discrete Fourier” block.

Την περιοδική συνάρτηση “In”, όπως και κάθε περιοδική συνάρτηση, μπορούμε να την εκφράσουμε σαν άπειρο άθροισμα ημιτόνων και συνημιτόνων. Συγκεκριμένα:

$$In(t) = \frac{a_0}{2} + \sum [a_n \cos(nt) + b_n \sin(nt)]$$

Όπου a_0 είναι η dc συνιστώσα (μηδενική εν προκειμένω), a_n και b_n οι σταθεροί συντελεστές Fourier και “n” ο συντελεστής των αρμονικών. Οι σταθεροί συντελεστές Fourier υπολογίζονται ως ακολούθως:

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} In(t) \cos(n2\pi ft) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} In(t) \sin(n2\pi ft) dt$$

$$n=0, 1, \dots$$

Επομένως το πραγματικό και φανταστικό μέρος του σήματος $In(t)$ θα προκύψει:

$$In(t) = a_n + jb_n$$

Συλλογιστική πορεία:

- Θα σχηματίσουμε αρχικά τους όρους $2 * \cos(n2\pi ft)$ και $2 * \sin(n2\pi ft)$.
- Έπειτα θα τους πολλαπλασιάσουμε με το ημιτονοειδές $In(t)$ και θα προκύψουν τα γινόμενα: $2In(t) \cos(n2\pi ft)$ και $2In(t) \sin(n2\pi ft)$.
- Τέλος, για το κάθε ένα γινόμενο από τα παραπάνω θα βρεθεί η μέση τιμή του με στόχο να σχηματιστούν οι όροι a_n και b_n :

$$a_n = \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} 2In(t) \cos(n2\pi ft) dt$$

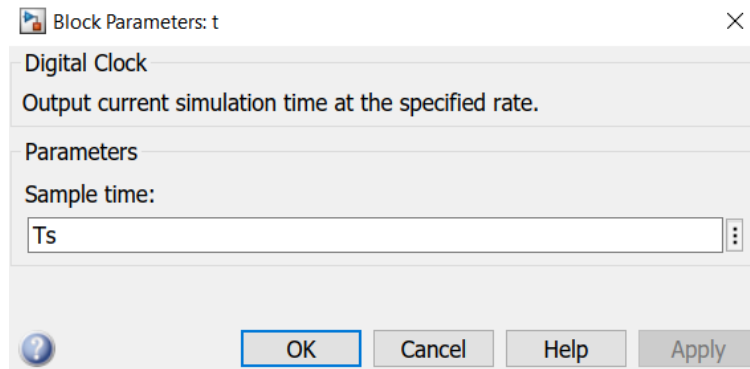
$$b_n = \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} 2In(t) \sin(n2\pi ft) dt$$

$$n=1 \text{ (θεμελιώδης)}$$

Οι οποίοι είναι το πραγματικό και το φανταστικό μέρος του σήματος εξόδου του συστήματος-block “Discrete Fourier”.

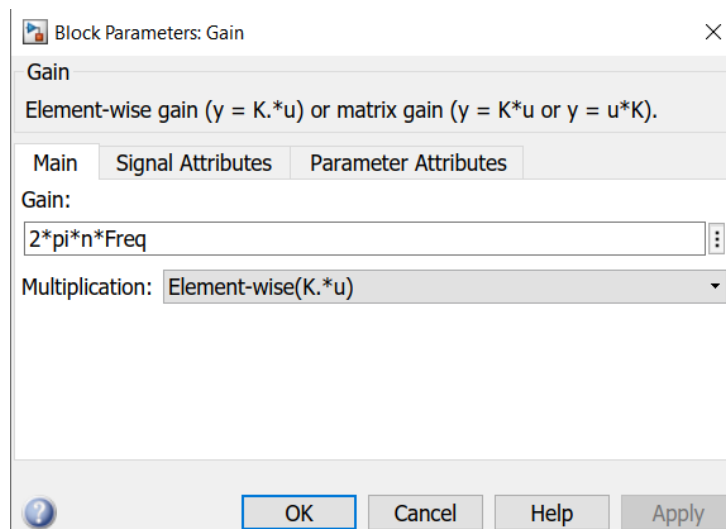
Υλοποίηση:

Από τη διαδρομή Library Browser / Simulink / Sources και επιλογή “Digital Clock” εισάγουμε ένα ψηφιακό ρολόι για την προσομοίωση μας με χρόνο δειγματοληψίας που ορίζουμε με διπλό κλικ πάνω του.



Εικόνα 4.93: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Digital Clock” block εντός του “Discrete Fourier” block.

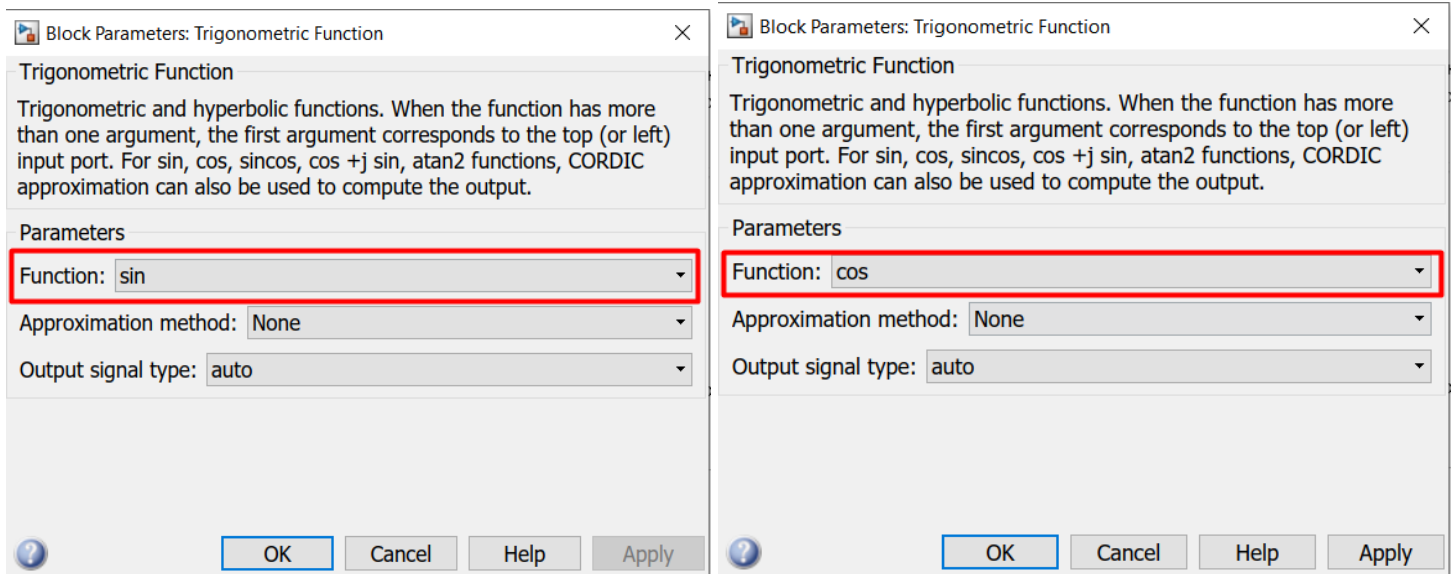
Έπειτα, από τη διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Gain” εισάγουμε έναν block που πολλαπλασιάζει την είσοδο του κατά ένα κέρδος “Gain” που ορίζουμε με διπλό κλικ πάνω του.



Εικόνα 4.94: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Gain” block εντός του “Discrete Fourier” block.

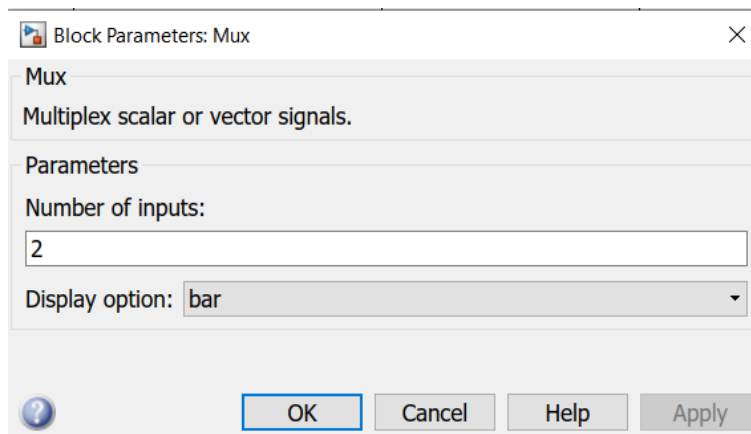
Οι μεταβλητές π , n , Freq έχουν ορισθεί στο Matlab και αντιστοιχούν στην μαθηματική σταθερά π , στον αριθμό της αρμονικής συνιστώσας και στην θεμελιώδη συχνότητα αντίστοιχα. Έχουμε φτιάξει μέχρι τώρα τον όρο “ $n2\pi ft$ ” ή “ $n\omega t$ ”, τον οποίο θα εισάγουμε στους τριγωνομετρικούς αριθμούς ημιτόνου και συνημιτόνου. Από τη διαδρομή Library Browser / Simulink / Math Operation θα

εισάγουμε δυο “Trigonometric Function” blocks. Με διπλό κλικ πάνω τους επιλέγουμε στα πεδία “Function”, “sin” και “cos” αντίστοιχα.



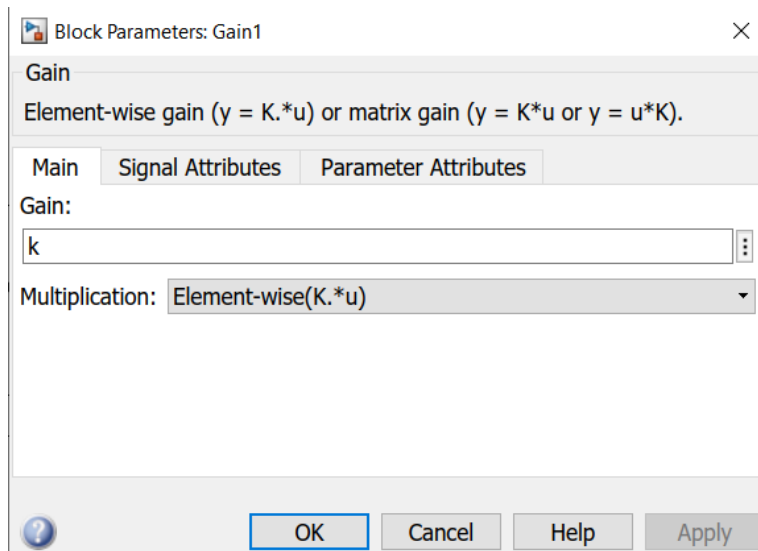
Εικόνα 4.95: Παράθυρα ορισμού παραμέτρων των “Trigonometric Function” blocks εντός του “Discrete Fourier” block.

Τις δυο εξόδους του ημιτόνου και του συνημιτόνου θα τις περάσουμε σε έναν πολυπλέκτη που θα εισαχθεί από Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Mux”. Με διπλό κλικ πάνω του επιλέγουμε “number of inputs” 2.



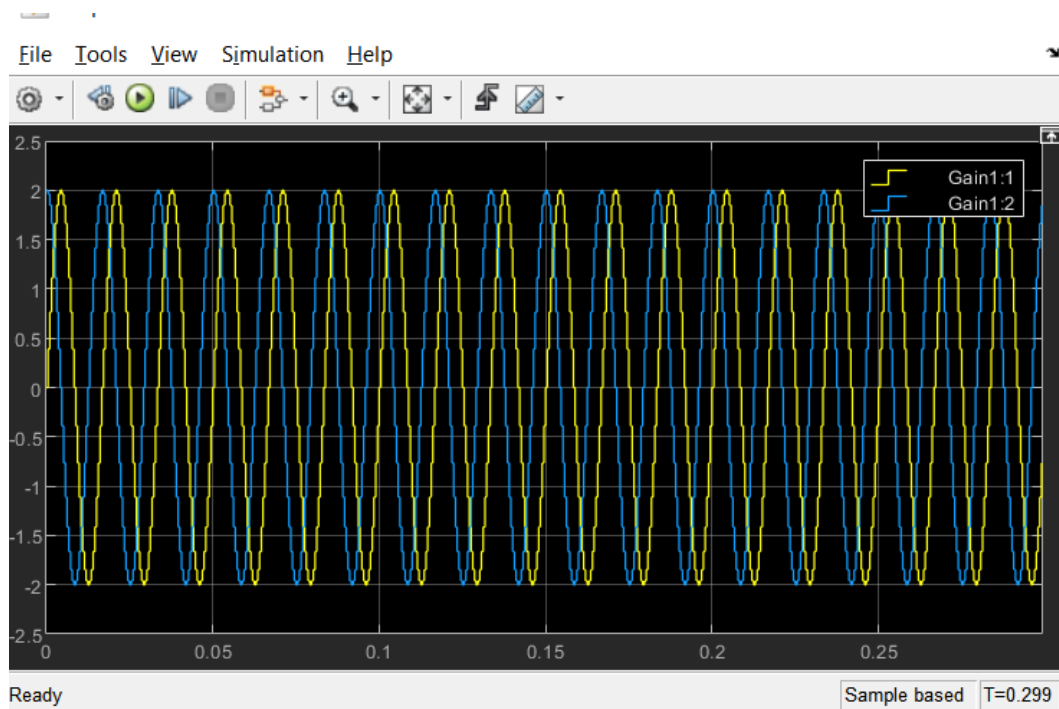
Εικόνα 4.96: Παράθυρα ορισμού παραμέτρων των “Mux” blocks εντός του “Discrete Fourier” block.

Για να διπλασιάσουμε το πλάτος τους, θα χρειαστούμε άλλον έναν ενισχυτή πλάτους με τιμή $k=2$. Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Gain” και με διπλό κλικ εισάγουμε το κέρδος k (ορισμένο και αυτό στο Matlab με τιμή $k=2$).



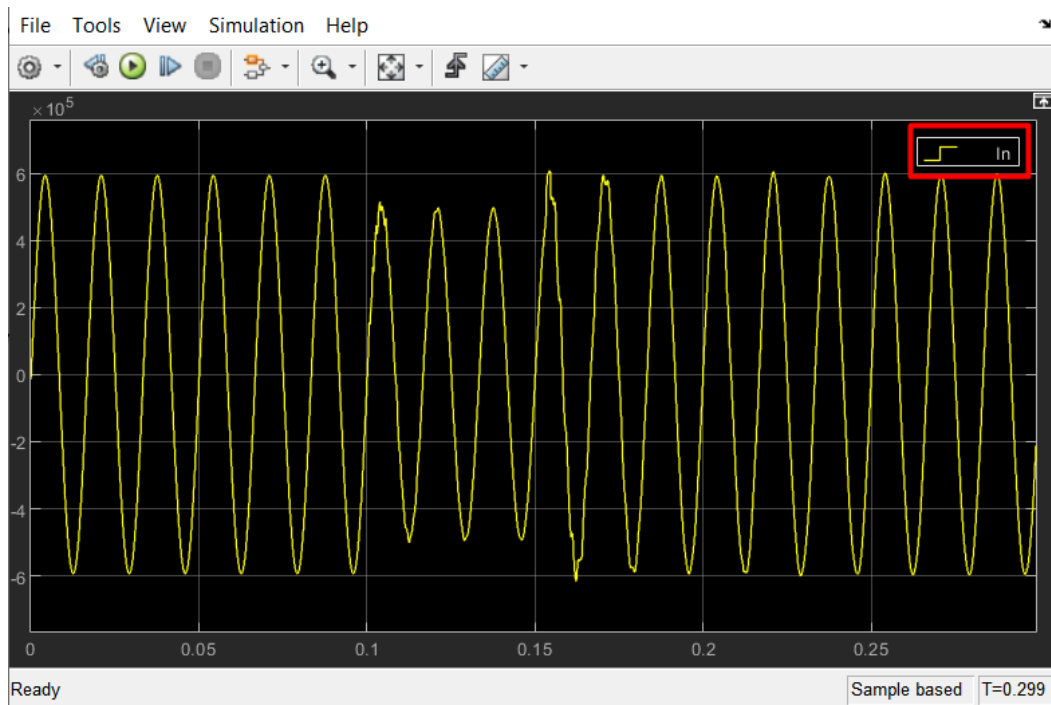
Εικόνα 4.97: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του δεύτερου “Gain” block εντός του “Discrete Fourier” block.

Στην παρούσα φάση στην έξοδο του πολυπλέκτη έχουμε κατασκευάσει τους όρους $2\cos(n2\pi ft)$ και $2\sin(n2\pi ft)$.



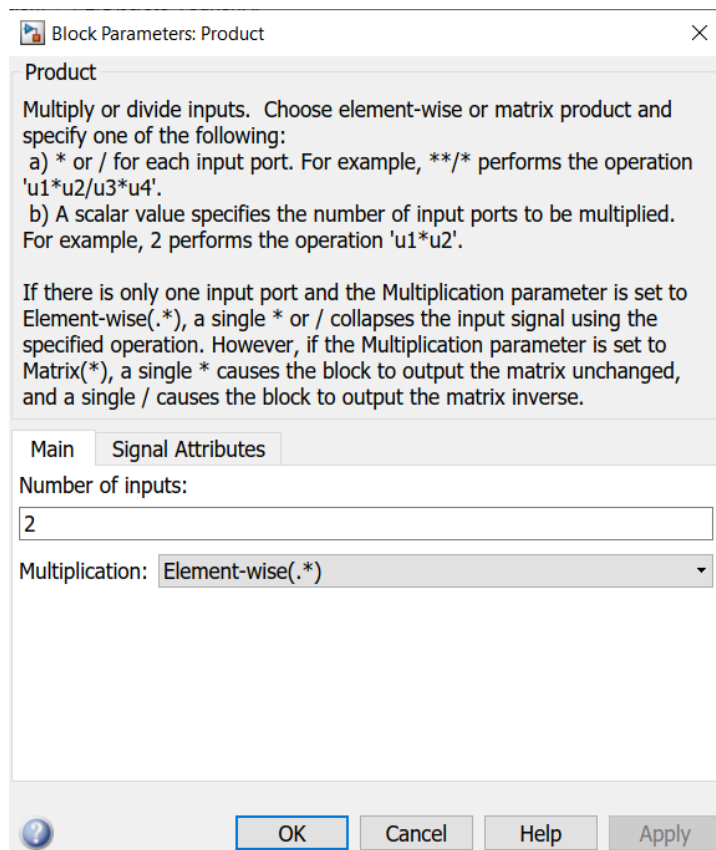
Εικόνα 4.98: Γραφική απεικόνιση των όρων “ $2\cos(n2\pi ft)$ ” και “ $2\sin(n2\pi ft)$ ”.

Σε ένα “Product” block θα εισάγουμε την έξοδο του πολυπλέκτη και το ημιτονοειδές σήμα εισόδου “In”:



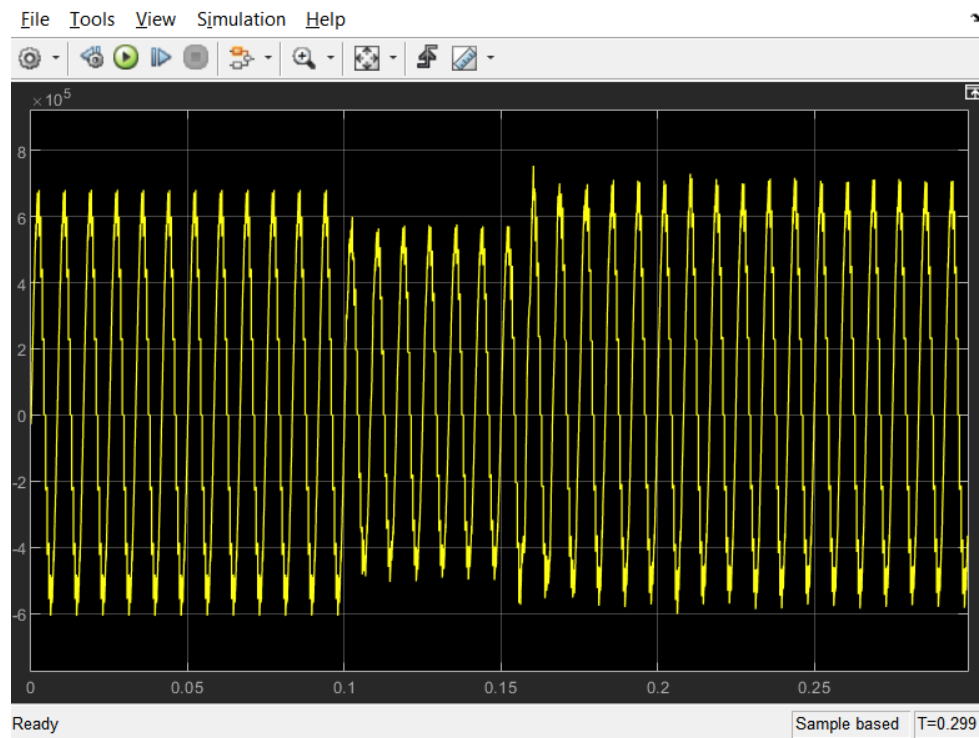
Εικόνα 4.99: Γραφική απεικόνιση του σήματος “ I_n ”.

Το “Product” block θα εισαχθεί από τη διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Product”. Με διπλό κλικ ορίζουμε “number of inputs” 2:



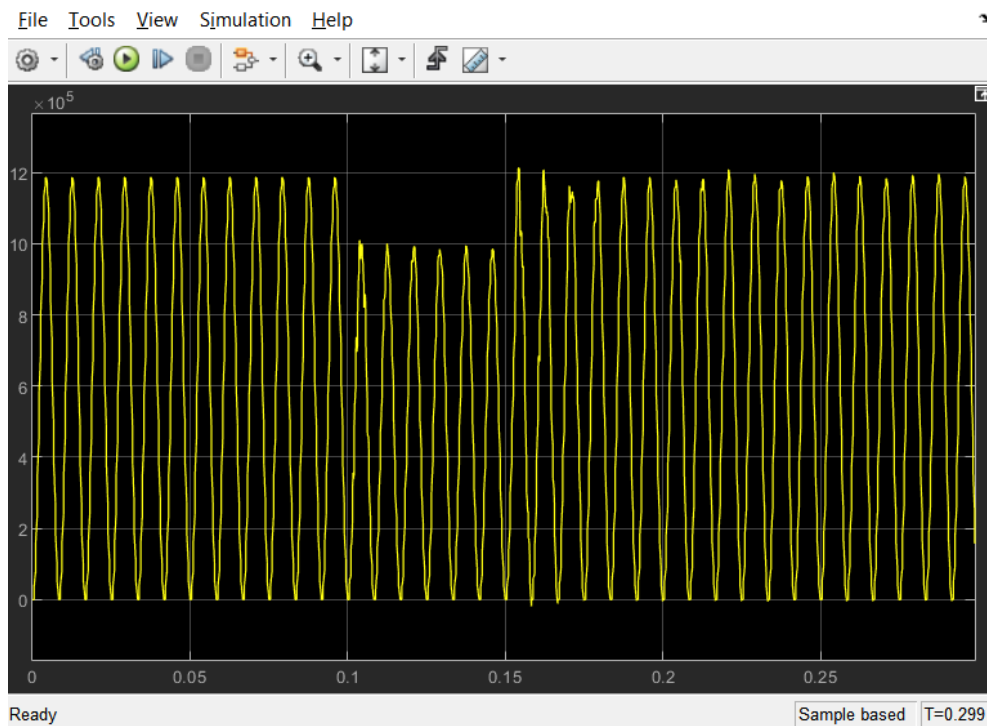
Εικόνα 4.100: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Product” block εντός του “Discrete Fourier” block.

Στην έξοδο του Product block θα λάβουμε τους όρους $2In(t) \cos(n2\pi ft)$ και $2In(t) \sin(n2\pi ft)$. Ο πρώτος όρος, για την θεμελιώδη συνιστώσα ($n=1$) που ενδιαφερόμαστε, αποτελεί την συνάρτηση $A \sin(\omega t) \cos(\omega t)$.



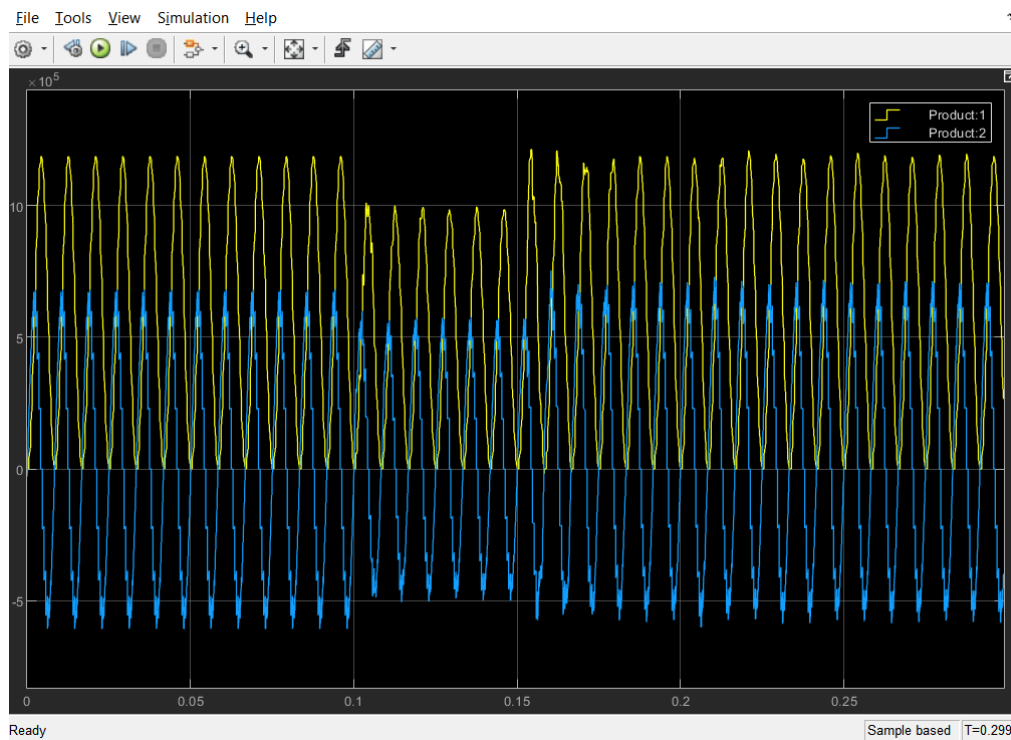
Εικόνα 4.101: Γραφική απεικόνιση της συνάρτησης “ $A \sin(\omega t) \cos(\omega t)$ ”.

Ο δεύτερος όρος, για την θεμελιώδη συνιστώσα ($n=1$) που ενδιαφερόμαστε, αποτελεί την συνάρτηση $A \sin^2(\omega t)$.



Εικόνα 4.102: Γραφική απεικόνιση της συνάρτησης “ $A \sin^2(\omega t)$ ”.

Αν τους απεικονίσουμε σε κοινούς άξονες:



Εικόνα 4.103: Γραφική απεικόνιση των συναρτήσεων “ $A \sin(\omega t) \cos(\omega t)$ ” και “ $A \sin(\omega t)^2$ ”.

Οι συντελεστές

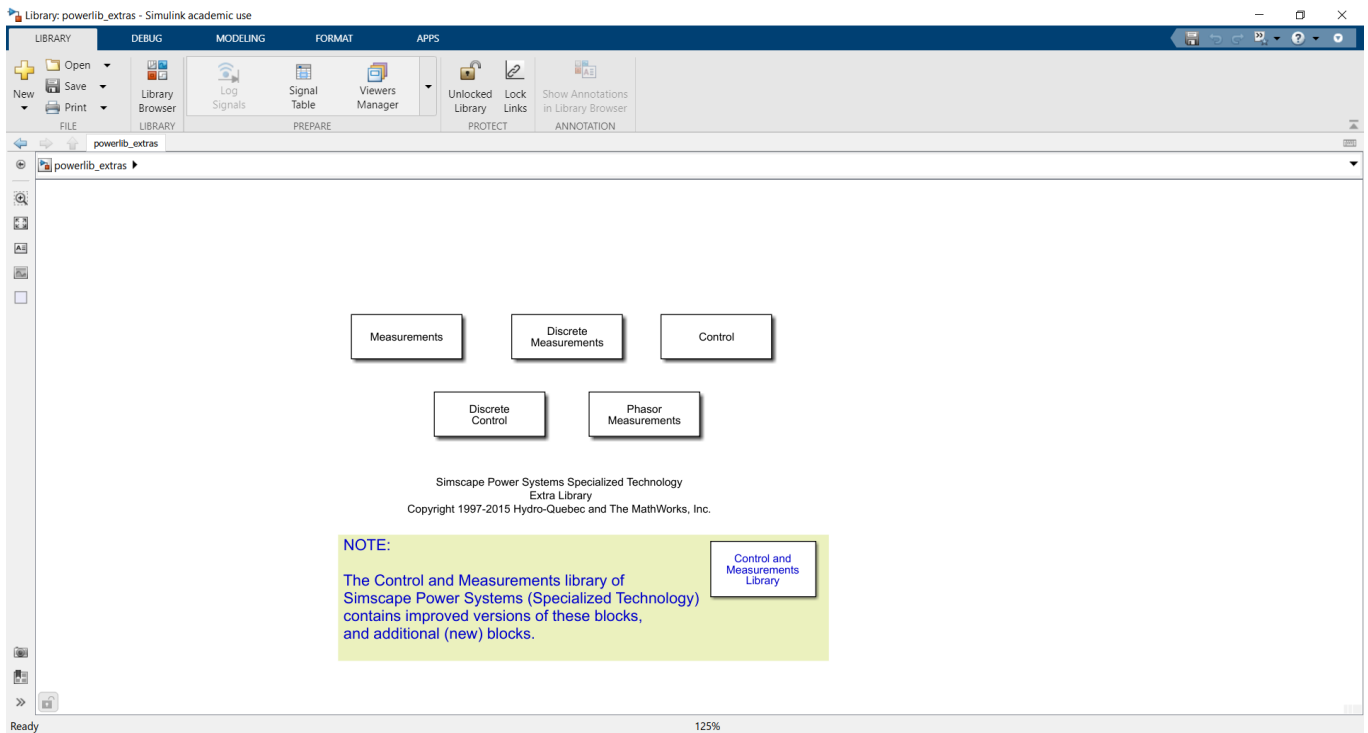
$$a_n = \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} 2 \ln(t) \cos(n 2 \pi f t) dt$$

$$b_n = \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} 2 \ln(t) \sin(n 2 \pi f t) dt$$

$n=1$ (θεμελιώδης)

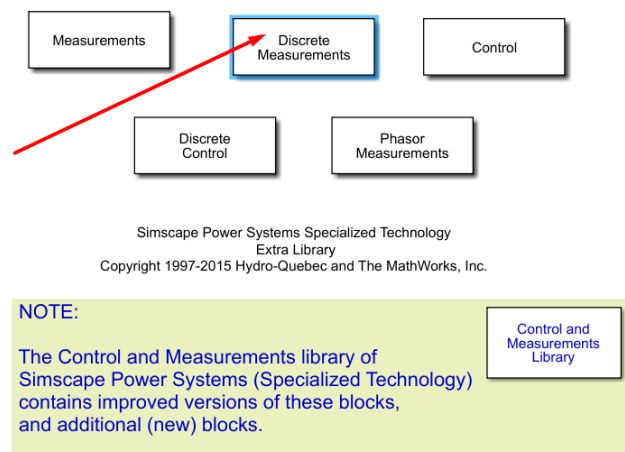
προκύπτουν ως μέσες τιμές διακριτού χρόνου των παραπάνω δυο όρων στη διάρκεια της προσομοίωσης.

Το block που υπολογίζει τη μέση τιμή (mean value) σημάτων διακριτού χρόνου υπάρχει έτοιμο στην εξωτερική βιβλιοθήκη “powerlib_extras”, η οποία περιέχει τις παρακάτω κατηγορίες:



Εικόνα 4.104: Βιβλιοθήκη “powerlib_extras”.

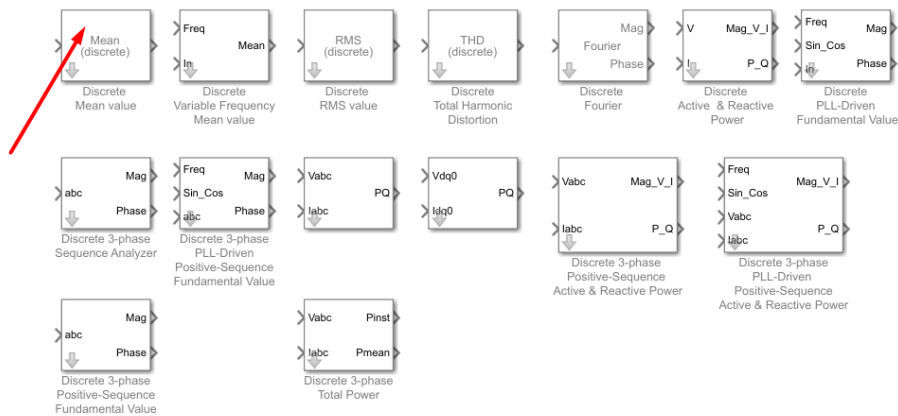
Πατώντας διπλό κλικ στο σύστημα “Discrete Measurements”:



Εικόνα 4.105: Κατηγορία “Discrete Measurements” της βιβλιοθήκης “powerlib_extras”.

Βρίσκουμε το block που αναζητούμε:

The Measurements sub-library of the Control and Measurements library contains improved version of the following blocks :



The Transformations sub-library of the Control and Measurements library contains improved version of the following blocks :

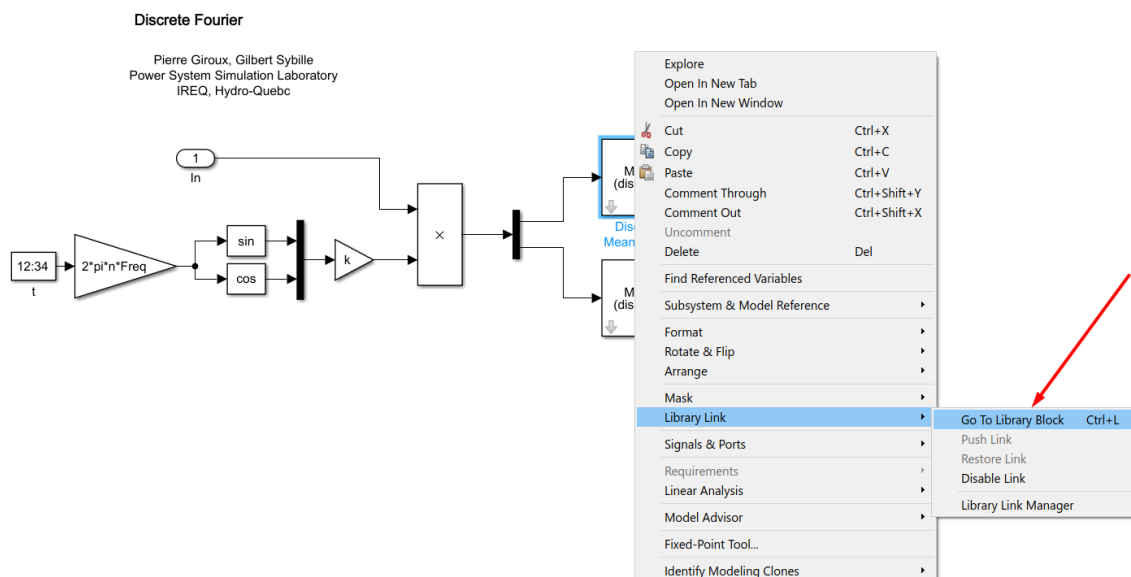


The following block is no longer maintained as a library block, but as an example



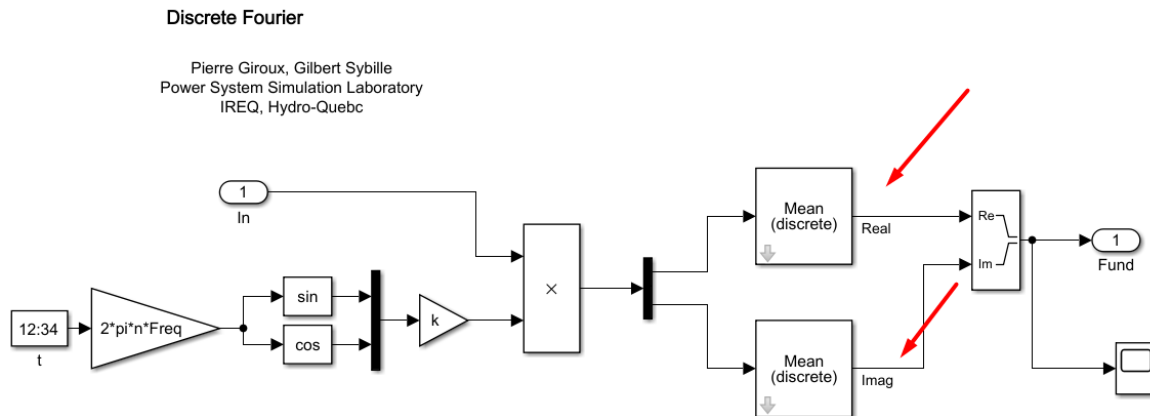
Εικόνα 4.106: “Discrete Mean Value” block εντός της κατηγορίας “Discrete Measurements” της βιβλιοθήκης “powerlib_extras”.

Σημείωση: Θα μπορούσαμε να βρούμε απευθείας την προέλευση του “Mean (discrete)” block με δεξί κλικ επάνω στο block και επιλογή Library Link / Go to Library Block:



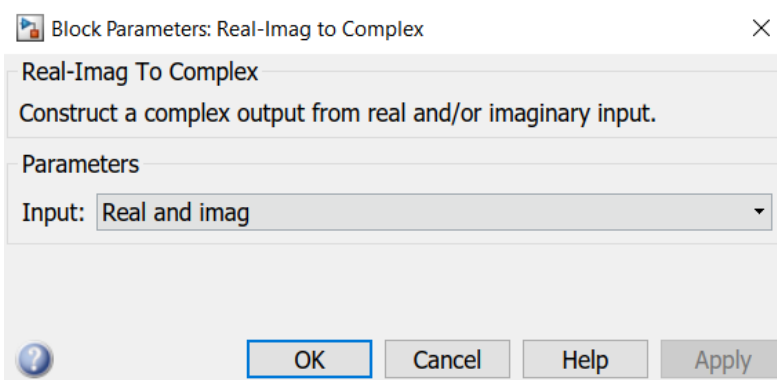
Εικόνα 4.107: Εύρεση της προέλευσης του “Discrete Mean Value” block μέσω του συνδέσμου “Go To Library Block”.

Στην έξοδο των “Mean (discrete)” blocks λαμβάνουμε τους όρους a_n και b_n , οι οποίοι αποτελούν το πραγματικό και φανταστικό μέρος του σήματος εισόδου του εν προκειμένω συστήματος:



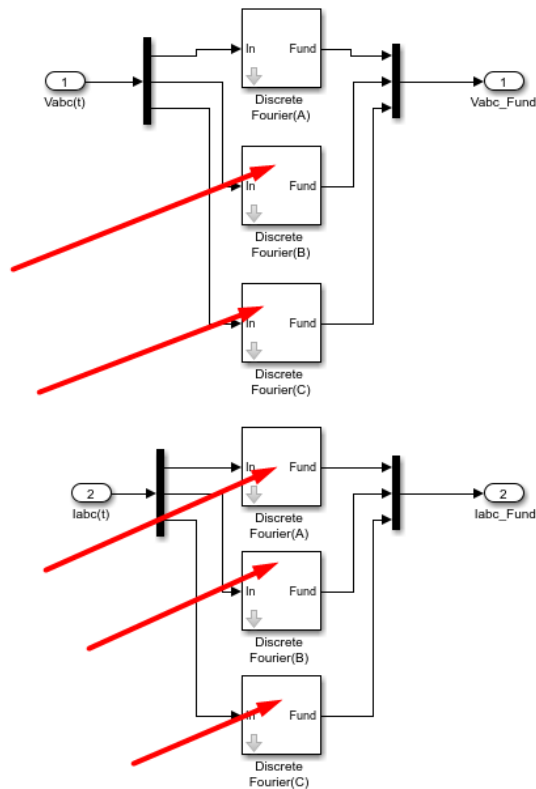
Εικόνα 4.108: Σημείο υπολογισμού των όρων “ a_n ” και “ b_n ” εντός του “Discrete Fourier” block.

Από τη διαδρομή Library Browser / Simulink / Math Operations και επιλογή “Real-Imag to Complex” εισάγουμε ένα block-μετατροπέα που στις δυο εισόδους δέχεται τα a_n και b_n και στην έξοδο βγάξει τον μιγαδικό αριθμό “ $a_n + jb_n$ ”. Με διπλό κλικ πάνω του πρέπει να επιλέξουμε ως “input” το “Real and imag”:



Εικόνα 4.109: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Real-Imag to Complex” block εντός του “Discrete Fourier” block.

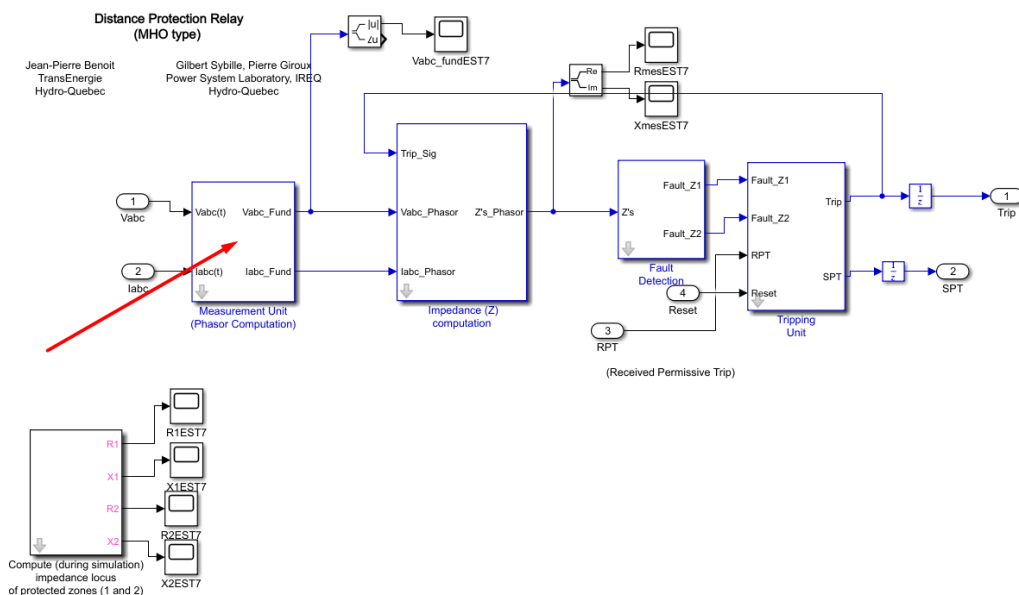
Την παραπάνω διαδικασία την επαναλαμβάνουμε και για τις υπόλοιπες φάσεις της τάσης και του ρεύματος με τα ίδια ακριβώς συστήματα πέντε ακόμα φορές εντός του συστήματος “Measurement Unit (Phasor Computation)”.



Εικόνα 4.110: “Discrete Fourier” blocks για τις φάσεις a, b, c των τάσεων V_{abc} και των ρευμάτων I_{abc} .

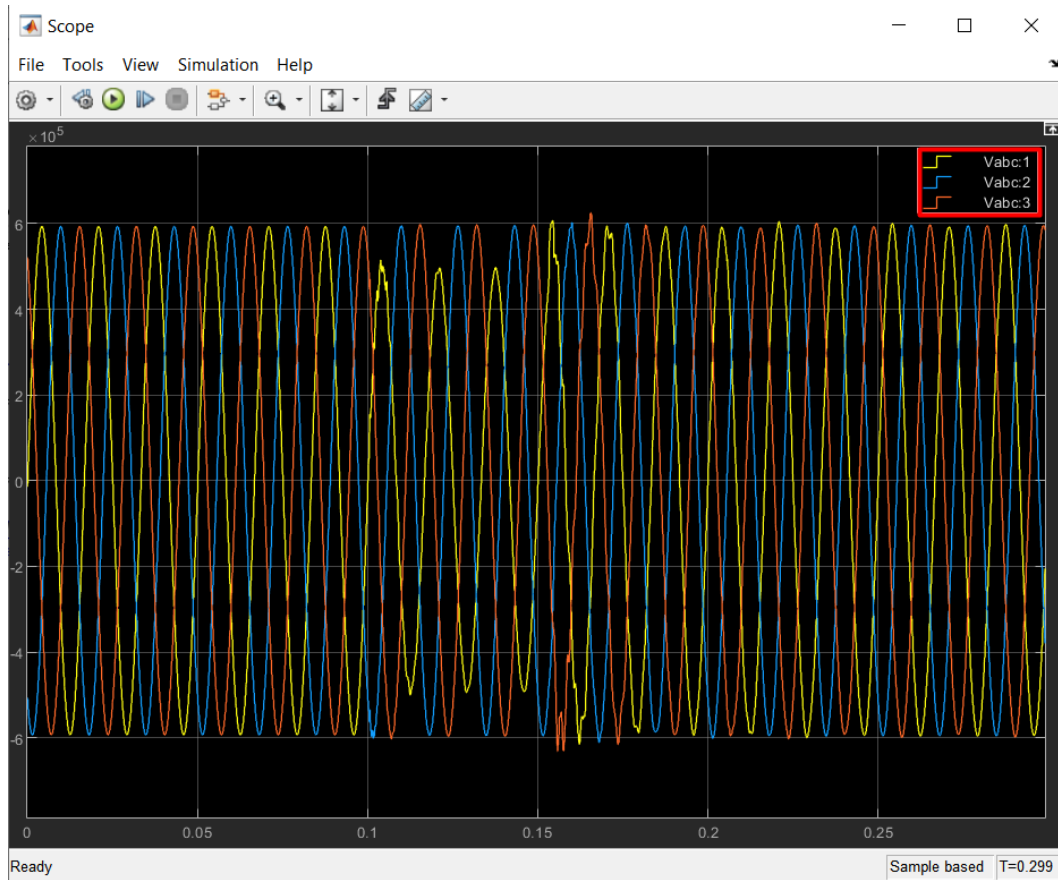
Σύνοψη:

Το σύστημα-block “Measurement Unit (Phasor Computation)” εντός του block “Digital Distance Protection Relay (MHO type)”:

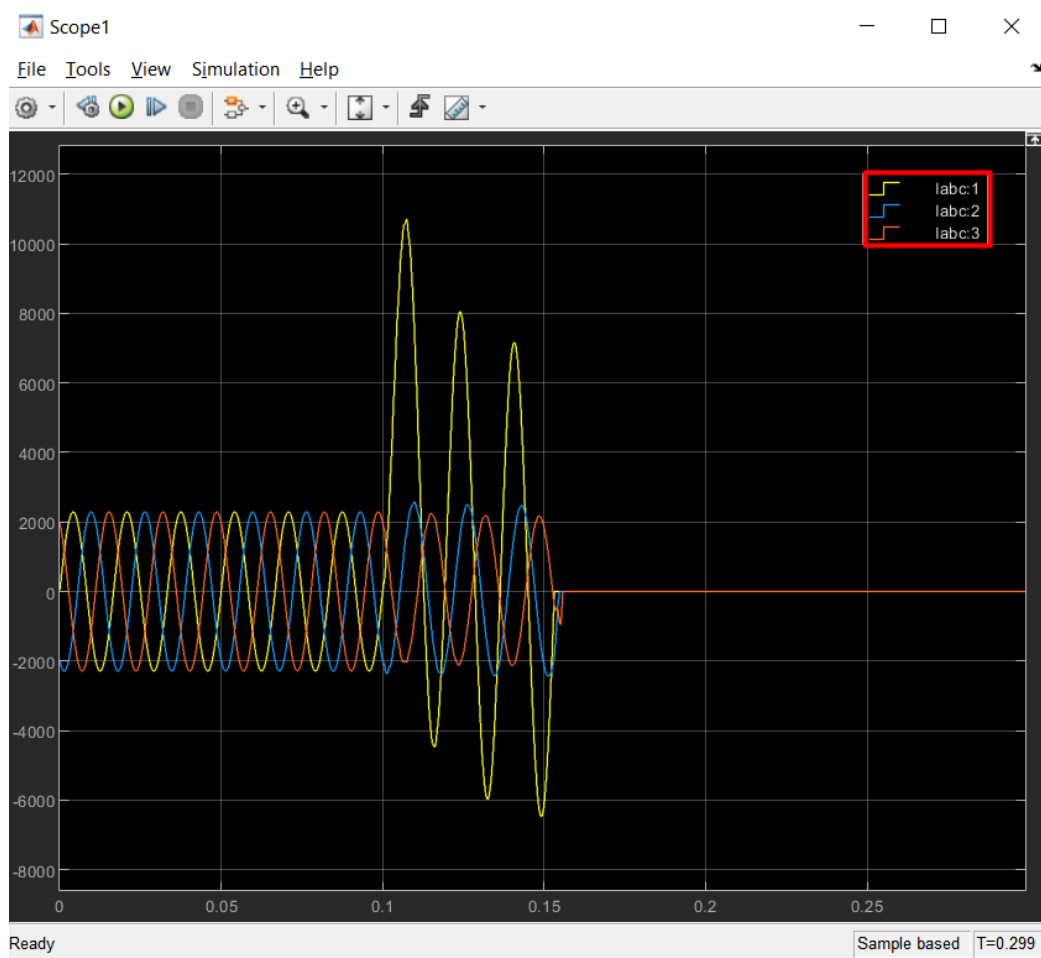


Εικόνα 4.111: “Measurement Unit (Phasor Computation)” block εντός του “Digital Distance Protection Relay (MHO type)” block.

Δέχεται σαν είσοδο τις τριφασικές τάσεις και ρεύματα του ζυγού B1 (ή B2 ομοίως) σε ημιτονοειδή μορφή:

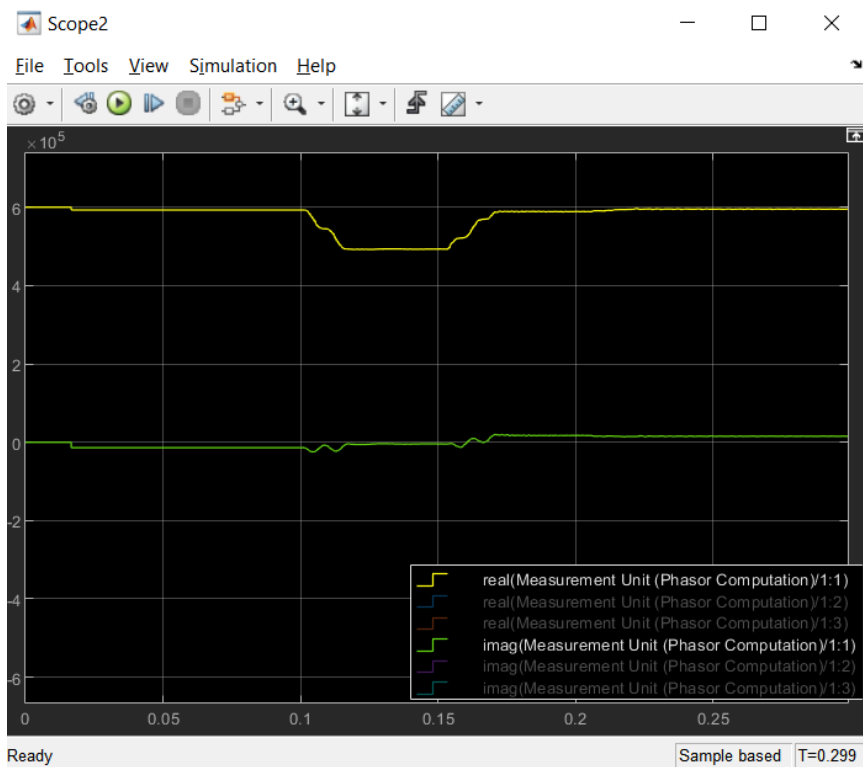


Εικόνα 4.112: Γραφική απεικόνιση των ημιτονοειδών τάσεων V_{abc} των τριών φάσεων a , b και c του ζυγού B1.



Εικόνα 4.113: Γραφική απεικόνιση των ημιτονοειδών ρευμάτων I_{abc} των τριών φάσεων a , b και c του ζυγού $B1$.

Και στην έξοδο του βγάξει τους μιγαδικούς αριθμούς της θεμελιώδους συνιστώσας αυτών των μεγεθών ως στάθμες πραγματικού και φανταστικού μέρους. Για τη φάση a , η τάση και το ρεύμα αντίστοιχα απεικονίζονται:

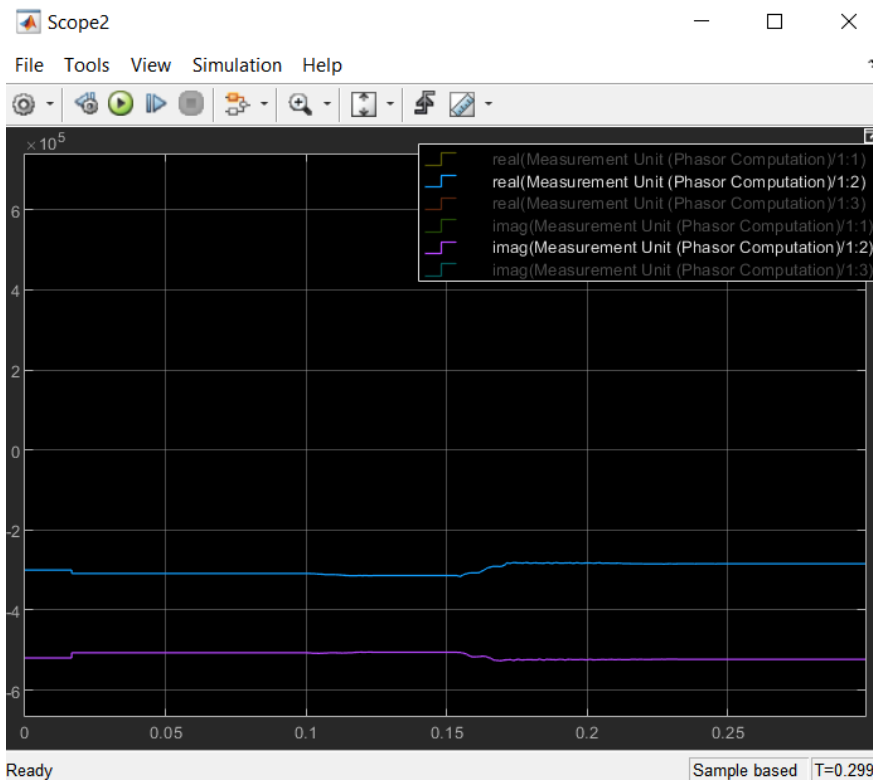


Εικόνα 4.114: Γραφική απεικόνιση του πραγματικού και του φανταστικού μέρους της φάσης a της τάσης V_{abc} .

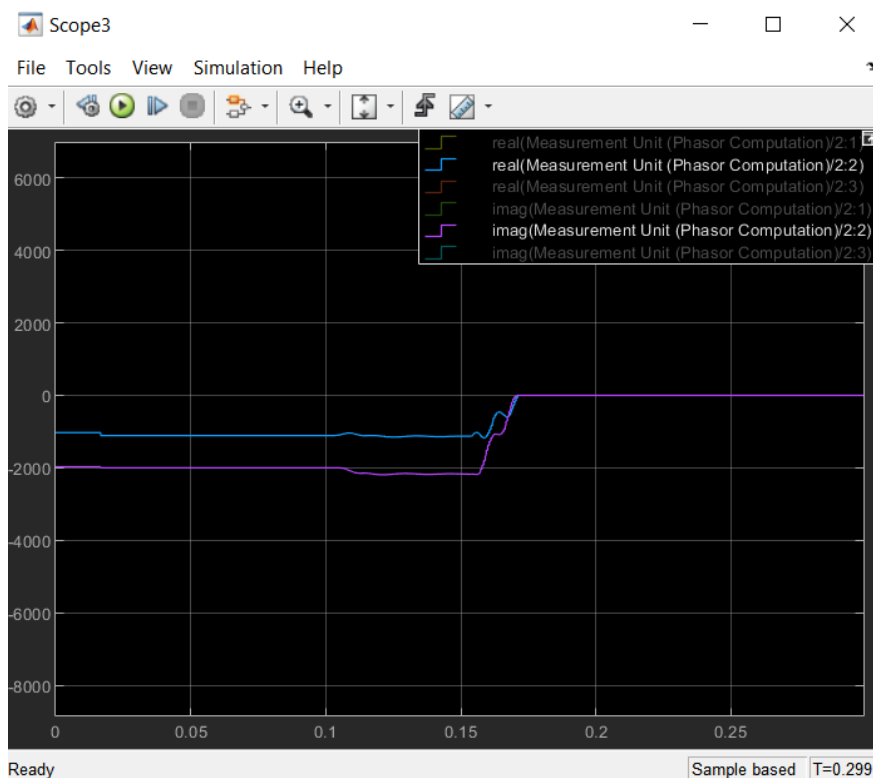


Εικόνα 4.115: Γραφική απεικόνιση του πραγματικού και του φανταστικού μέρους της φάσης a του ρεύματος I_{abc} .

Για τη φάση b , η τάση και το ρεύμα αντίστοιχα απεικονίζονται:

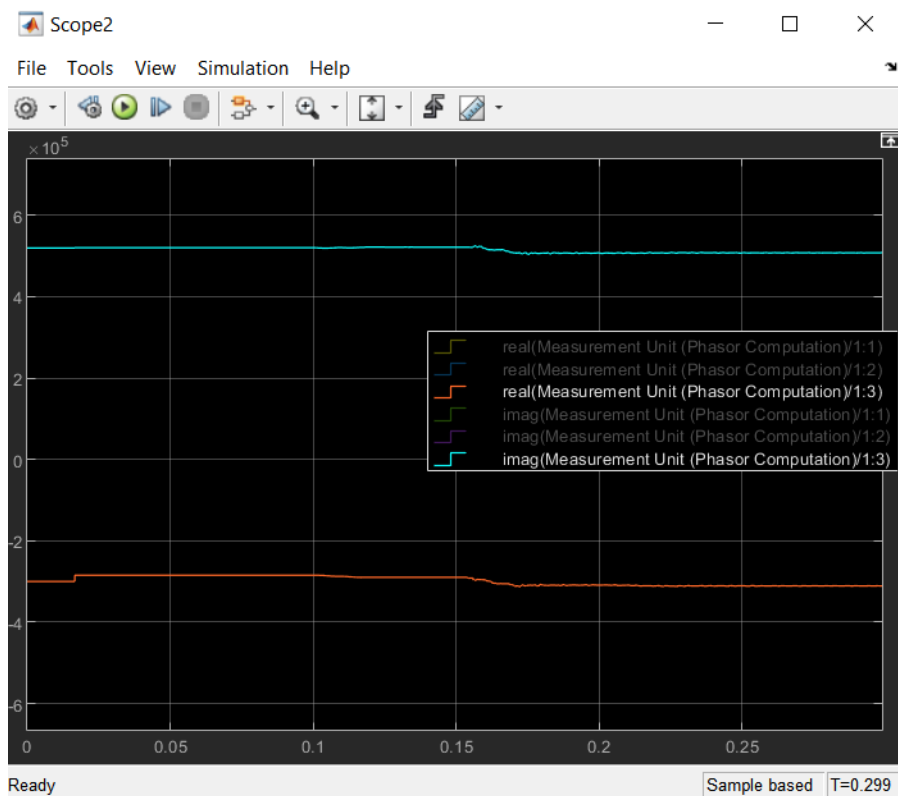


Εικόνα 4.116: Γραφική απεικόνιση του πραγματικού και του φανταστικού μέρους της φάσης b της τάσης V_{abc} .

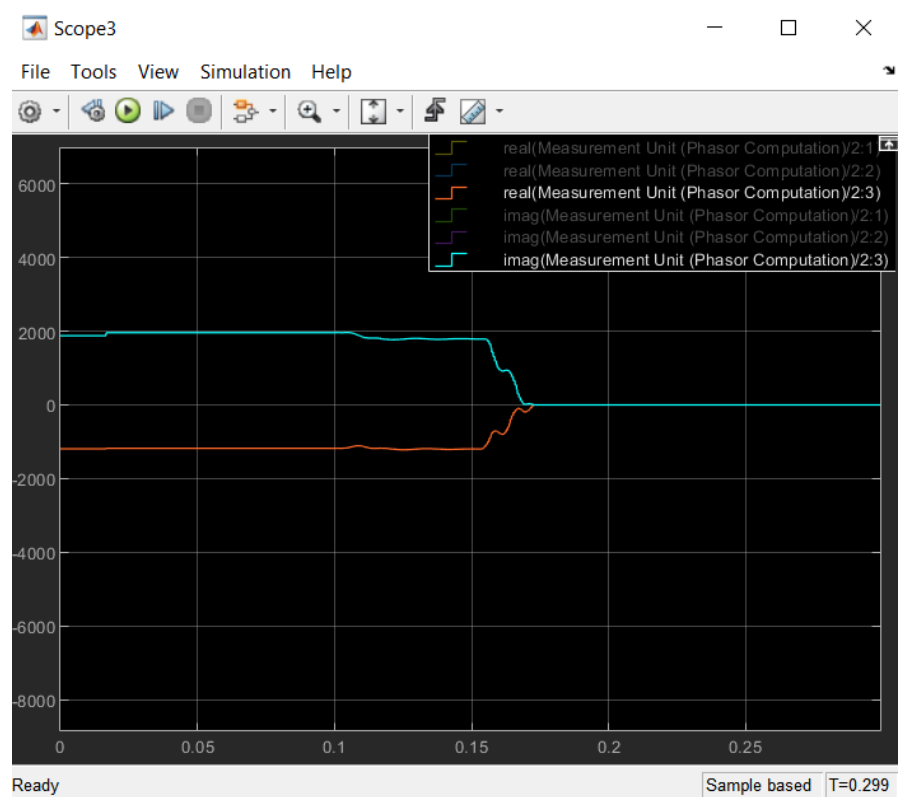


Εικόνα 4.117: Γραφική απεικόνιση του πραγματικού και του φανταστικού μέρους της φάσης b του ρεύματος I_{abc} .

Ενώ για τη φάση c , η τάση και το ρεύμα αντίστοιχα απεικονίζονται:



Εικόνα 4.118: Γραφική απεικόνιση του πραγματικού και του φανταστικού μέρους της φάσης c της τάσης V_{abc} .

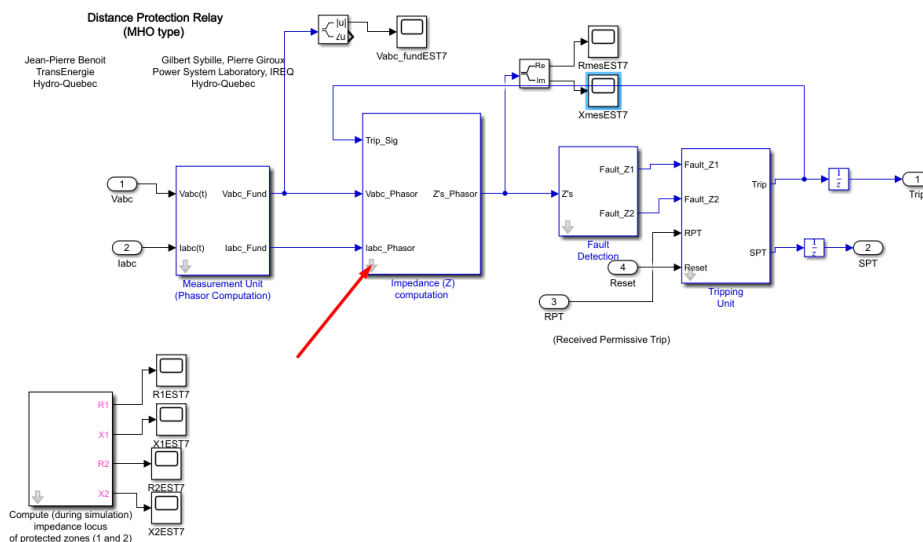


Εικόνα 4.119: Γραφική απεικόνιση του πραγματικού και του φανταστικού μέρους της φάσης c του ρεύματος I_{abc} .

Αυτά τα μεγέθη θα χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι στο επόμενο συνδεδεμένο εν σειρά σύστημα.

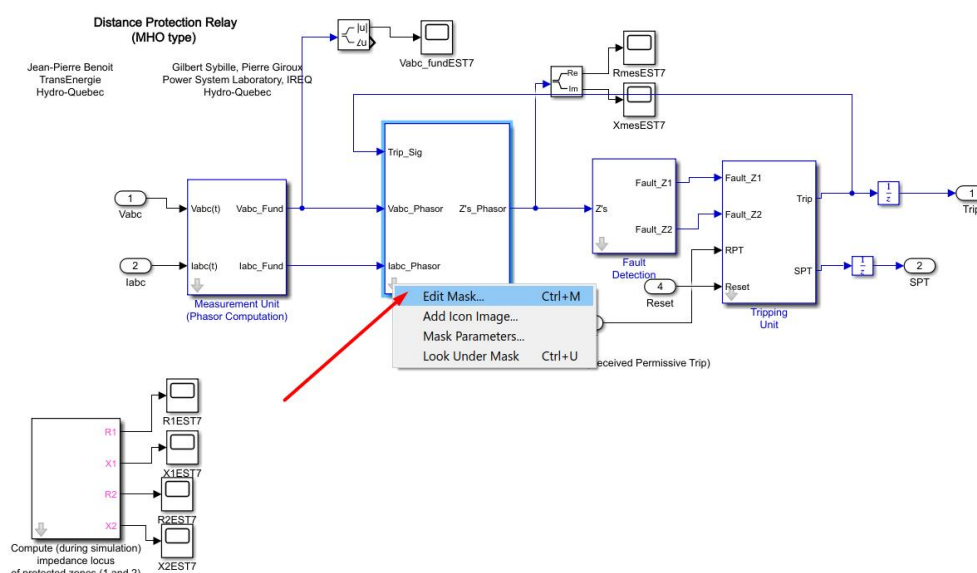
4.8.4 Υπολογισμός της σύνθετης αντίστασης Z που βλέπουν οι ηλεκτρονόμοι από τους ζυγούς $B1$ και $B2$

Θα δημιουργήσουμε ένα σύστημα-block το οποίο θα δέχεται ως είσοδο τις στάθμες πραγματικού και φανταστικού μέρους της τάσης και του ρεύματος και ένα σήμα έναυσης των διακοπτικών στοιχείων (Trip Signal) όταν αυτά πρόκειται να λειτουργήσουν για λόγους που θα εξηγηθούν παρακάτω. Στην έξοδο του θα εξάγεται το πραγματικό και φανταστικό μέρος της σύνθετης που διαβάζει ο ηλεκτρονόμος στο σημείο που βρίσκεται. Με δεξί κλικ στο βέλος “Look inside mask”:



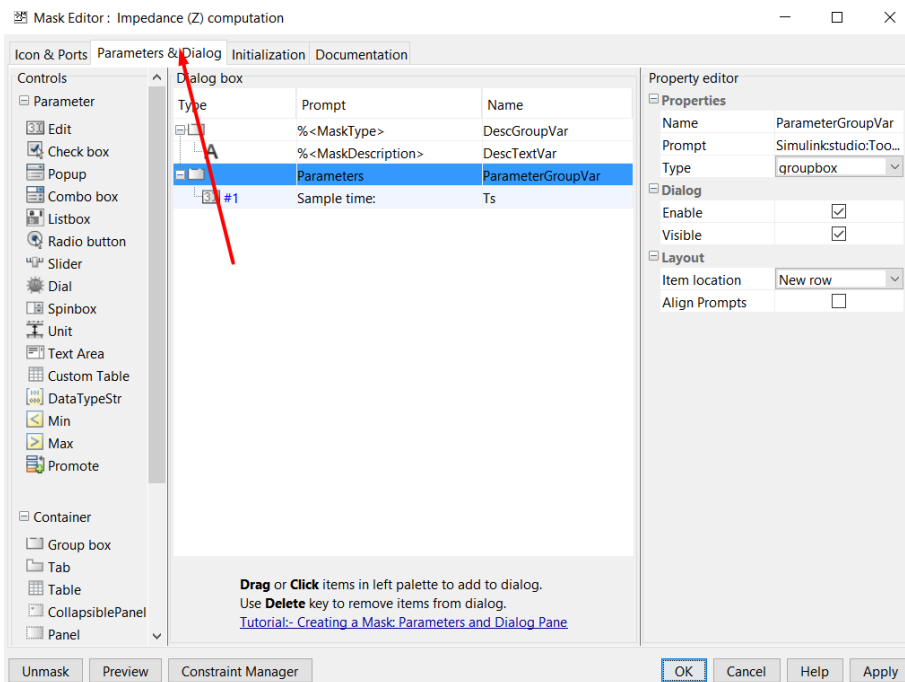
Εικόνα 4.120: “Impedance (Z) computation” block.

Και επιλογή “Edit Mask”:



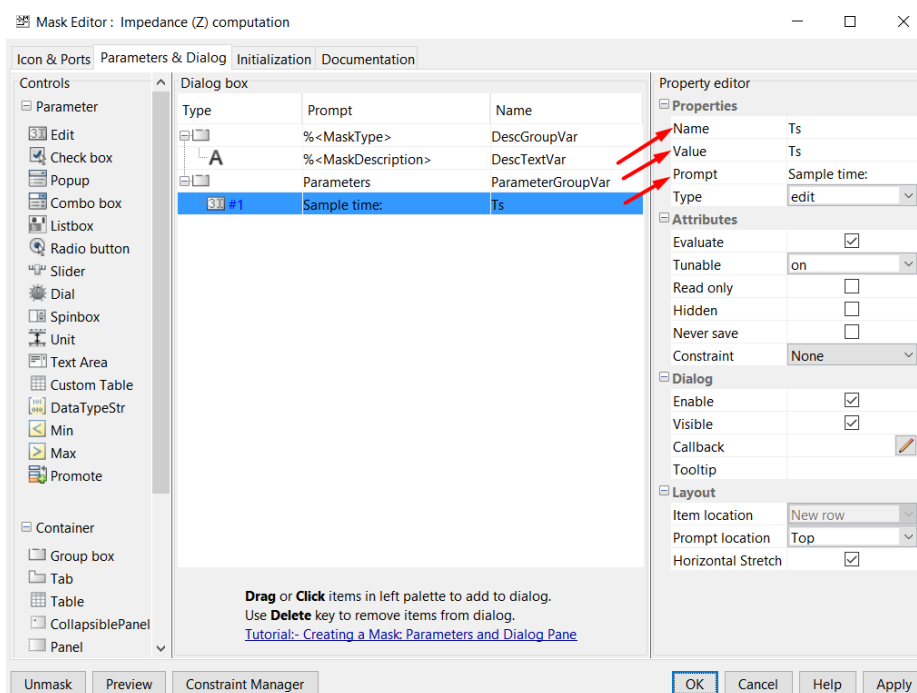
Εικόνα 4.121: Επεξεργασία του “Impedance (Z) computation” block τύπου Mask.

Οδηγούμαστε στον “Mask Editor”. Επιλέγοντας την καρτέλα “Parameters & Dialog”:



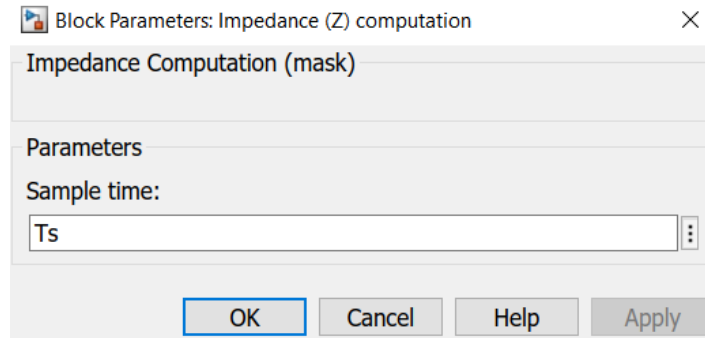
Εικόνα 4.122: Καρτέλα Parameters & Dialog του “Impedance (Z) computation” block τύπου Mask.

Ορίζουμε την μεταβλητή “Sample time” με όνομα, τιμή και περιγραφή.



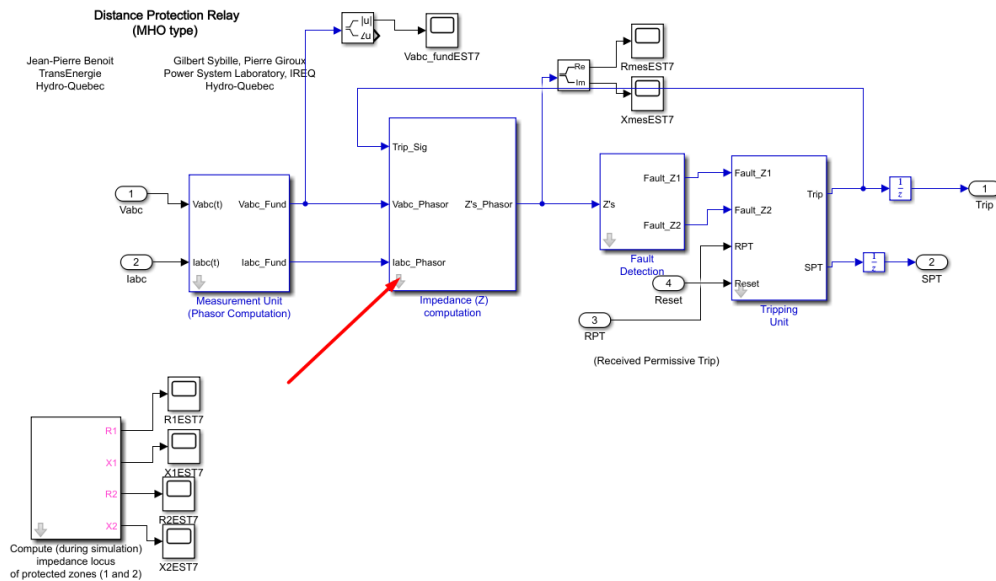
Εικόνα 4.123: Όνομα, τιμή και περιγραφή των παραμέτρων της καρτέλας Parameters & Dialog του “Impedance (Z) computation” block τύπου Mask.

Ο χρήστης με διπλό κλικ πάνω στο μπλοκ εισάγει τον χρόνο δειγματοληψίας που επιθυμεί στο εξής πεδίο:



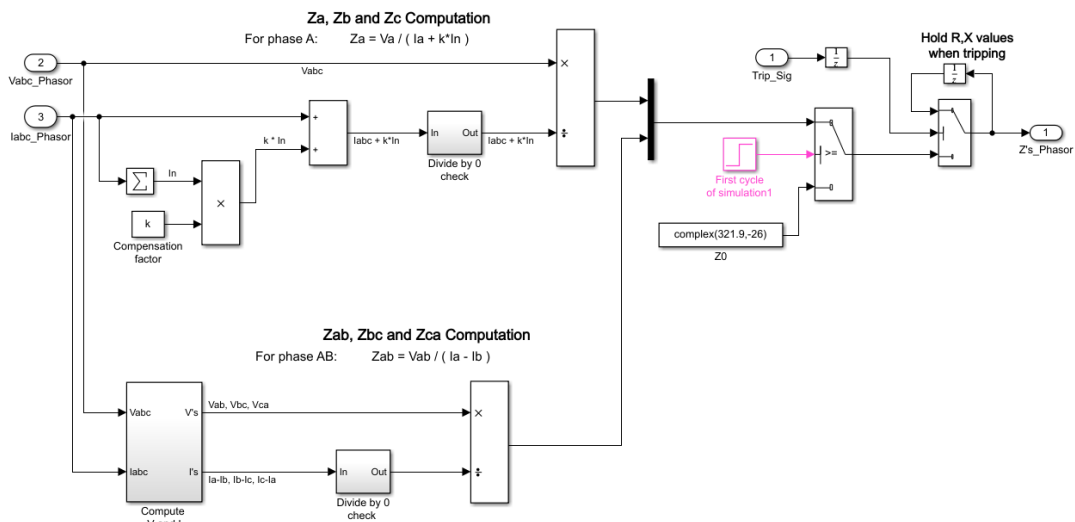
Εικόνα 4.124: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Impedance (Z) computation” block.

Ενώ με επιλογή στο βέλος “Look inside mask” εισέρχεται στο εσωτερικό υποσύστημα.



Εικόνα 4.125: Πεδίο “Look inside mask” του “Impedance (Z) computation” block.

Το εσωτερικό υποσύστημα του block “Impedance (Z) computation “ πρέπει να έχει την παρακάτω μορφή:



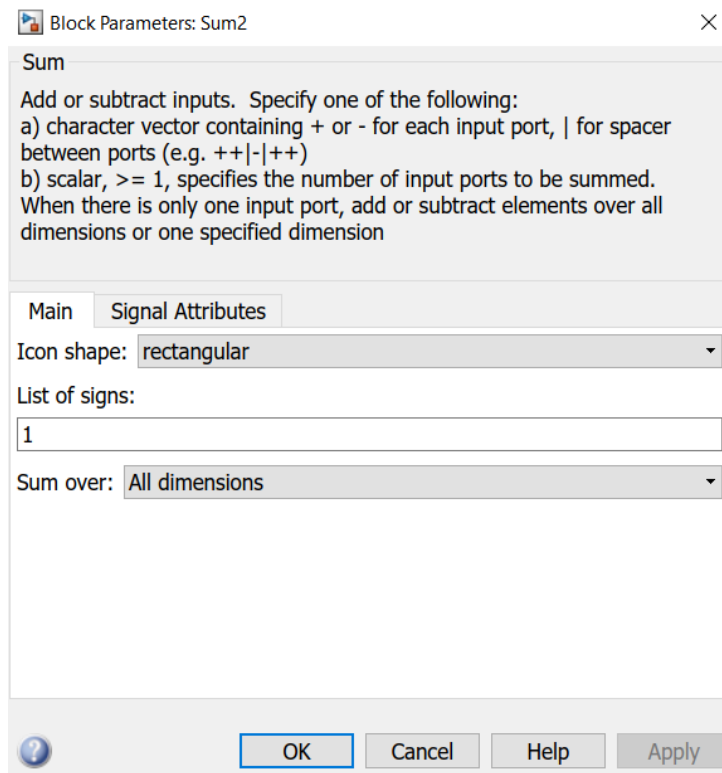
Εικόνα 4.126: Εσωτερικό υποσύστημα του “Impedance (Z) computation” block.

Τρόπος Λειτουργίας Υποσυστήματος:

Οι φασιθέτες των τάσεων και των ρευμάτων του προηγούμενου σταδίου αξιοποιούνται για τον υπολογισμό των όρων Z_a , Z_b , Z_c , Z_{ab} , Z_{bc} και Z_{ca} σύμφωνα με τις εξισώσεις:

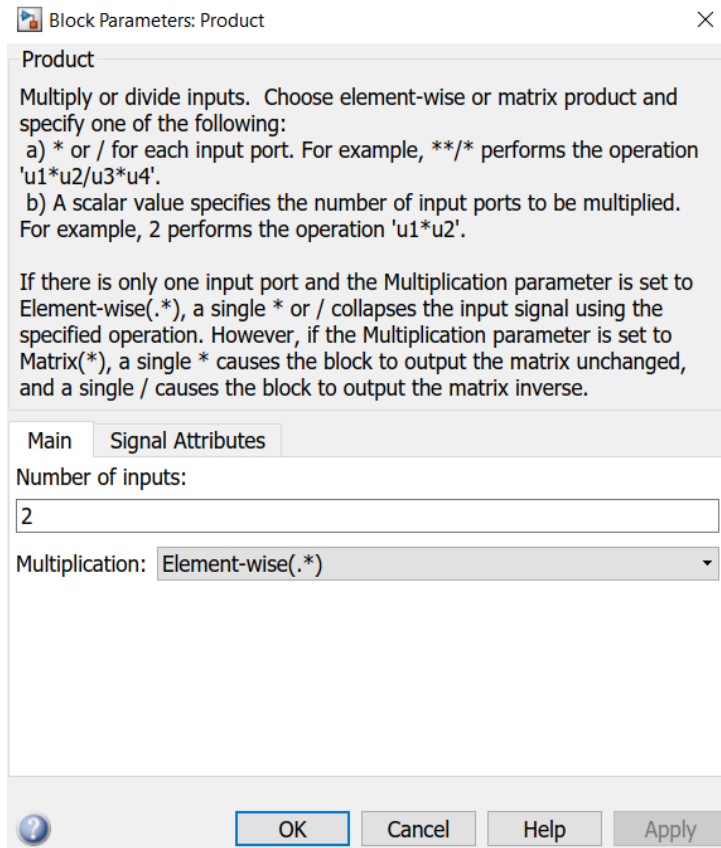
$$\begin{aligned}Z_a &= \frac{V_a}{I_a + kI_n} \\Z_b &= \frac{V_b}{I_b + kI_n} \\Z_c &= \frac{V_c}{I_c + kI_n} \\Z_{ab} &= \frac{V_{ab}}{I_a - I_b} \\Z_{bc} &= \frac{V_{bc}}{I_b - I_c} \\Z_{ca} &= \frac{V_{ca}}{I_c - I_a}\end{aligned}$$

Ο συντελεστής k του όρου kI_n καλείται “compensation factor” και υπολογίζεται από την σχέση $k = \frac{Z_{0Line} - Z_{1Line}}{3Z_{1Line}}$, ενώ το ρεύμα I_n είναι το ρεύμα του ουδετέρου και ισούται με $I_n = I_a + I_b + I_c$. Οι όροι Z_{1Line} και Z_{0Line} είναι οι σύνθετες αντιστάσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας αντίστοιχα της γραμμής μεταφοράς. Τις έξι αυτές σύνθετες αντιστάσεις (στάθμες πραγματικού και φανταστικού μέρους) θέλουμε να τις αποθηκεύσουμε την χρονική στιγμή που ανοίγουν οι διακόπτες και να μην συνεχίζει το πρόγραμμα να τις υπολογίζει μέχρι να τελειώσει ο χρόνος εκτέλεσης της προσομοίωσης. Αρχικά από τη διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Inport” εισάγουμε δυο θύρες εισόδου που επικοινωνούν με τα υπόλοιπα συστήματα του Simulink με όνομα “ V_{abc_Phasor} ” και “ I_{abc_Phasor} ”. Τη θύρα “ I_{abc_Phasor} ” θα την εισάγουμε σε ένα “Sum” block από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Math Operations και επιλογή “Add, Subtract, Sum of Elements, Sum”. Έπειτα με διπλό κλικ πάνω στο “Sum” block θα εισάγουμε στο πεδίο “List of signs” το “1” ώστε να δημιουργηθεί ένας αθροιστής των εσωτερικών στοιχείων της θύρας.



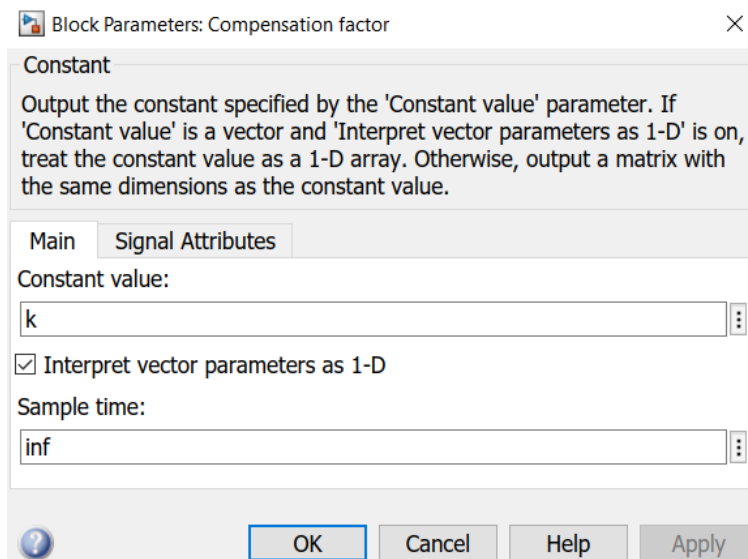
Εικόνα 4.127: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Sum” block εντός του “ Impedance (Z) computation ” block.

Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούμε τον όρο “In” αφού αθροίζουμε τα I_a , I_b και I_c του “ I_{abc_Phasor} ”. Έπειτα σε ένα “Product” block θα εισάγουμε τον όρο “In” και μια σταθερά k , τον λεγόμενο “Compensation factor”. Το “Product” block εισάγεται από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Product”. Με διπλό κλικ πάνω του, ορίζουμε δύο εισόδους στο πεδίο “Number of inputs”.



Εικόνα 4.128: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Product” block εντός του “ Impedance (Z) computation ” block.

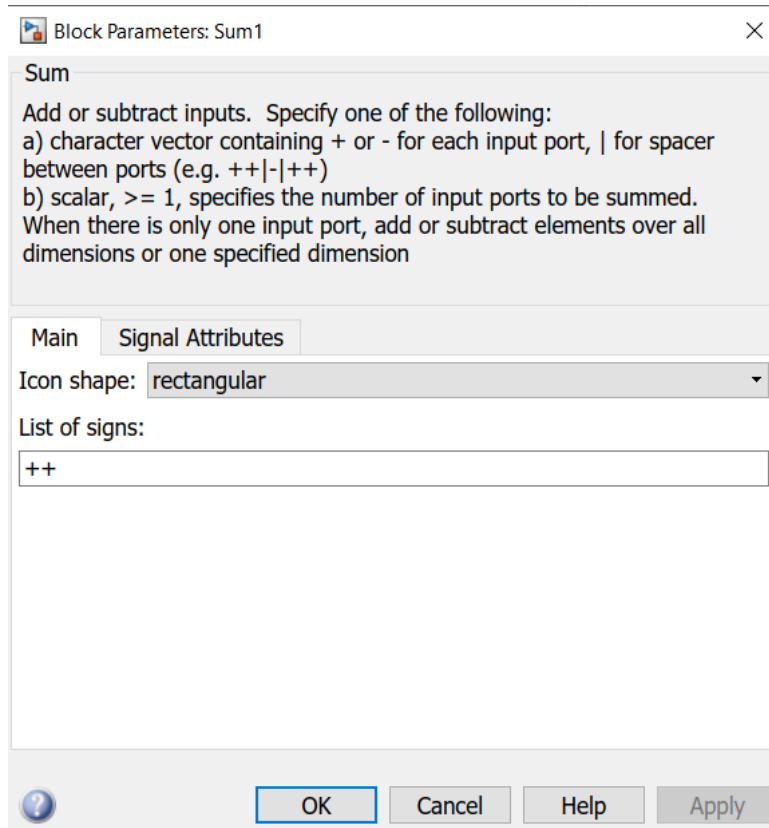
Την σταθερά k την εισάγουμε από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Constant”. Με διπλό κλικ ορίζουμε “Constant value” k , μεταβλητή που είναι δηλωμένη στο Matlab.



Εικόνα 4.129: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Constant” block εντός του “ Impedance (Z) computation ” block.

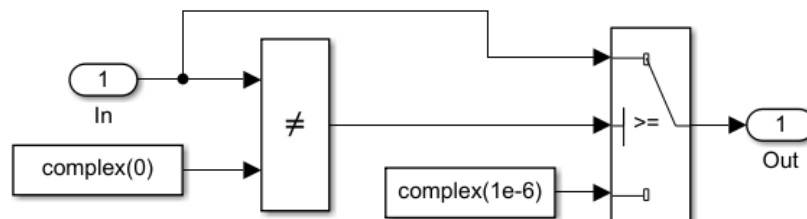
Την έξοδο του “Product” block και τη θύρα “ I_{abc_Phasor} ” θα τις εισάγουμε σε ένα “Sum” block δυο εισόδων ώστε στην έξοδο να προκύψει ο όρος $I_{abc} + kI_n$. Το “Sum” block το εισάγουμε από την

διαδρομή Library Browser / Simulink / Math Operations και επιλογή “Add, Subtract, Sum of Elements, Sum”. Έπειτα με διπλό κλικ πάνω στο “Sum” block θα εισάγουμε στο πεδίο “List of signs” το “++” ώστε να δημιουργηθεί ένας αθροιστής δυο στοιχείων.



Εικόνα 4.130: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του δεύτερου “Sum” block εντός του “Impedance (Z) computation” block.

Ο όρος “ $I_{abc} + kI_n$ ” που σχηματίσαμε βρίσκεται στον παρονομαστή της σύνθετης αντιστάσεως που θέλουμε να υπολογίσουμε ($Z_{abc} = \frac{V_{abc}}{I_{abc} + kI_n}$) επομένως θα προκύψει απροσδιοριστία αν είναι μηδενικός. Πρέπει να δημιουργηθεί ένα κύκλωμα ελέγχου που να εξασφαλίζει τον μη μηδενισμό του. Δημιουργούμε λοιπόν ένα σύστημα που το ονομάζουμε “Divide by 0 check” και εσωτερικά του με διπλό κλικ περιλαμβάνει τα παρακάτω:



Εικόνα 4.131: Εσωτερικό υποσύστημα του “Divide by 0 check” block.

Τρόπος Λειτουργίας:

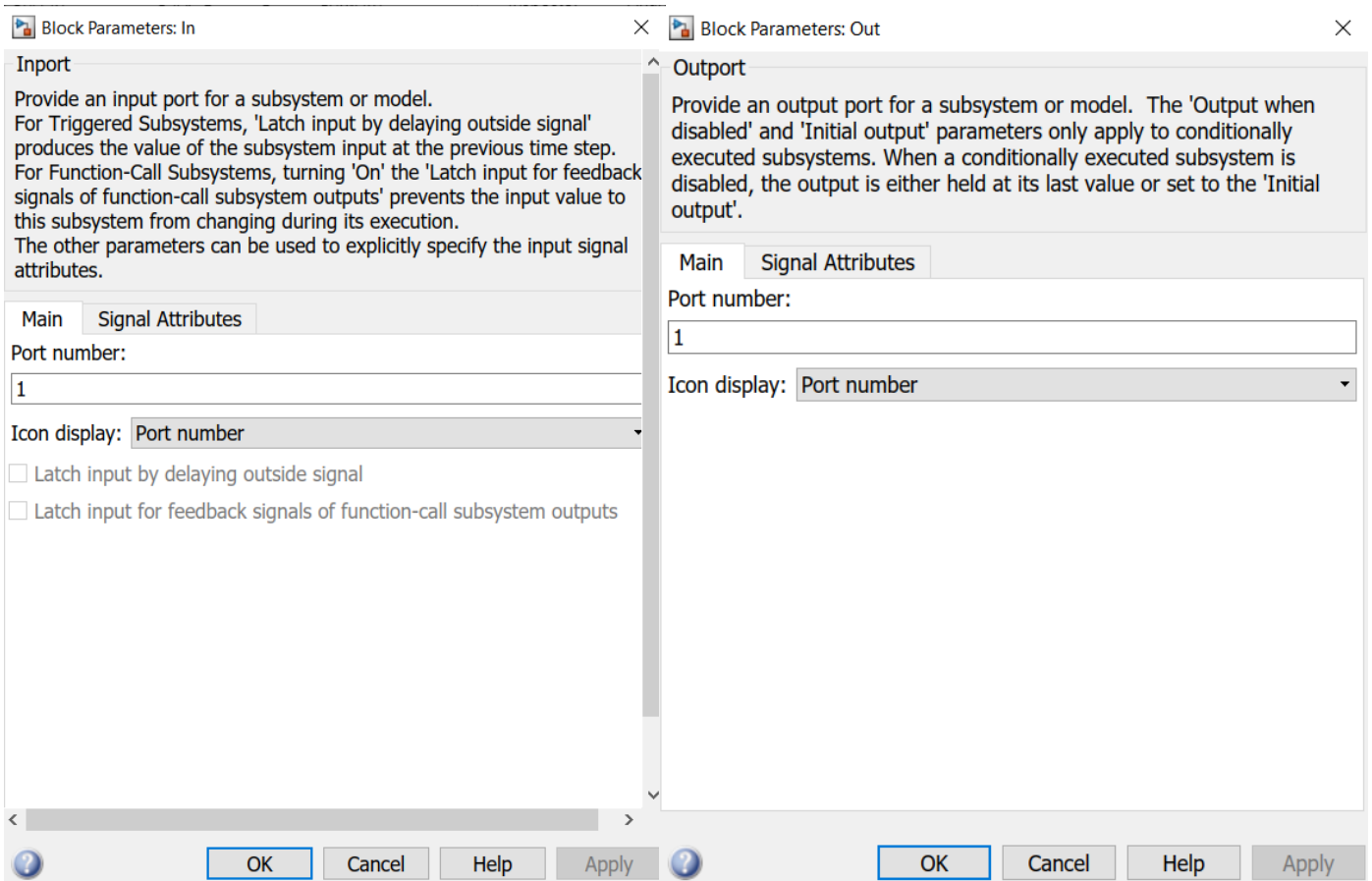
Σε έναν συγκριτή, που εξάγει μοναδιαίο παλμό αν τα σήματα εισόδου του είναι διαφορετικά μεταξύ τους, εισάγουμε την είσοδο ($I_{abc} + kI_n$) και τον όρο $\text{complex}(0)$. Ο όρος $\text{complex}(a)$ είναι συνάρτηση στο Matlab που ισούται με τον μιγαδικό αριθμό $a+j0$, άρα ο $\text{complex}(0)$ ισούται με 0. Σε σειρά με τον συγκριτή τοποθετούμε ένα “Switch” block το οποίο έχει ρυθμισμένο Threshold στην

τιμή 0.5. Αν στη μεσαία θύρα του “Switch” block έρχεται μονάδα, δηλαδή αριθμός μεγαλύτερος από την τιμή του Threshold του τότε στην έξοδο περνάει η πάνω θύρα. Αν στη μεσαία θύρα έρχεται μηδενικό, δηλαδή αριθμός μικρότερος από την τιμή του Threshold του τότε στην έξοδο περνάει η κάτω θύρα.

Συνοψίζοντας:

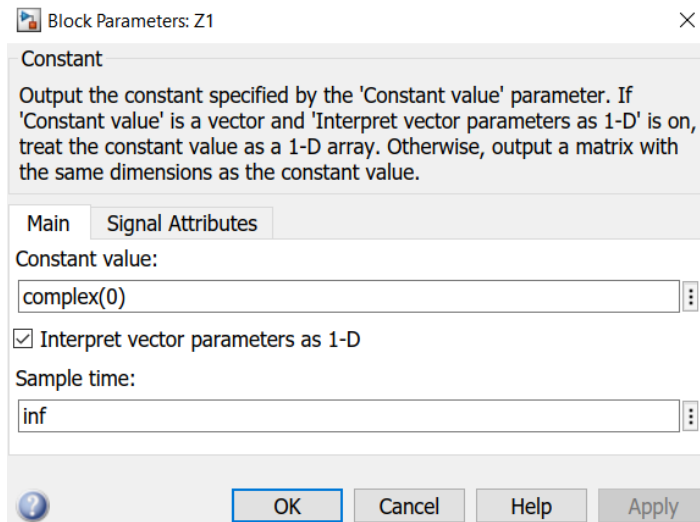
1. Αν η είσοδος ($I_{abc} + kI_n$) είναι διάφορη του μηδενός, τότε εξάγεται μονάδα από τον συγκριτή, τιμή μεγαλύτερη από το Threshold του Switch block (0.5), και περνάει στην έξοδο του Switch block η αρχική είσοδος (πάνω θύρα).
2. Αν η είσοδος ($I_{abc} + kI_n$) είναι ίση με μηδέν, τότε εξάγεται μηδενικό από τον συγκριτή, τιμή μικρότερη από το Threshold του Switch block (0.5), και περνάει στην έξοδο του Switch block η συνάρτηση $\text{complex}(1e-6)$, δηλαδή το 10^{-6} , ένας πολύ μικρός αριθμός διάφορος του μηδενός ώστε να μπορεί να μπει στον παρονομαστή (κάτω θύρα).

Η είσοδος και η έξοδος εισάγεται ως “Inport” και “Outport” block από τη διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Inport” και “Outport” αντίστοιχα. Με διπλό κλικ πάνω τους ορίζουμε τον αριθμό του port που τους αντιστοιχεί.



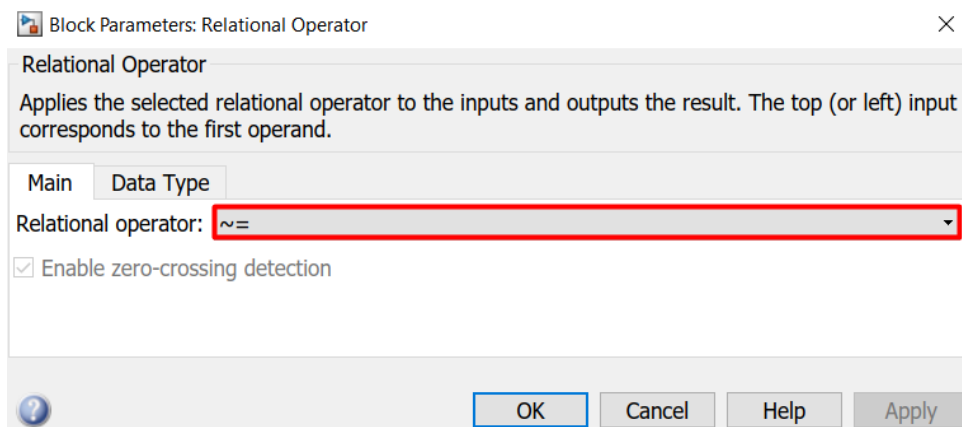
Εικόνα 4.132: Παράθυρα ορισμού παραμέτρων των “Inport” και “Outport” blocks εντός του “Divide by 0 check” block.

Ο αριθμός 0 που τίθεται ως είσοδος στον συγκριτή εισάγεται από τη διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Constant”. Με διπλό κλικ εισάγουμε στο πεδίο “Constant value” την μεταβλητή $\text{complex}(0)$.



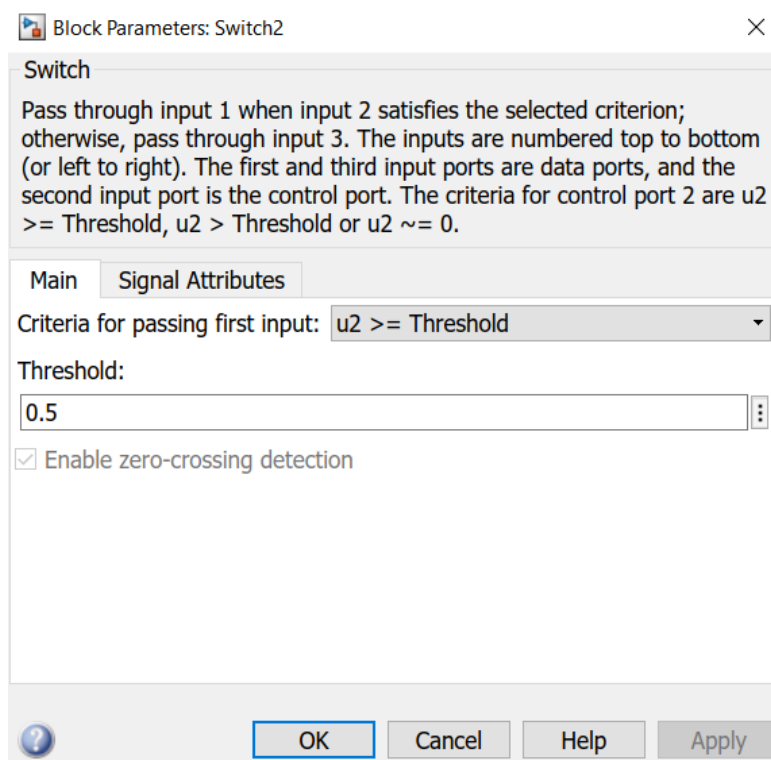
Εικόνα 4.133: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Constant” block εντός του “Divide by 0 check” block.

Ο συγκριτής εισάγεται από τη διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Relational Operator”. Με διπλό κλικ πάνω του επιλέγουμε “Relational Operator” τον παρακάτω.



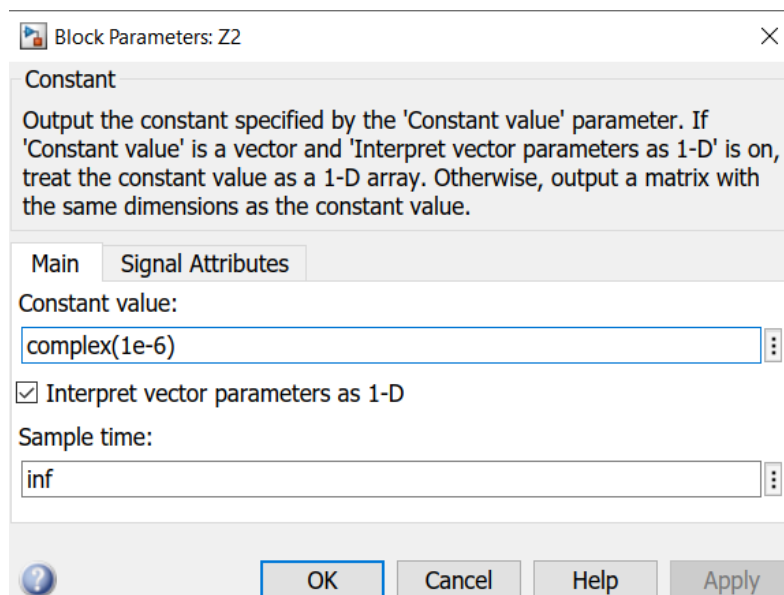
Εικόνα 4.134: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Relational Operator” block εντός του “Divide by 0 check” block.

Το Switch “block” εισάγεται από τη διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Switch”. Με διπλό κλικ πάνω του ορίζουμε “Threshold” 0.5.



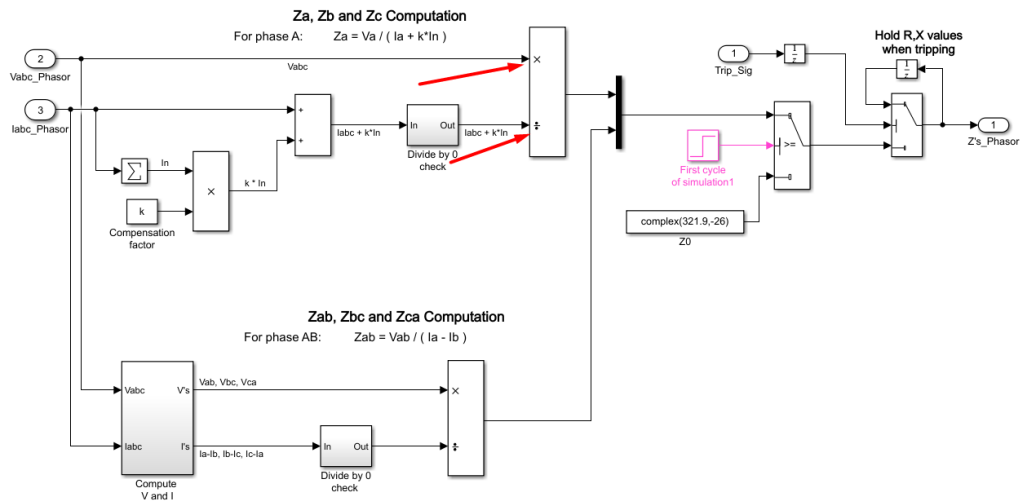
Εικόνα 4.135: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Switch” block εντός του “Divide by 0 check” block.

Ο αριθμός 10^{-6} που τίθεται ως είσοδο στο “Switch” block εισάγεται από τη διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Constant”. Με διπλό κλικ εισάγουμε στο πεδίο “Constant value” την μεταβλητή `complex(1e-6)`.



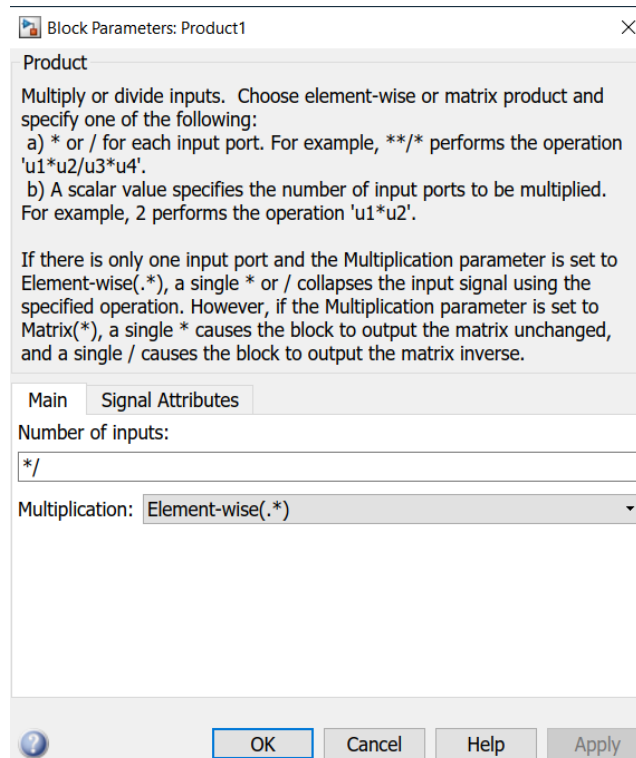
Εικόνα 4.136: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του δεύτερου “Constant” block εντός του “Divide by 0 check” block.

Το σύστημα λοιπόν εξάγει τον όρο “ $I_{abc} + kI_n$ ” όταν είναι διάφορος του μηδενός. Ο όρος αυτός και το “Inport” block “ V_{abc_Phasor} ” θα εισαχθούν σε ένα “Product” block δυο εισόδων με την εξής συνδεσμολογία:



Εικόνα 4.137: Εισαγωγή όρων “ $I_{abc} + kI_n$ ” και “ V_{abc_Phasor} ” σε “Product” block.

Αφού εισαχθεί το “Product” block (Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Product”) με διπλό κλικ πάνω του, στο πεδίο “Number of inputs”, εισάγουμε την συμβολοσειρά “*/”.



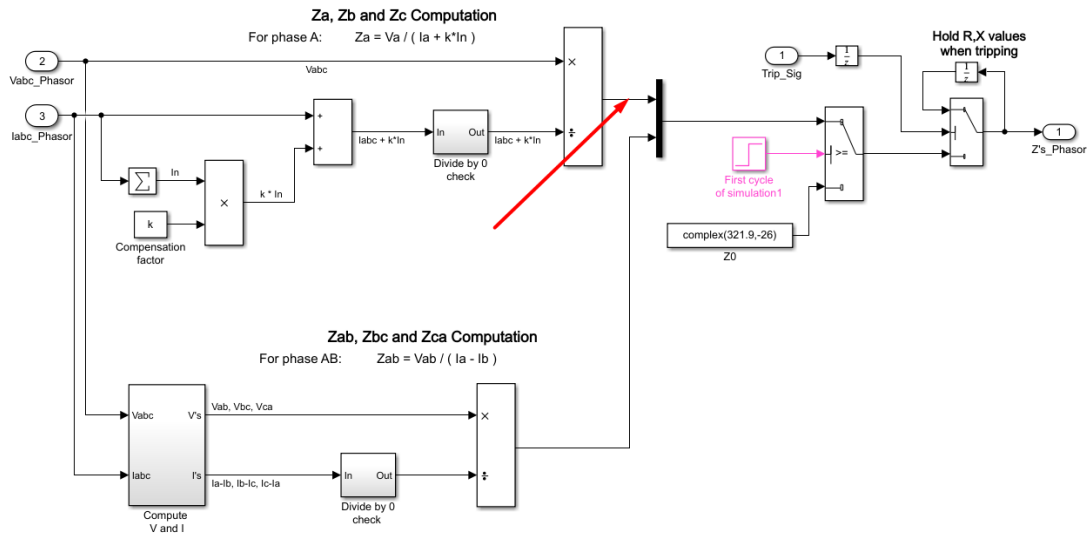
Εικόνα 4.138: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του δεύτερου “Product” block εντός του “Impedance (Z) computation” block.

Με αυτόν τον τρόπο εξάγουμε τα κλάσματα των σύνθετων αντιστάσεων:

$$Z_a = \frac{V_a}{I_a + kI_n}$$

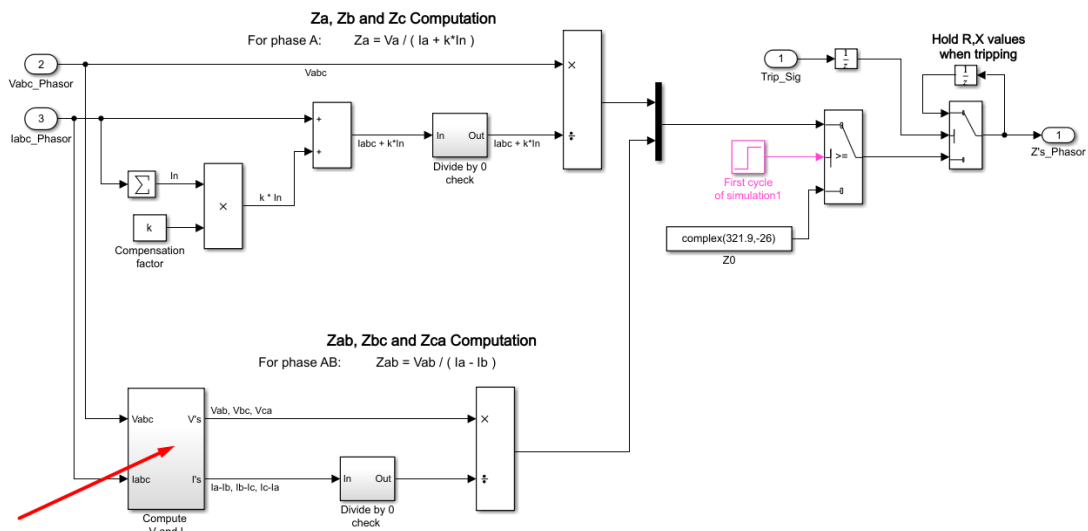
$$Z_b = \frac{V_b}{I_b + kI_n}$$

$$Z_c = \frac{V_c}{I_c + kI_n}$$



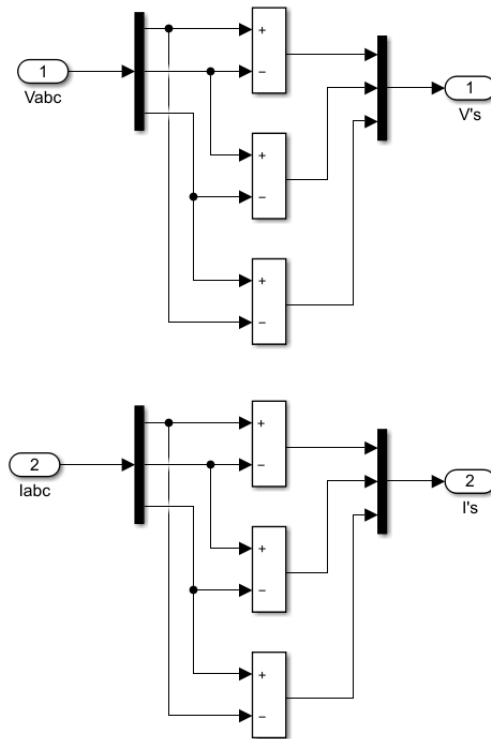
Εικόνα 4.139: Σημείο εξόδου του “Product” block που περιέχει τις σύνθετες αντιστάσεις “ Z_a ”, “ Z_b ” και “ Z_c ”.

Ταυτόχρονα, τα “Inport blocks” “ V_{abc_Phasor} ” “ I_{abc_Phasor} ” τα εισάγουμε και σε ένα άλλο σύστημα, ονομαζόμενο “Compute V and I”.



Εικόνα 4.140: “Compute V and I” block.

Με διπλό κλικ πάνω του εμφανίζεται η εσωτερική του δομή:



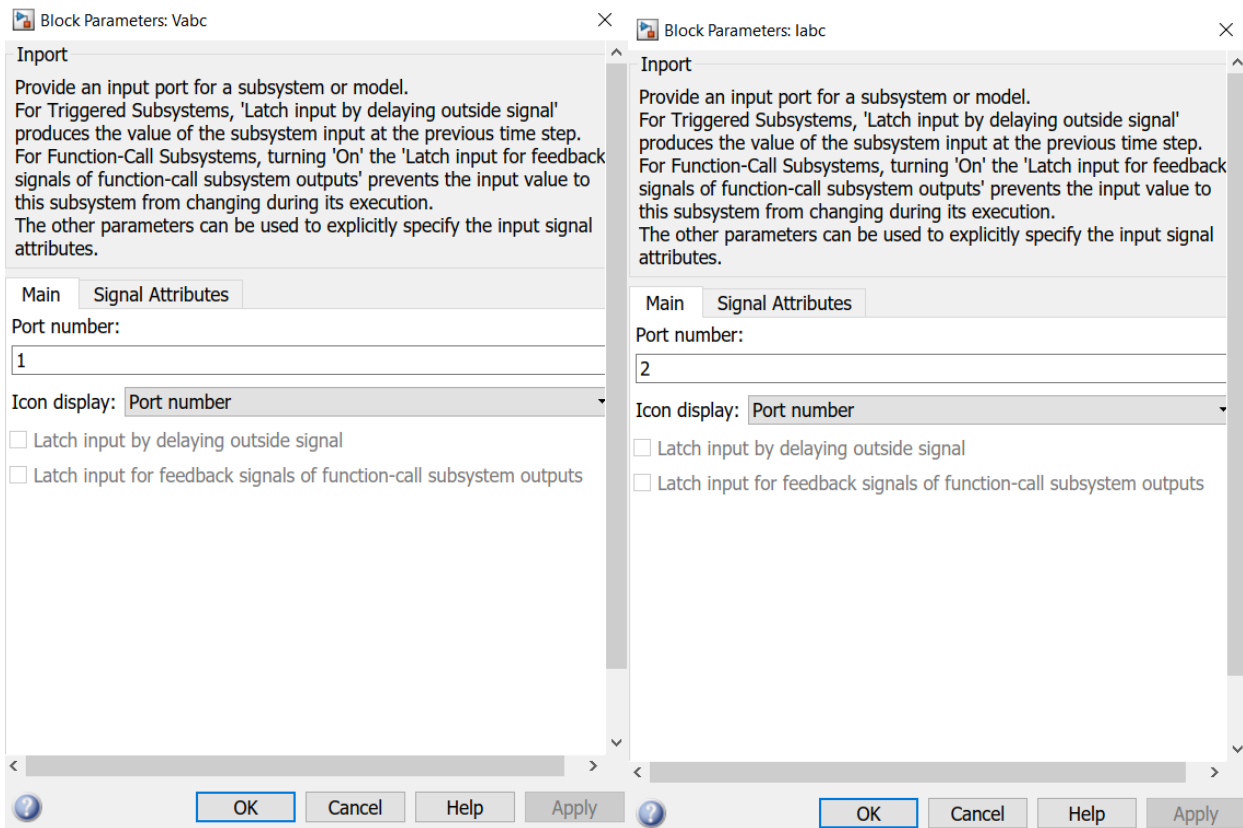
Εικόνα 4.141: Εσωτερικό υποσύστημα του “ Compute V and I” block τύπου mask.

Τρόπος Λειτουργίας:

Στο εν λόγω σύστημα θέλουμε να δημιουργήσουμε πολικές τάσεις και ρεύματα, δηλαδή τους όρους:

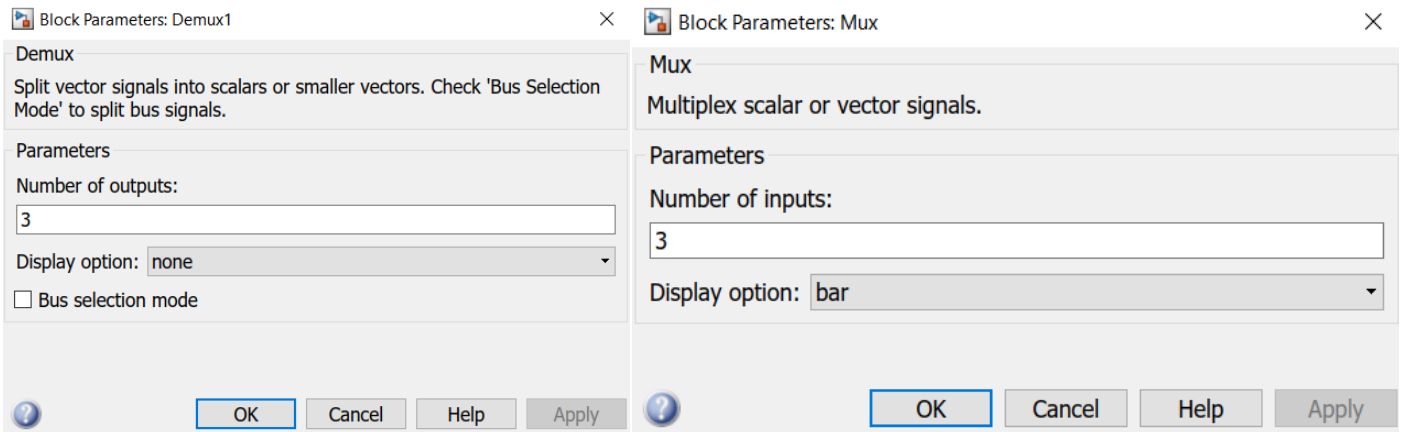
$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_a - V_b \\ V_{bc} &= V_b - V_c \\ V_{ca} &= V_c - V_a \\ I_{ab} &= I_a - I_b \\ I_{bc} &= I_b - I_c \\ I_{ca} &= I_c - I_a \end{aligned}$$

Οι θύρες εισόδου “Vabc” και “Iabc” εισέρχονται σε αποπλέκτες 1 σε 3 “Demux”. Με αυτόν τον τρόπο εξάγονται ξεχωριστά οι τάσεις V_a, V_b, V_c και τα ρεύματα I_a, I_b, I_c . Εισάγουμε έπειτα αυτές τις κυματομορφές σε έξι αθροιστές δυο εισόδων που αθροίζουν την πάνω είσοδο και αφαιρούν την κάτω είσοδο. Συνεπώς στην έξοδο τους, προκύπτει η αλγεβρική διαφορά των δυο εισόδων. Για παράδειγμα, στον πρώτο αθροιστή εισέρχεται η τάση V_a και η τάση V_b και εξάγεται η πολική τάση $V_{ab} = V_a - V_b$, ενώ στον τελευταίο αθροιστή εισέρχεται το ρεύμα I_c και το ρεύμα I_a και εξάγεται το πολικό ρεύμα $I_{ca} = I_c - I_a$. Οι έξι έξοδοι τάσεων και ρευμάτων που προκύπτουν θα εισαχθούν σε δυο πολυπλέκτες “Mux” ώστε οι τρεις πολικές τάσεις να περιέχονται στη μεταβλητή “V’s” ενώ τα τρία πολικά ρεύματα να περιέχονται στη μεταβλητή “I’s”. Οι είσοδοι “Vabc”, “Iabc” και οι έξοδοι “V’s”, “I’s” εισάγονται ως “Inport” και “Outport” blocks από τη διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Inport” και “Outport” αντίστοιχα. Με διπλό κλικ πάνω τους ορίζουμε τον αριθμό του port που τους αρμόζει.



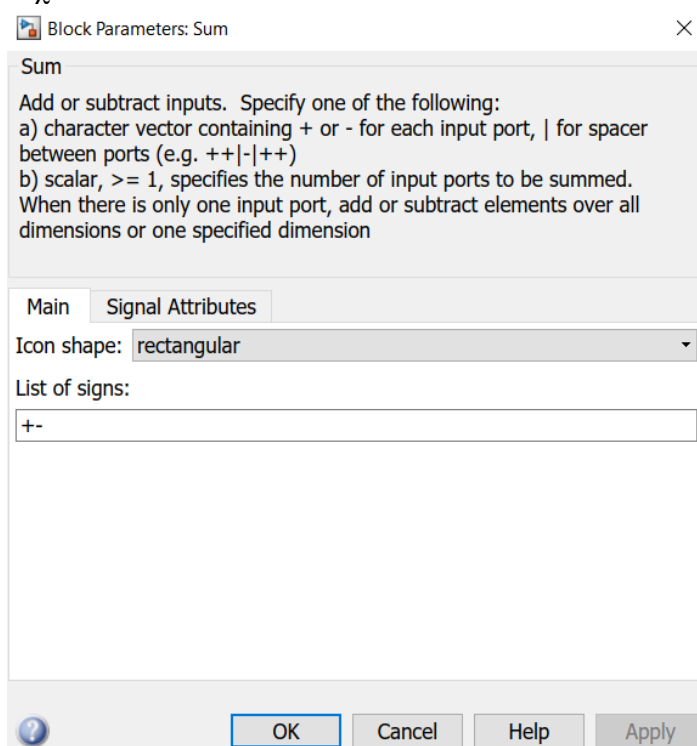
Εικόνα 4.142: Παράθυρα ορισμού παραμέτρων των “Inport” και “Outport” blocks εντός του “Compute V and I” block.

Οι πολυπλέκτες και αποπλέκτες θα εισαχθούν από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Mux” και “Demux” αντίστοιχα.



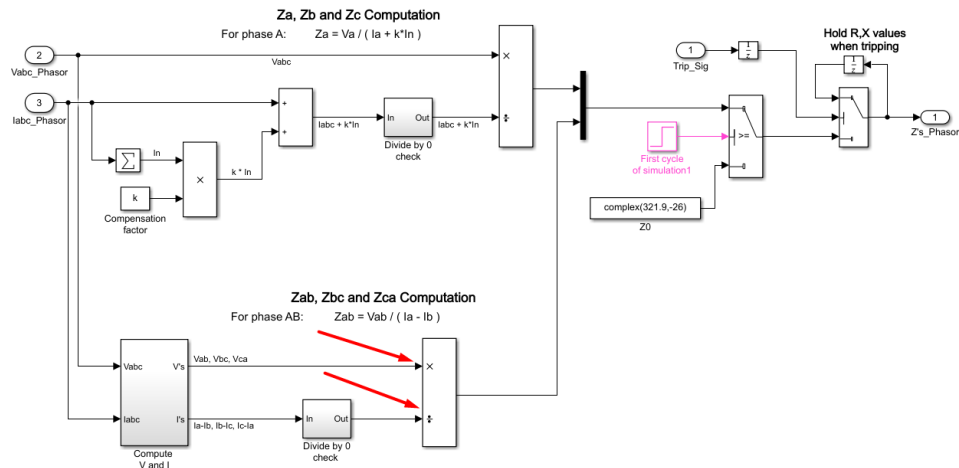
Εικόνα 4.142: Παράθυρα ορισμού παραμέτρων των “Demux” και “Mux” blocks εντός του “Compute V and I” block.

Με διπλό κλικ πάνω τους ορίζουμε τον αριθμό 3 στο πεδίο “Number of outputs” και “Number of inputs” αντίστοιχα. Τέλος, οι έξι αθροιστές θα εισαχθούν από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Math Operations και επιλογή “Add, Subtract, Sum of Elements, Sum”. Έπειτα με διπλό κλικ πάνω στο “Sum” block θα εισάγουμε στο πεδίο “List of signs” το “+-” ώστε να δημιουργηθεί ένας αφαιρετής δυο στοιχείων.



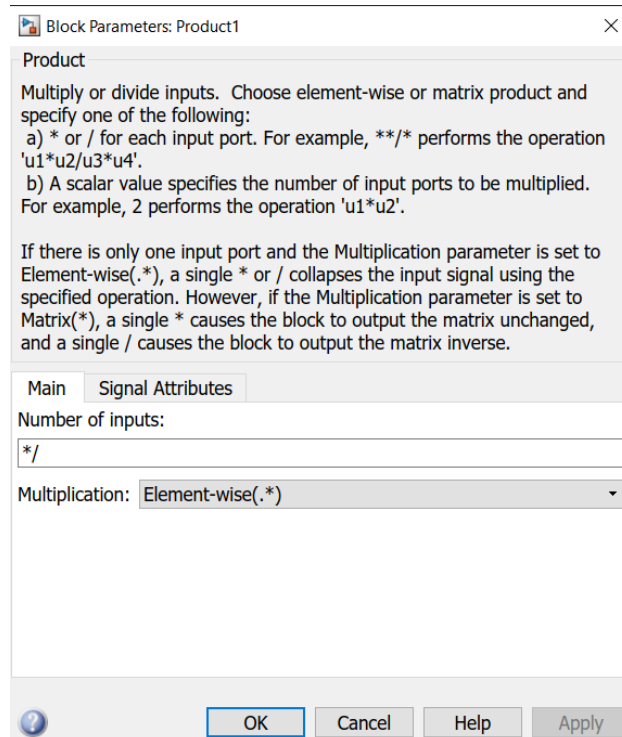
Εικόνα 4.144: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Sum” block εντός του “Compute V and I” block.

Οι όροι “V’s” και “I’s” που εξάγονται από το σύστημα “Compute V and I” θα εισαχθούν σε ένα “Product” block δυο με εισόδων με την εξής συνδεσμολογία:



Εικόνα 4.145: Εισαγωγή όρων “ V_{ab} ”, “ V_{bc} ”, “ V_{ca} ” και “ $I_a - I_b$ ”, “ $I_b - I_c$ ”, “ $I_c - I_a$ ” σε “Product” block.

Αφού εισαχθεί το “Product” block (Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Product”) με διπλό κλικ πάνω του, στο πεδίο “Number of inputs”, εισάγουμε την συμβολοσειρά “*/”.



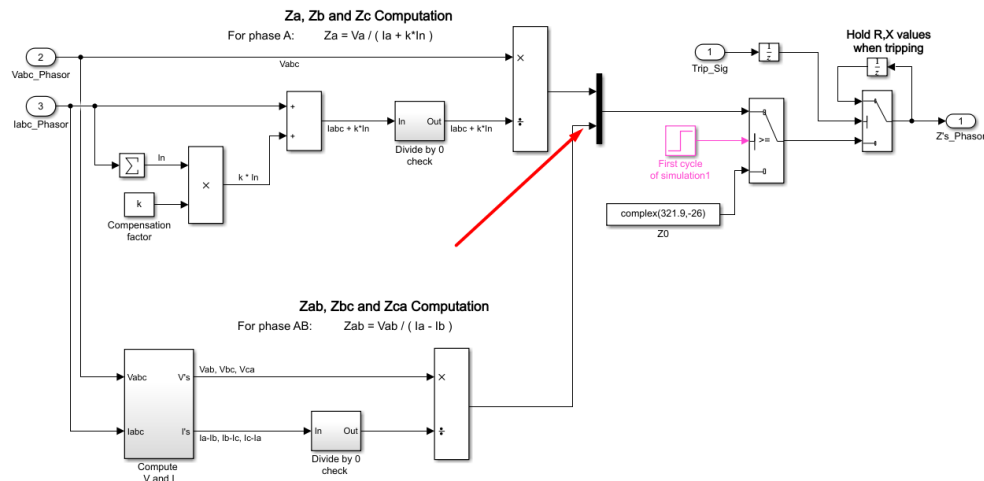
Εικόνα 4.146: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Product” block εντός του “Compute V and I” block.

Με αυτόν τον τρόπο εξάγουμε τα κλάσματα των σύνθετων αντιστάσεων:

$$Z_{ab} = \frac{V_{ab}}{I_a - I_b}$$

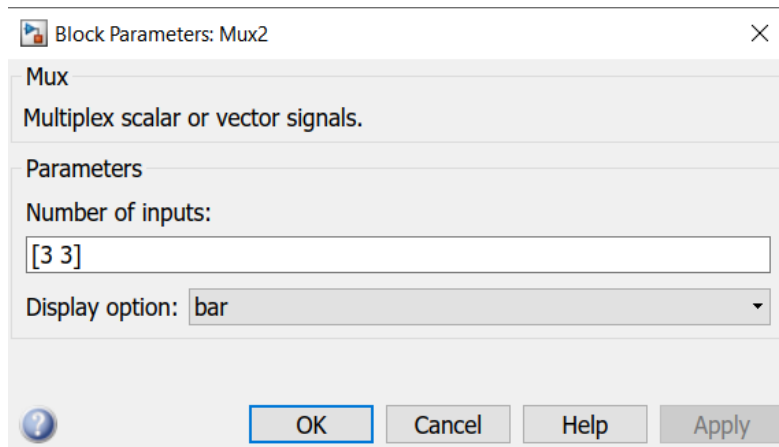
$$Z_{bc} = \frac{V_{bc}}{I_b - I_c}$$

$$Z_{ca} = \frac{V_{ca}}{I_c - I_a}$$



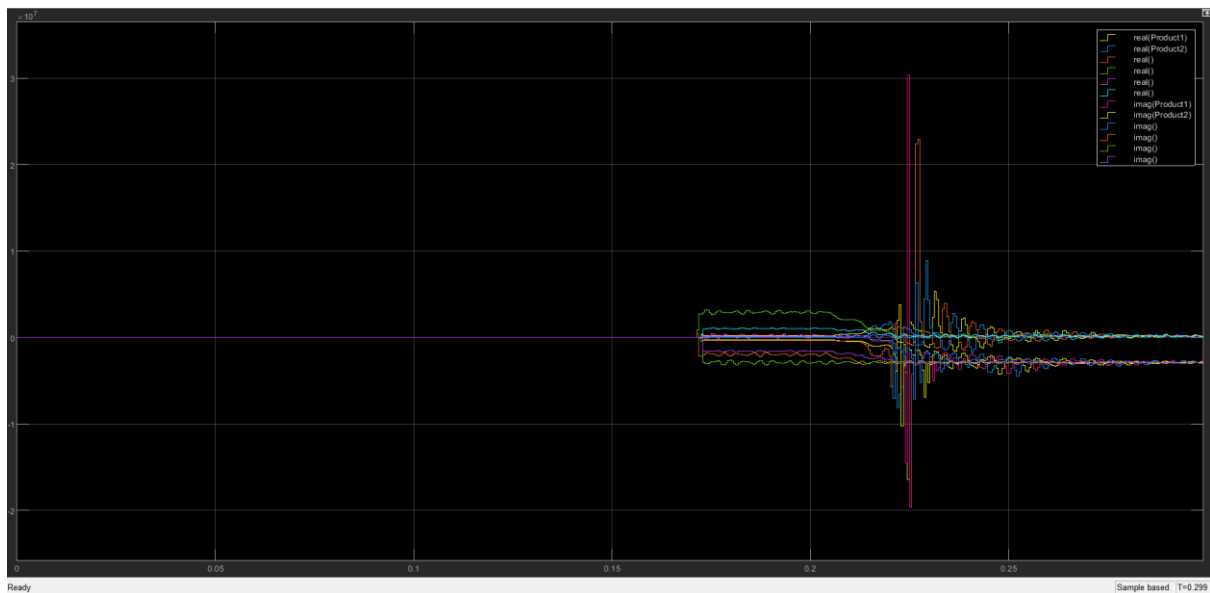
Εικόνα 4.147: Σημείο εξόδου του “Product” block που περιέχει τις σύνθετες αντιστάσεις “ Z_{ab} ”, “ Z_{bc} ” και “ Z_{ca} ”.

Σημειώνεται πως και στο ρεύμα “I’s” εφαρμόζεται ο έλεγχος μη μηδενισμού μέσω του block “Divide by 0 check” που αναλύσαμε παραπάνω, καθώς βρίσκεται στον παρονομαστή της σύνθετης αντιστάσεων Z_{ab} , Z_{bc} , Z_{ca} . Τις εξόδους των άνω και κάτω “Product” blocks τις θέτουμε ως εισόδους σε έναν πολυπλέκτη “Mux” 2 σε 1. Ο πολυπλέκτης εισάγεται από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Mux”. Σε ένα “Mux” block ο αριθμός των σημάτων εισόδου, μπορεί να καθοριστεί ως βαθμωτός, διανυσματικός, πίνακας κελιών ή λίστα ονομάτων σημάτων διαχωρισμένη με κόμμα ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή. Εν προκειμένω, η κάθε μια είσοδος περιέχει την πληροφορία τριών σύνθετων αντιστάσεων και έχουμε συνολικά δυο εισόδους. Επομένως, θα χρειαστούμε διανυσματικό αριθμό εισόδων με δυο θύρες εισόδου μεγεθών 3 και 3. Με διπλό κλικ πάνω τους ορίζουμε στο πεδίο “Number of inputs” την συμβολοσειρά “[3 3]”.



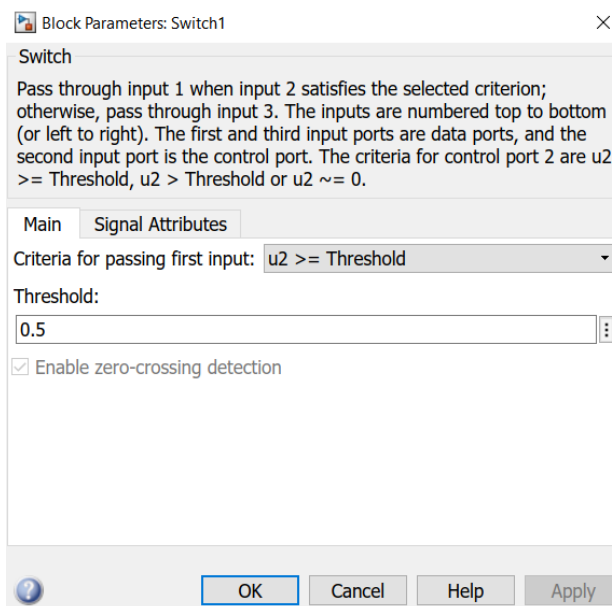
Εικόνα 4.148: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Mux” block εντός του “Impedance (Z) computation” block.

Σε αυτό το σημείο έχουμε καταφέρει να υπολογίζουμε το πραγματικό και το φανταστικό μέρος των έξι σύνθετων αντιστάσεων που προαναφέραμε από την αρχή της προσομοίωσης μέχρι το πέρας της προσομοίωσης (Stop time : 0.299 sec). Οι κυματομορφές έχουν την παρακάτω μορφή:



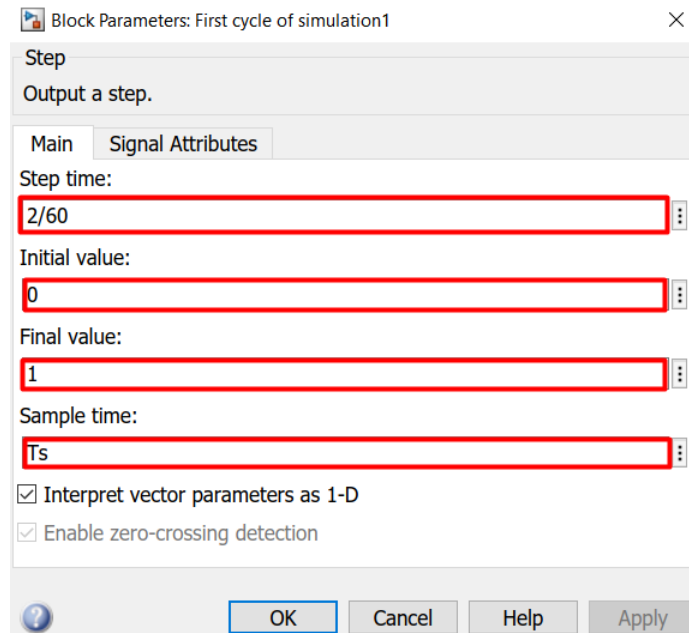
Εικόνα 4.149: Γραφική απεικόνιση του πραγματικού και του φανταστικού μέρους των σύνθετων αντιστάσεων που υπολογίζονται εντός του “Impedance (Z) computation” block χωρίς αυτοσυγκράτηση.

Υπάρχουν δυο σημαντικά προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπίσουμε. Πρέπει αφενός να μπορούμε να ελέγχουμε τον χρόνο έναρξης υπολογισμού των αντιστάσεων και αφετέρου να κρατιούνται οι τιμές των αντιστάσεων που υπολογίστηκαν την χρονική στιγμή που άνοιξαν οι διακόπτες, ώστε να έχουμε μια καλή εποπτεία του φαινομένου. Το πρώτο πρόβλημα επιλύεται με ένα “Switch” block που εισάγεται από τη διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Switch”. Με διπλό κλικ πάνω του ορίζουμε “Threshold” 0.5.



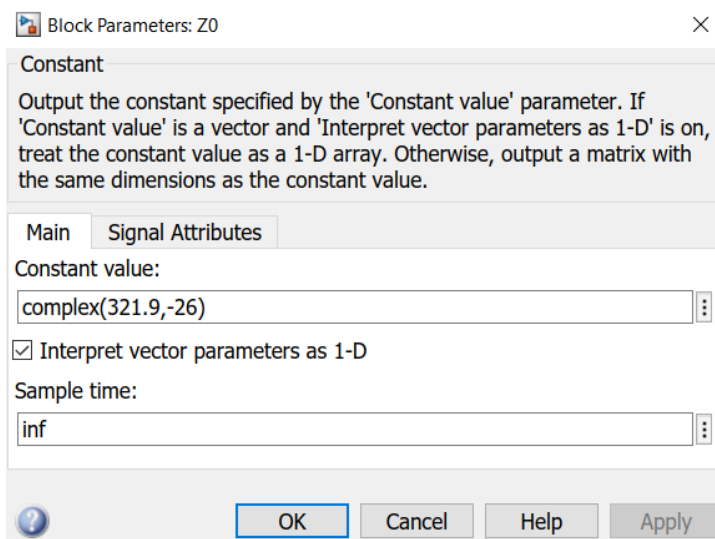
Εικόνα 4.150: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Switch” block εντός του “Impedance (Z) computation” block.

Στη πάνω θύρα του εισάγουμε την έξοδο του πολυπλέκτη “Mux”. Στην μεσαία θύρα εισάγουμε μια βηματική συνάρτηση “Step” block από τη διαδρομή Library Browser / Simulink / Sources και επιλογή “Step”. Με διπλό κλικ πάνω της συμπληρώνουμε τα κενά πεδία με τον εξής τρόπο:



Εικόνα 4.151: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Step” block εντός του “Impedance (Z) computation” block.

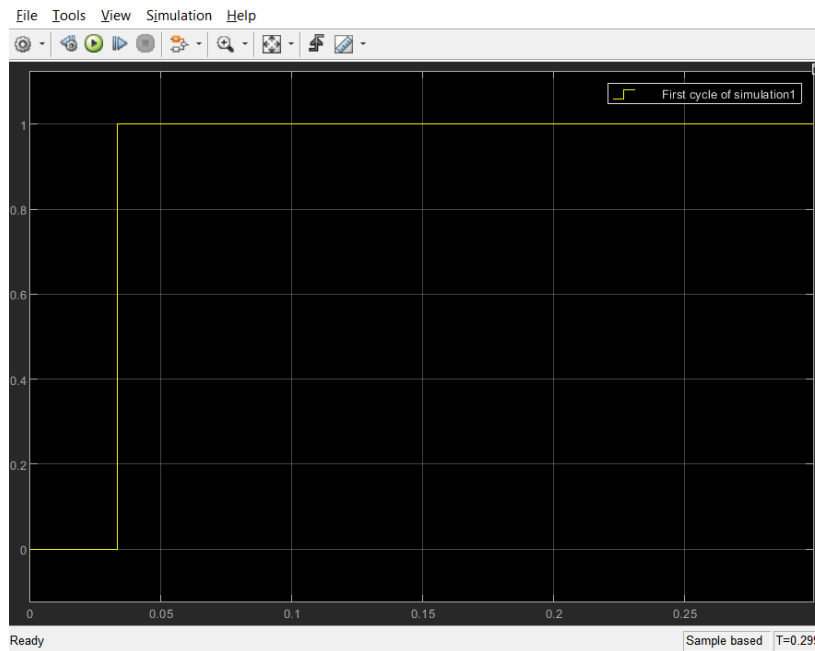
Στην κάτω θύρα εισάγουμε ένα “Constant” block από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Constant”. Με διπλό κλικ εισάγουμε στο πεδίο “Constant value” την μεταβλητή $\text{complex}(321.9, -26)$, η οποία αντιστοιχεί στον μιγαδικό αριθμό $Z_0 = 321.9 - j26$.



Εικόνα 4.152: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Constant” block εντός του “Impedance (Z) computation” block.

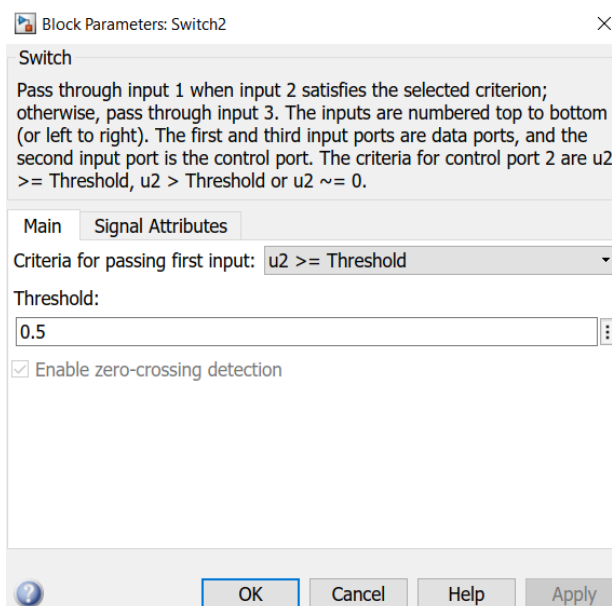
Τρόπος Λειτουργίας:

Η μεσαία θύρα εισάγει στο Switch block έναν μοναδιαίο παλμό με χρόνο έναυσης στα 2/60 seconds (χρόνος που αντιστοιχεί στην καθυστέρηση λειτουργίας των διακοπτικών στοιχείων).



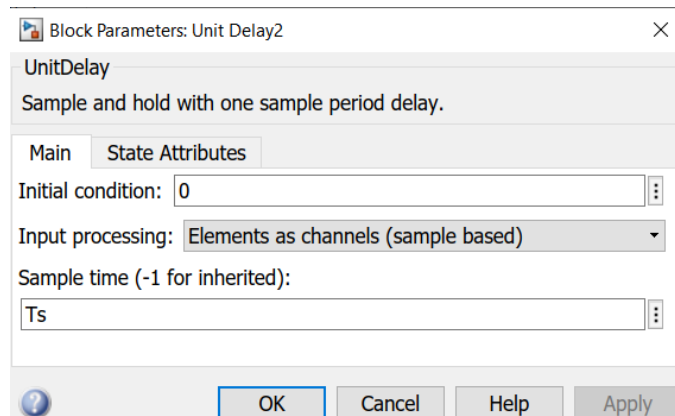
Εικόνα 4.153: Γραφική απεικόνιση της βηματικής συνάρτησης του “Step” block εντός του “Impedance (Z) computation ” block.

Για το χρονικό διάστημα που η βηματική συνάρτηση έχει μηδενική τιμή , τιμή μικρότερη από το ορισμένο “Threshold” του Switch block (0.5) , το Switch block περνάει στην έξοδο την κάτω θύρα , δηλαδή τη μιγαδική σύνθετη αντίσταση $Z_0 = 321.9 - j26$. Στα 2/60 seconds, η βηματική συνάρτηση αποκτά μοναδιαία τιμή , τιμή μεγαλύτερη από το ορισμένο “Threshold” του Switch block (0.5) , επομένως το Switch block περνάει στην έξοδο την πάνω θύρα , δηλαδή τις έξι σύνθετες αντιστάσεις που υπολογίζονται σε πραγματικό χρόνο από το προηγούμενο στάδιο. Το δεύτερο πρόβλημα επιλύεται επίσης με ένα ένα “Switch” block που εισάγεται από τη διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Switch”. Με διπλό κλικ πάνω του ορίζουμε “Threshold” 0.5.



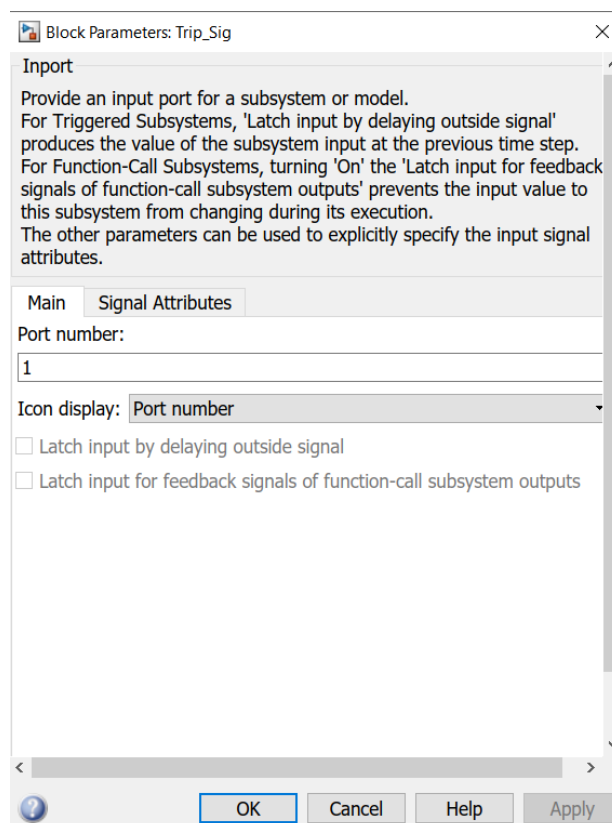
Εικόνα 4.154: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του δεύτερου “Switch” block εντός του “Impedance (Z) computation ” block.

Στη πάνω θύρα του συνδέουμε την έξοδο του ίδιου του Switch block μέσω ενός “Unit Delay” block. Αυτό το block εισάγεται από τη διαδρομή Library Browser / Simulink / Discrete και επιλογή “Unit Delay”. Με διπλό κλικ πάνω του ορίζουμε στο πεδίο “Sample time” τον χρόνο δειγματοληψίας “Ts”.



Εικόνα 4.155: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “UnitDelay” block εντός του “Impedance (Z) computation ” block.

Στην μεσαία θύρα εισάγουμε, μέσω ενός “Unit Delay” block πάλι, το “Inport” block του σήματος εισόδου “Trip_Sig” από τη διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Inport”. Με διπλό κλικ πάνω του επιλέγουμε το “Port Number” που αντιστοιχεί στην μεταβλητή:

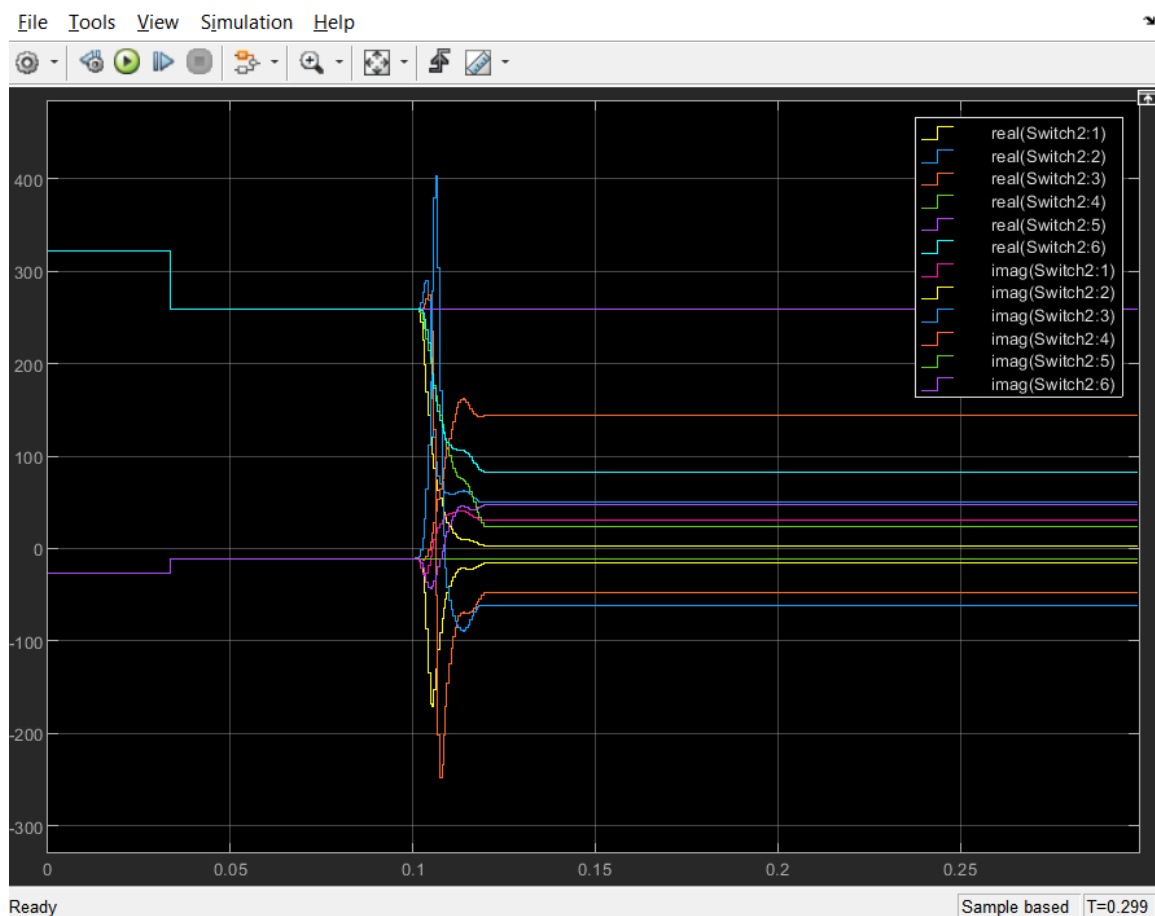


Εικόνα 4.156: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Inport” block “Trip_Sig” εντός του “Impedance (Z) computation ” block.

Στην κάτω θύρα εισάγουμε την έξοδο του προηγούμενου εν σειρά “Switch” block.

Τρόπος Λειτουργίας:

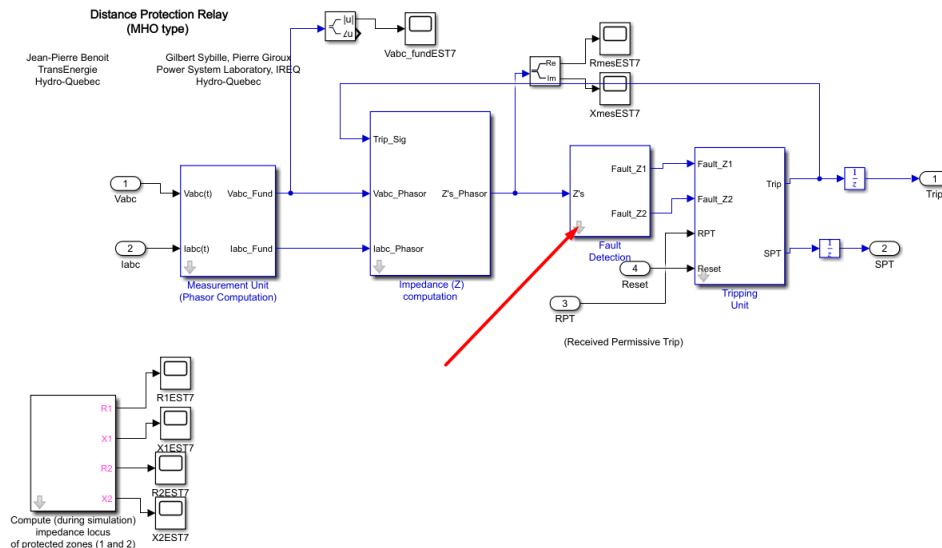
Κατά την εκκίνηση της προσομοίωσης το σήμα “Trip_Sig” είναι μηδενικό καθώς οι διακόπτες είναι κλειστοί, επομένως η μεσαία θύρα του Switch block διαβάζει τιμή 0, μικρότερη από την τιμή του ορισμένου Threshold (0.5). Έτσι, στην έξοδο του Switch block περνάει η κάτω θύρα. Η κάτω θύρα είναι αυτή που περιέχει την πληροφορία των υπολογιζόμενων σύνθετων αντιστάσεων. Με την πάροδο του χρόνου αν προκύψει σφάλμα και κάποια από τις υπολογιζόμενες αντιστάσεις βρεθούν εντός των χαρακτηριστικών λειτουργίας των ηλεκτρονόμων, τότε θα σταλθεί σήμα μοναδιαίου παλμού ανοίγματος των διακοπών “Trip_Sig” από τους ηλεκτρονόμους. Το σήμα αυτό τώρα θα περάσει στην μεσαία θύρα μέσω μιας χρονικής καθυστέρησης τιμής “Ts” που επιφέρει το “Unit Delay” block (επόμενος ακριβώς κύκλος προσομοίωσης). Στην μεσαία θύρα έχουμε πλέον μοναδιαίο σήμα με τιμή μεγαλύτερη από το ορισμένο Threshold (0.5), επομένως στην έξοδο του Switch block θα περνάει η πάνω θύρα. Η πάνω θύρα μέσω μιας μιας χρονικής καθυστέρησης τιμής “Ts” που επιφέρει το “Unit Delay” block (επόμενος ακριβώς κύκλος προσομοίωσης) είναι συνδεδεμένη με την έξοδο του Switch block. Με αυτόν τον τρόπο κρατιέται μέχρι την λήξη της προσομοίωσης (Stop time: 0.299) η σύνθετη αντίσταση που υπολογίστηκε την χρονική στιγμή που άνοιξαν οι διακόπτες στην έξοδο του συγκεκριμένου σταδίου. Τα πραγματικά και φανταστικά μέρη των έξι σύνθετων αντιστάσεων που προκύπτουν στην έξοδο του συστήματος-block “Impedance (Z) Computation” έχουν την παρακάτω μορφή:



Εικόνα 4.157: Γραφική απεικόνιση του πραγματικού και του φανταστικού μέρους των σύνθετων αντιστάσεων που υπολογίζονται εντός του “Impedance (Z) computation” block με αυτοσυγκράτηση.

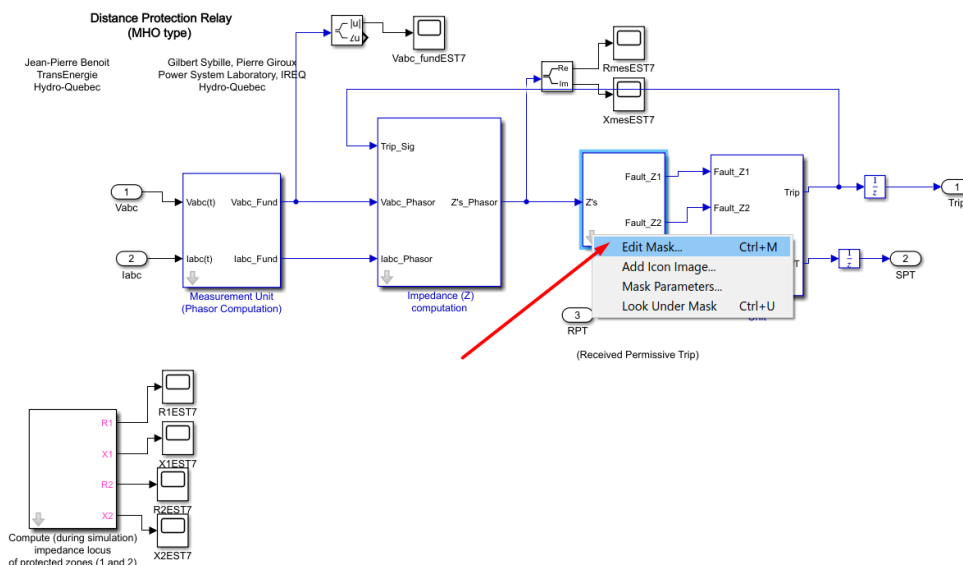
4.8.5 Ανίχνευση σφάλματος

Θα δημιουργήσουμε ένα σύστημα-block το οποίο θα δέχεται ως είσοδο τις στάθμες πραγματικού και φανταστικού μέρους της σύνθετης αντίστασης “Z’s” και στις εξόδους του θα εξάγονται μοναδιαίοι παλμοί αν το σφάλμα βρίσκεται εντός των ζωνών 1 ή 2 των χαρακτηριστικών λειτουργίας των ηλεκτρονόμων. Με δεξί κλικ στο βέλος “Look inside mask”:



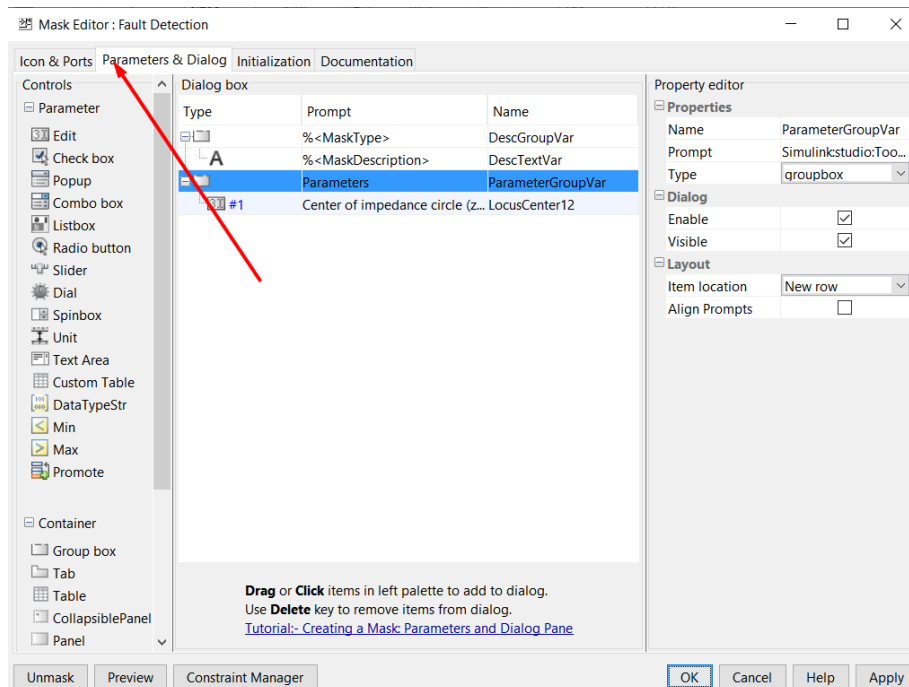
Εικόνα 4.158: “Fault Detection” block.

Και επιλογή “Edit Mask”:



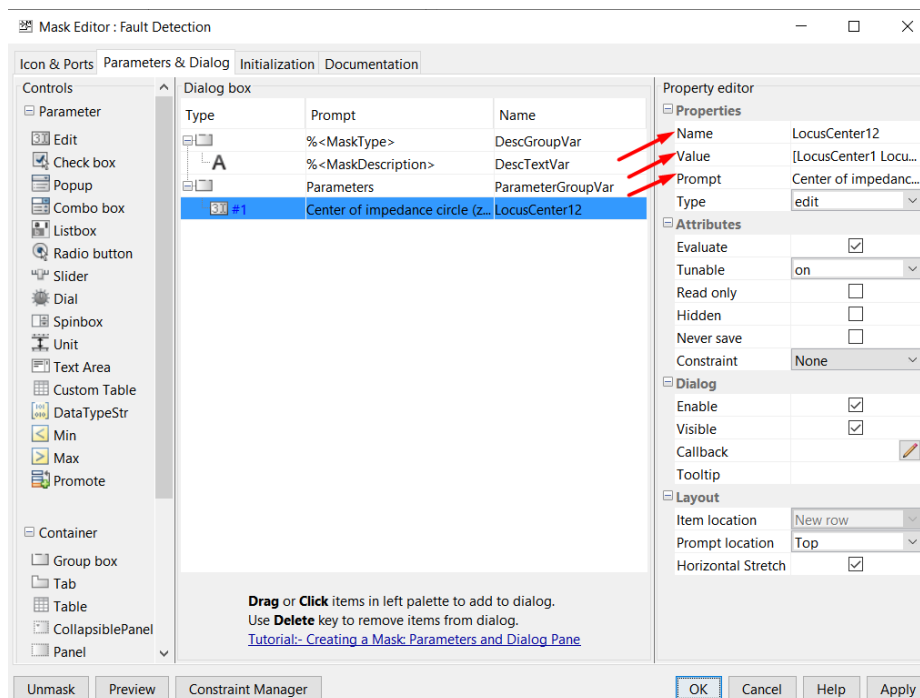
Εικόνα 4.159: Επεξεργασία του “Fault Detection” block τύπου Mask.

Οδηγούμαστε στον “Mask Editor”. Επιλέγοντας την καρτέλα “Parameters & Dialog”:



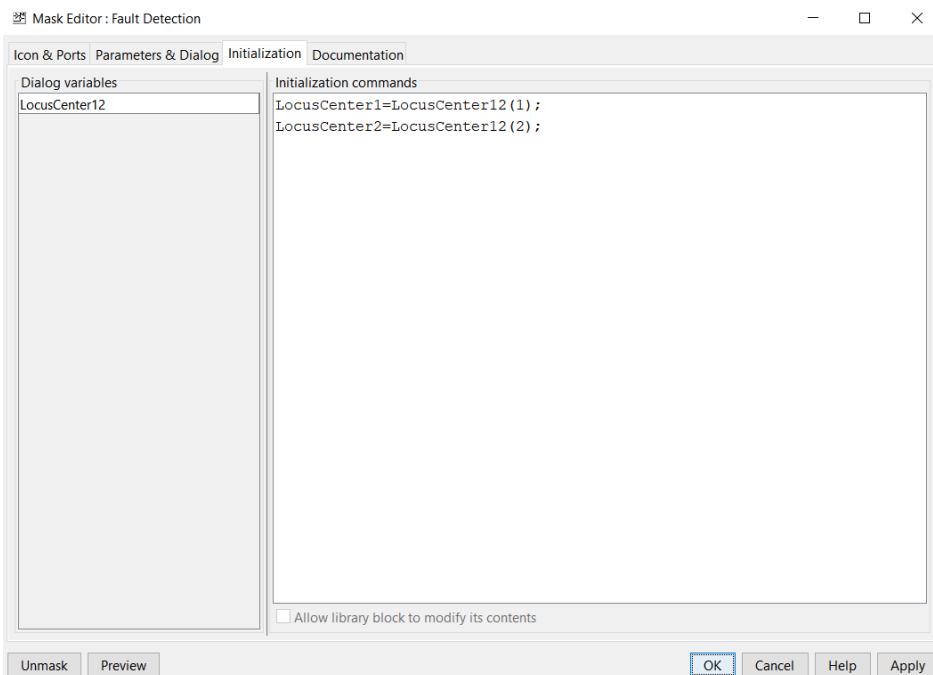
Εικόνα 4.160: Καρτέλα Parameters & Dialog του “Fault Detection” block τύπου Mask.

Ορίζουμε την μεταβλητή διάνυσμα “Center of impedance circle (zone 1 and 2)” με όνομα, τιμή και περιγραφή.



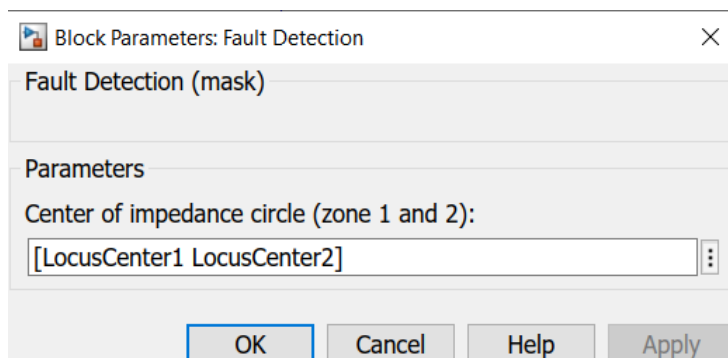
Εικόνα 4.161: Όνομα, τιμή και περιγραφή των παραμέτρων της καρτέλας Parameters & Dialog του “Fault Detection” block τύπου Mask.

Η μεταβλητή “LocusCenter12” περιέχει εσωτερικά δυο όρους τους “LocusCenter1” και “LocusCenter2”. Η καρτέλα “Initialization” φανερώνει τον τρόπο ορισμού τους:



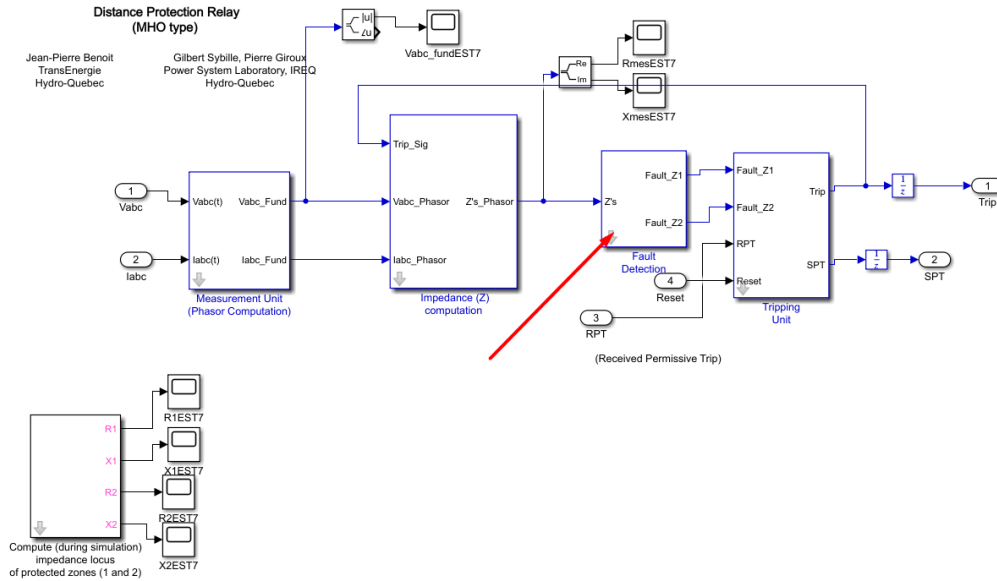
Εικόνα 4.162: Καρτέλα Initialization του “Fault Detection” block τύπου Mask.

Ο χρήστης με διπλό κλικ πάνω στο μπλοκ εισάγει τα κέντρα των Ζωνών 1 και 2 των κύκλων ΜΗΟ ως μεταβλητή διάνυσμα δυο στοιχείων:



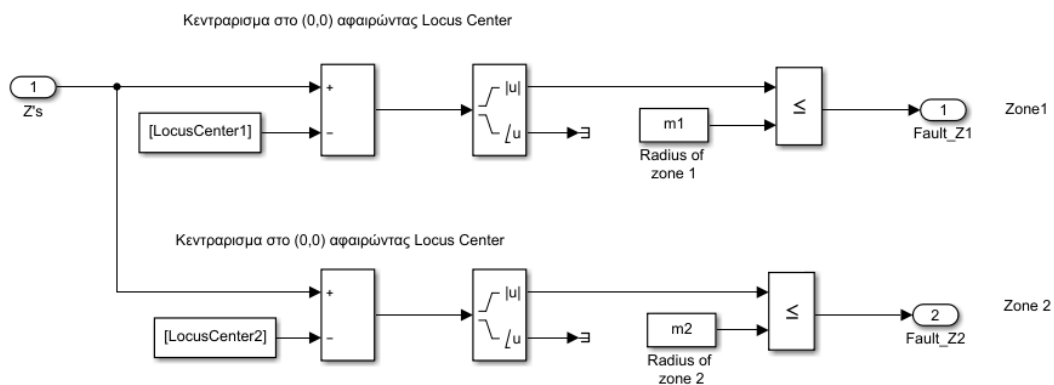
Εικόνα 4.163: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Fault Detection” block.

Ενώ με επιλογή στο βέλος “Look inside mask” εισέρχεται στο εσωτερικό υποσύστημα.



Εικόνα 4.164: Πεδίο “Look inside mask” του “Fault Detection” block.

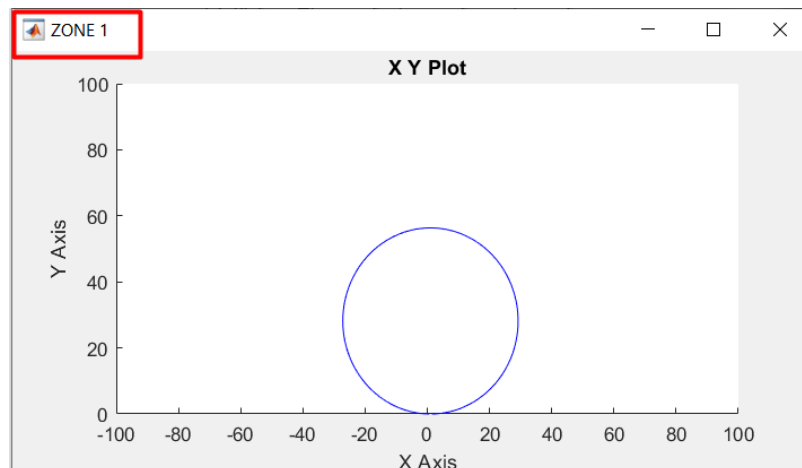
Το εσωτερικό υποσύστημα του block “Fault Detection” πρέπει να έχει την παρακάτω μορφή:



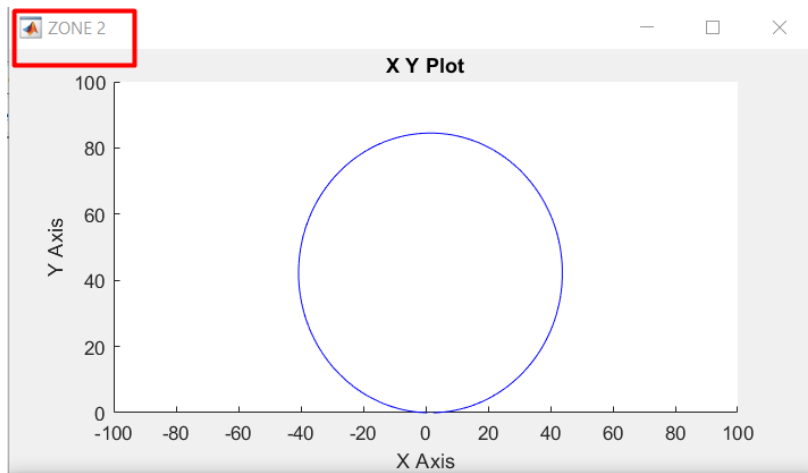
Εικόνα 4.165: Εσωτερικό υποσύστημα του “Fault Detection” block.

Τρόπος Λειτουργίας Υποσυστήματος:

Οι κύκλοι ΜΗΟ των ζωνών προστασίας 1 και 2 απεικονίζονται ως εξής:



Εικόνα 4.166: Γραφική απεικόνιση του κύκλου ΜΗΟ της πρώτης ζώνης προστασίας.



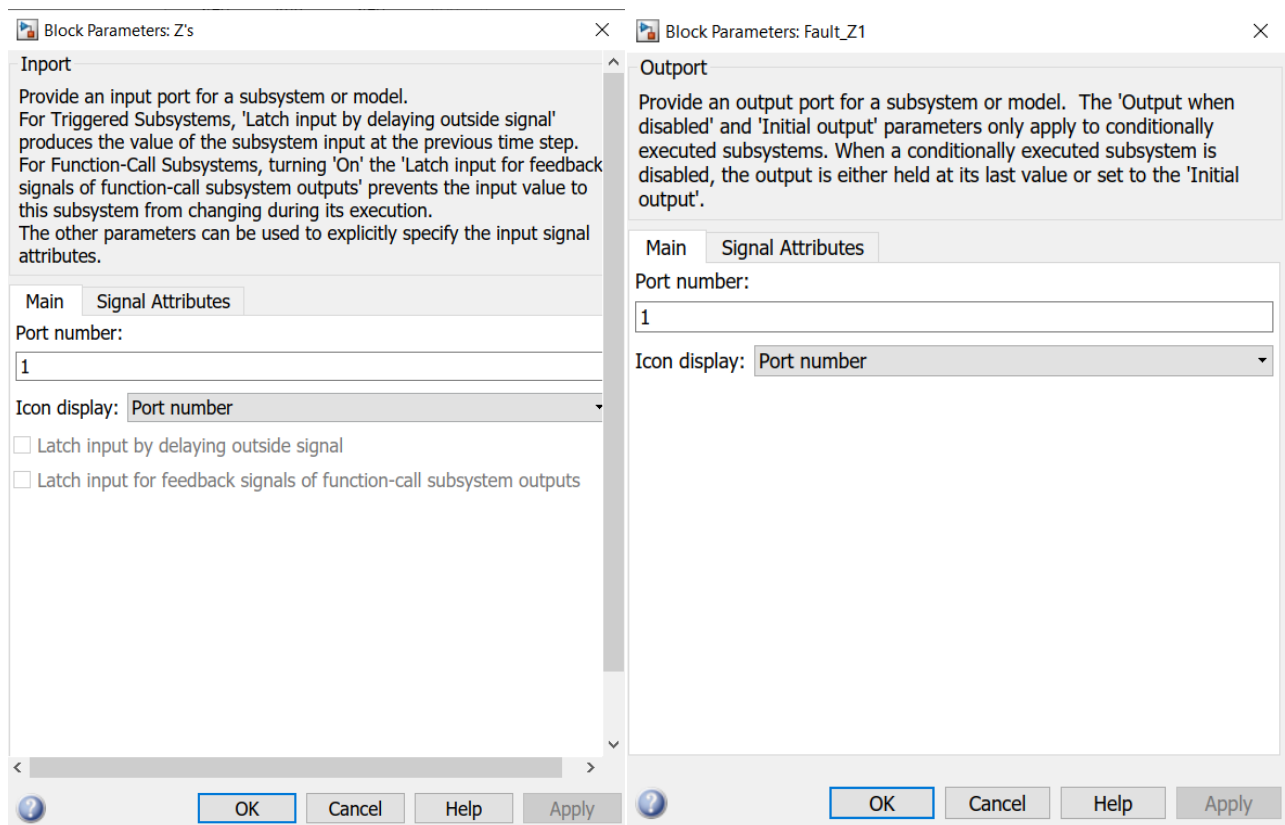
Εικόνα 4.167: Γραφική απεικόνιση του κύκλου ΜΗΟ της δεύτερης ζώνης προστασίας.

Βλέπουμε πως τα κέντρα τους είναι μετατοπισμένα κατά μια απόσταση “LocusCenter1” και “LocusCenter2” αντίστοιχα από την αρχή των αξόνων (0,0) και πως οι ακτίνες τους είναι “m1” και “m2” αντίστοιχα. Στο εν λόγω υποσύστημα λαμβάνουμε στην είσοδο τις έξι σύνθετες αντιστάσεις “Z’s” οι οποίες αποτελούν σημεία πάνω στους άξονες R-X και θέλουμε να ελέγξουμε αν βρίσκονται εντός ή εκτός των ζωνών προστασίας 1 ή 2. Για να το επιτύχουμε αυτό αρχικά θα αφαιρέσουμε από τα Z’s τις αποστάσεις των κέντρων των κύκλων ΜΗΟ από τη αρχή των αξόνων. Έτσι έχουμε κεντράρει νοητά στο (0,0) τις σύνθετες αντιστάσεις και τους κύκλους ΜΗΟ κρατώντας ίδια την σχετική τους θέση. Τώρα είμαστε σε θέση να συγκρίνουμε τις ακτίνες των κύκλων ΜΗΟ με το μέτρο των σύνθετων αντιστάσεων.

- Αν $|Z's| < m1$, τότε ενεργοποιείται η ζώνη προστασίας 1 και στέλνεται μοναδιαίος παλμός έναυσης.
- Αν $|Z's| > m1$ και $|Z's| < m2$, τότε ενεργοποιείται η ζώνη προστασίας 2 και στέλνεται μοναδιαίος παλμός έναυσης με κάποια χρονική καθυστέρηση.
- Αν $|Z's| > m2$, θα σταλθεί μηδενικό σήμα.

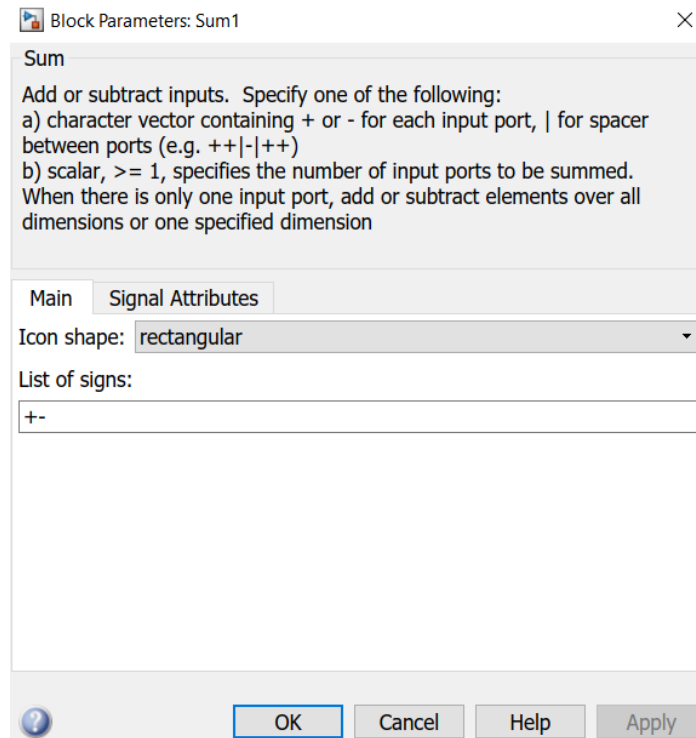
Η είσοδος “Z’s” και οι έξοδοι “Fault_Z1”, “Fault_Z2” εισάγονται ως “Inport” και “Outport” blocks από τη διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Inport” και “Outport” αντίστοιχα.

Με διπλό κλικ πάνω τους ορίζουμε τον αριθμό του port που τους αρμόζει.



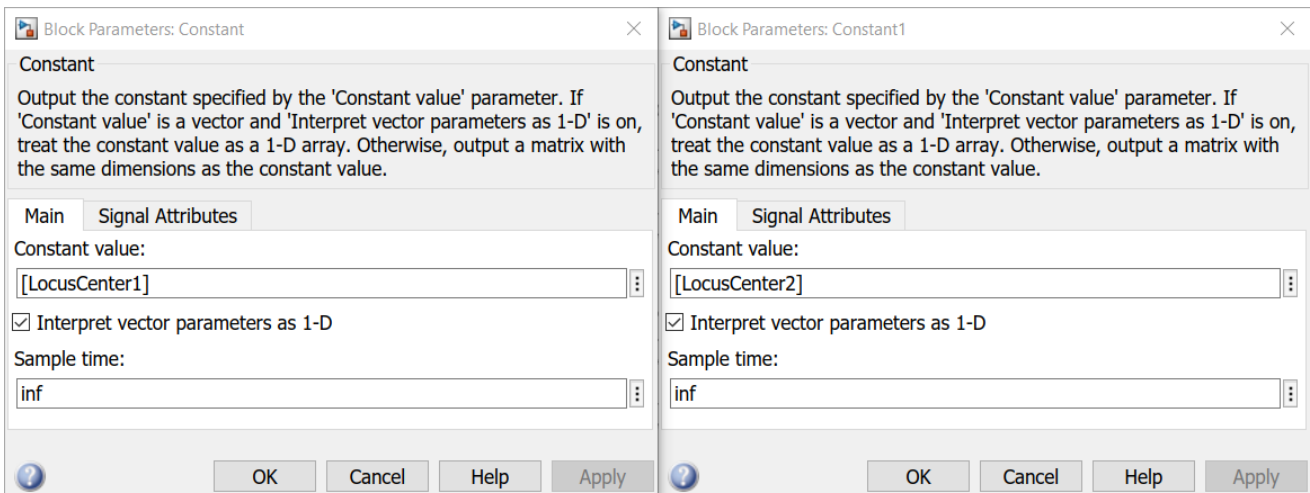
Εικόνα 4.168: Παράθυρα ορισμού παραμέτρων των “Inport” και “Outport” blocks εντός του “Fault Detection” block.

Τις σύνθετες αντιστάσεις Z 's τις εισάγουμε ταυτόχρονα σε δύο “Sum” blocks στην είσοδο “+”. Τα “Sum” blocks εισάγονται από τη διαδρομή Library Browser / Simulink / Math Operations και επιλογή “Add, Subtract, Sum of Elements, Sum”. Με διπλό κλικ πάνω στα “Sum” blocks θα εισάγουμε στο πεδίο “List of signs” το “+” ώστε να δημιουργηθούν δυο αφαιρέτες δυο στοιχείων.



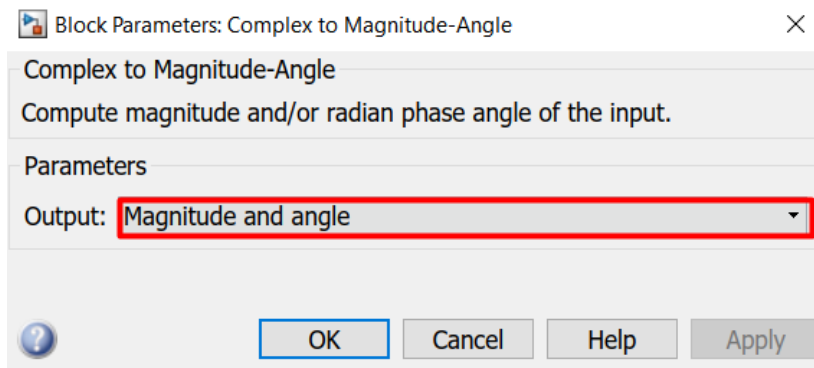
Εικόνα 4.169: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Sum” block εντός του “Fault Detection” block.

Στην είσοδο “-” των αφαιρετών θα εισάγουμε την απόσταση των κέντρων των κύκλων ΜΗΟ από την αρχή των αξόνων ως σταθερές “LocusCenter1” και “LocusCenter2”. Τα “Constant” blocks εισάγονται από τη διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Constant”. Με διπλό κλικ πάνω τους εισάγουμε τις τιμές “LocusCenter1” και “LocusCenter2” αντίστοιχα:



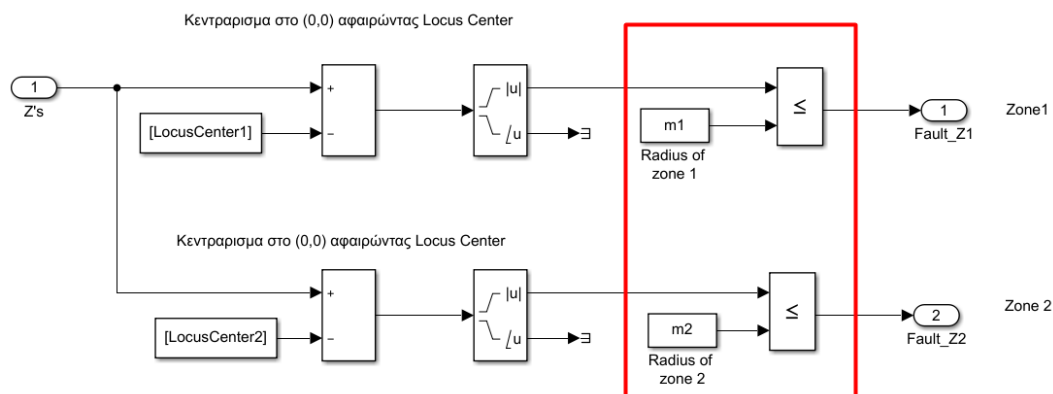
Εικόνα 4.170: Παράθυρα ορισμού παραμέτρων των “Constant” blocks “LocusCenter1” και “LocusCenter2” εντός του “Fault Detection” block.

Οι έξοδοι των “Sum” blocks θα χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι σε δυο “Complex to Magnitude-Angle” τα οποία εισάγονται από τη διαδρομή Library Browser / Simulink / Math Operations και επιλογή “Complex to Magnitude-Angle”. Με διπλό κλικ πάνω τους επιλέγουμε στο πεδίο “Output”: “Magnitude and angle”.



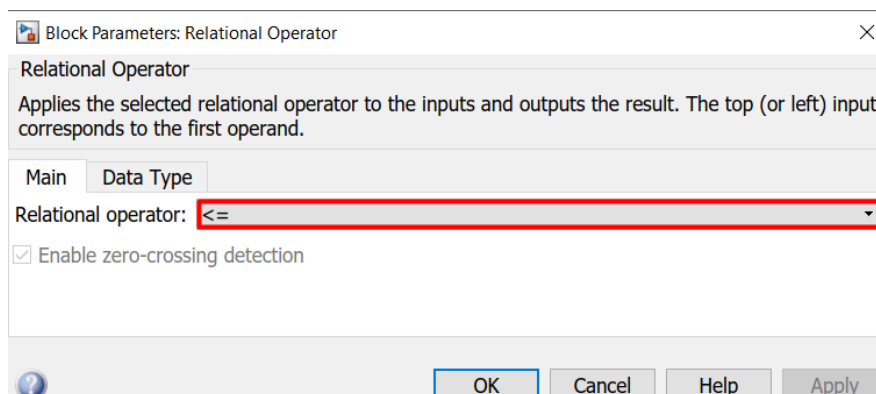
Εικόνα 4.171: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Complex to Magnitude-Angle” block εντός του “Fault Detection” block.

Τα παραπάνω blocks έχουν δύο εξόδους. Μια έξοδο μέτρου την οποία θα αξιοποιήσουμε και μια έξοδο γωνίας. Την έξοδο που αφορά την γωνία την τερματίζουμε με ένα “Terminator” block που εισάγουμε από τη διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Terminator”. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγουμε μηνύματα σφάλματος περί μη συνδεδεμένων απολήξεων. Τις εξόδους μέτρου τις συνδέουμε στην πάνω είσοδο δυο συγκριτών δύο εισόδων. Η σύνδεση είναι η ακόλουθη:



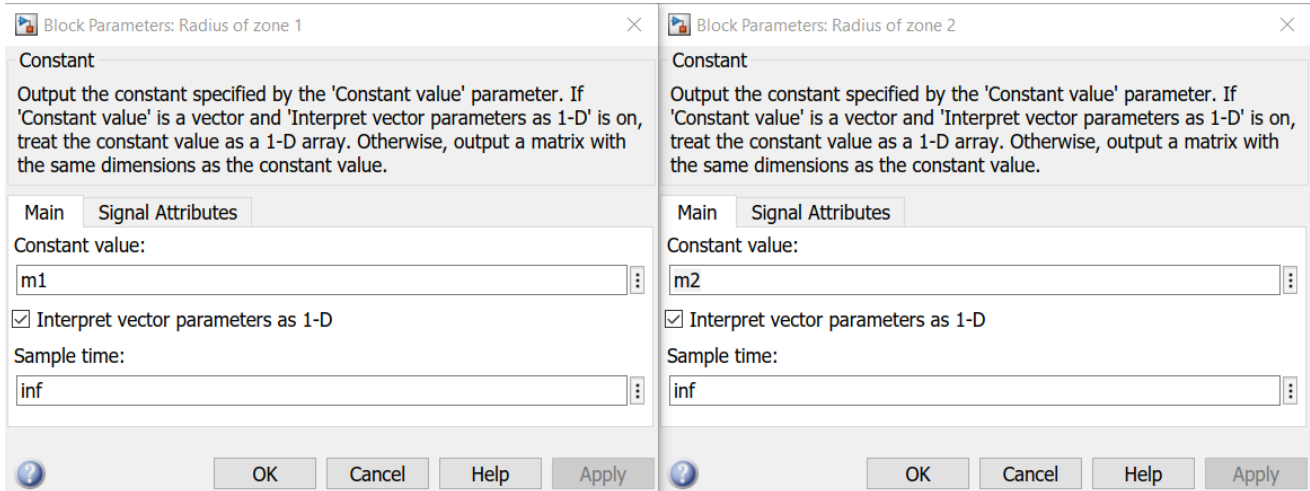
Εικόνα 4.172: Συνδεσμολογία των εισόδων των “Relational Operator” blocks εντός του “Fault Detection” block.

Οι συγκριτές ευρίσκονται στη διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Relational Operator”. Με διπλό κλικ πάνω τους επιλέγουμε το είδος της σύγκρισης. Εν προκειμένω:



Εικόνα 4.173: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Relational Operator” block εντός του “Fault Detection” block.

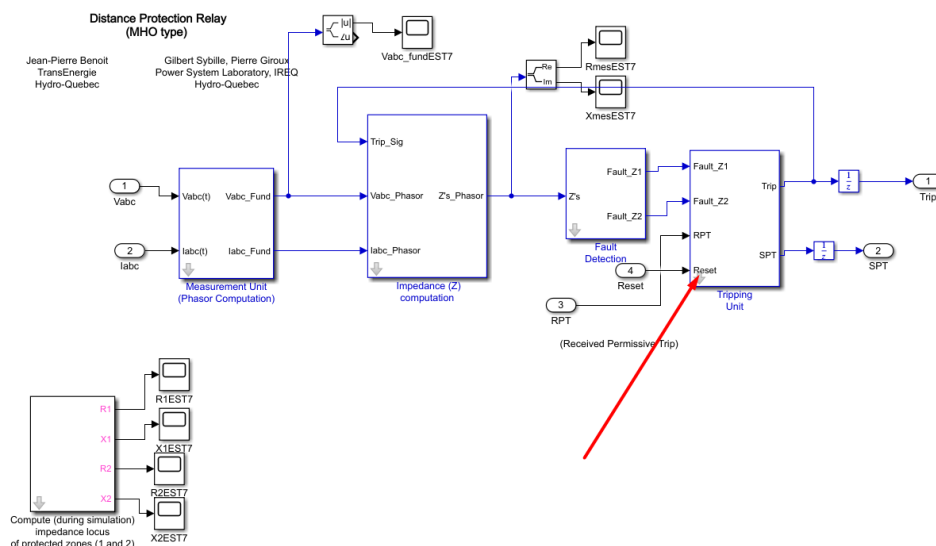
Στην δεύτερη είσοδο των συγκριτών θα εισάγουμε τις ακτίνες των κύκλων MHO των δυο ζωνών προστασίας ως σταθερές “m1” και “m2” αντίστοιχα. Τα “Constant” blocks εισάγονται από τη διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Constant”. Με διπλό κλικ πάνω τους εισάγουμε τις τιμές “m1” και “m2” αντίστοιχα:



Εικόνα 4.174: Παράθυρα ορισμού παραμέτρων των “Constant” blocks “m1” και “m2” εντός του “Fault Detection” block.

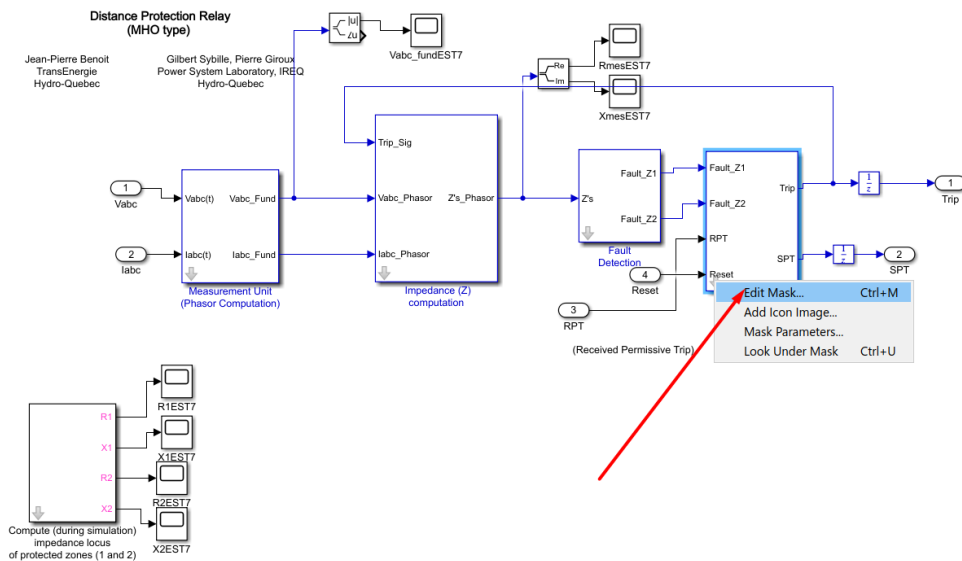
4.8.6 Μονάδα ενεργοποίησης διακοπικών στοιχείων

Θέλουμε να δημιουργήσουμε ένα σύστημα-block που αφενός να στέλνει σήματα ανοίγματος των διακοπών με κατάλληλες χρονικές καθυστερήσεις εφόσον το σφάλμα ανιχνεύεται από τους ηλεκτρονόμους εντός των ζωνών 1 ή 2 και αφετέρου να εξασφαλίσει την επικοινωνία και την διαλειτουργικότητα των δυο ηλεκτρονόμων των ζυγών B1 και B2. Με δεξί κλικ στο βέλος “Look inside mask”:



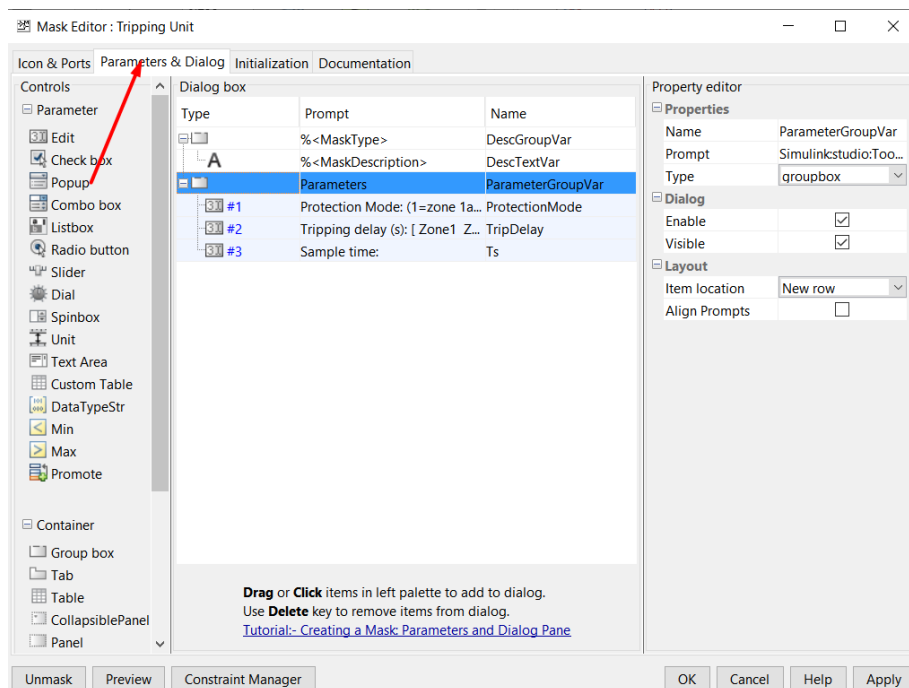
Εικόνα 4.175: “Tripping Unit” block.

Και επιλογή “Edit Mask”:



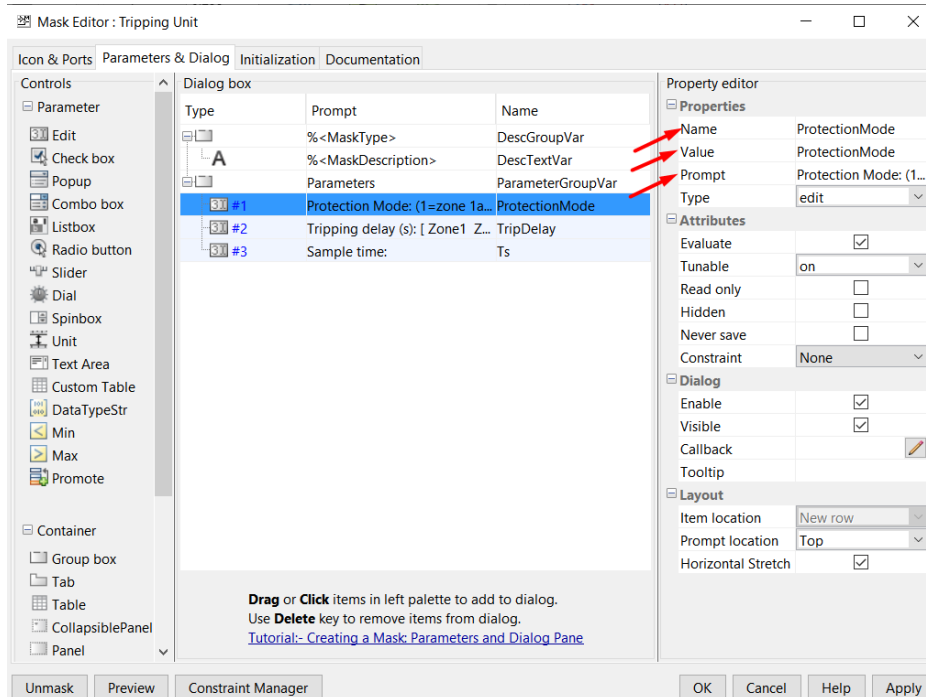
Εικόνα 4.176: Επεξεργασία του “Tripping Unit” block τύπου Mask.

Οδηγούμαστε στον “Mask Editor”. Επιλέγοντας την καρτέλα “Parameters & Dialog”:



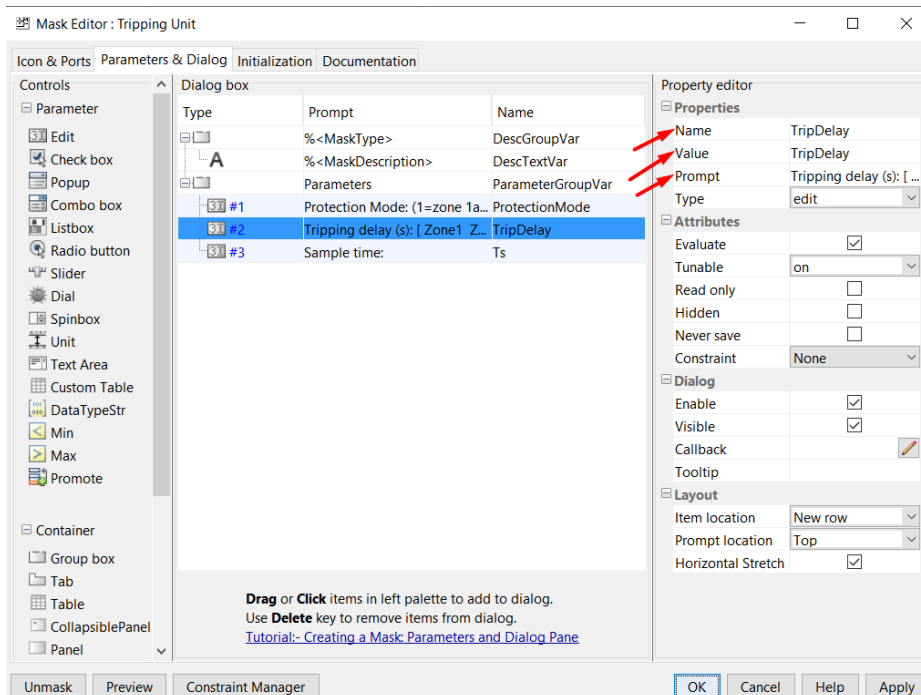
Εικόνα 4.177: Καρτέλα Parameters & Dialog του “Tripping Unit” block τύπου Mask.

Ορίζουμε την μεταβλητή “ Protection Mode” με όνομα, τιμή και περιγραφή.



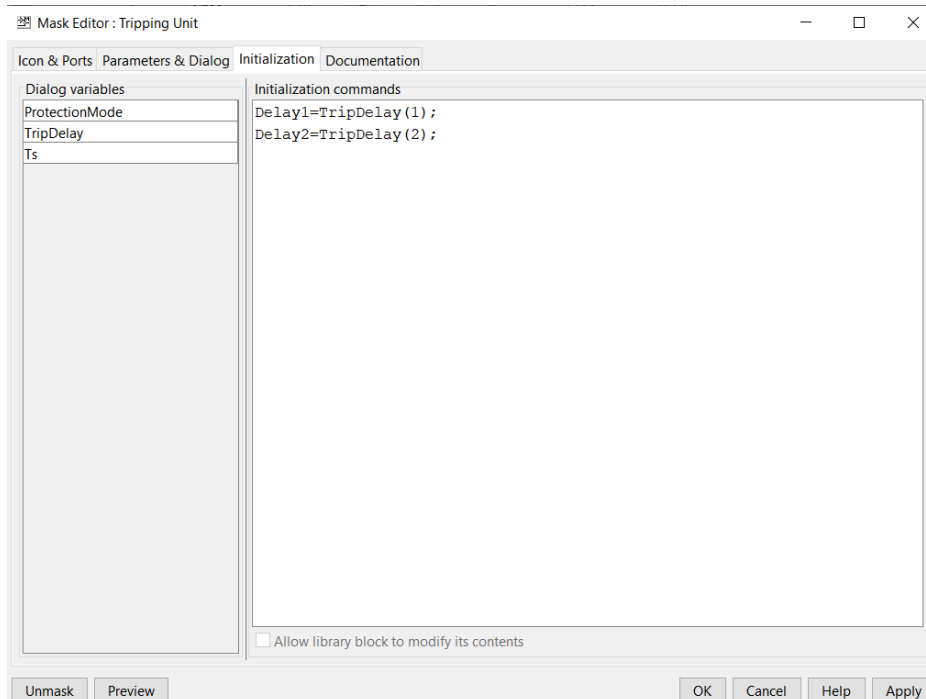
Εικόνα 4.178: Όνομα, τιμή και περιγραφή της παραμέτρου “Protection Mode” της καρτέλας Parameters & Dialog του “Tripping Unit” block τύπου Mask.

Η μεταβλητή αυτή μπορεί να πάρει τρεις πιθανές τιμές ανάλογα με το πόσες και ποιες ζώνες προστασίας θέλει ο χρήστης να συμπεριλάβει στην προσομοίωση: [1=zone 1 and 2, 2=zone1, 3=No tripping]. Έπειτα, ορίζουμε την μεταβλητή διάνυσμα “Tripping Delay (s)” με όνομα, τιμή και περιγραφή που εισάγει την επιθυμητή χρονική καθυστέρηση λειτουργίας των ηλεκτρονόμων για τις δυο ζώνες προστασίας.



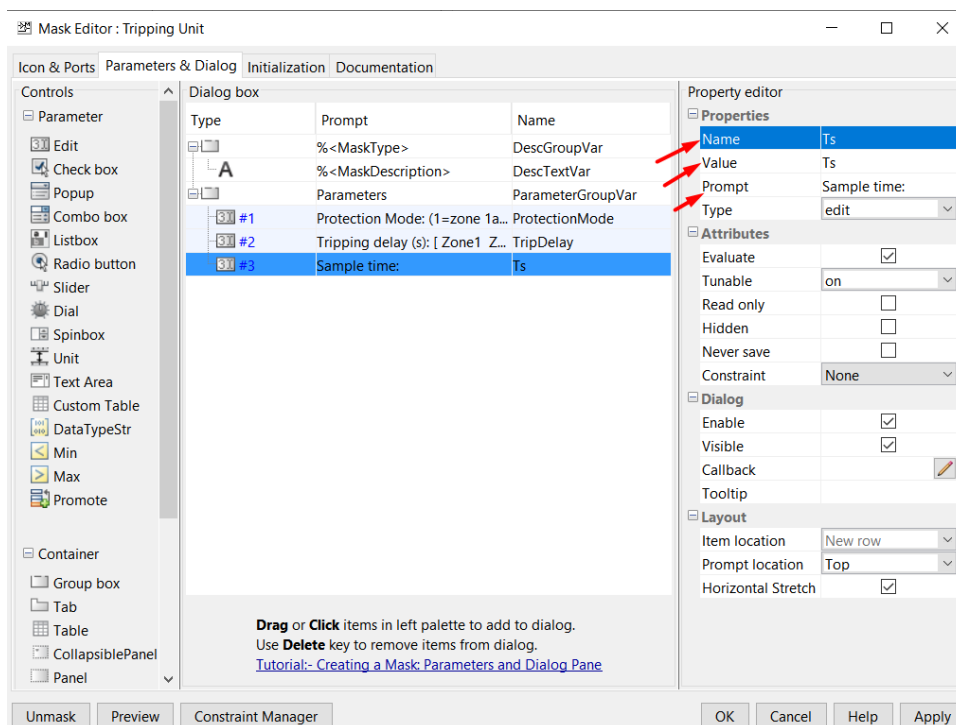
Εικόνα 4.179: Όνομα, τιμή και περιγραφή της παραμέτρου “Tripping delay (s)” της καρτέλας Parameters & Dialog του “Tripping Unit” block τύπου Mask.

Η μεταβλητή “TripDelay” περιέχει εσωτερικά δυο όρους τους “Zone1” και “Zone2”. Η καρτέλα “Initialization” φανερώνει τον τρόπο ορισμού τους:



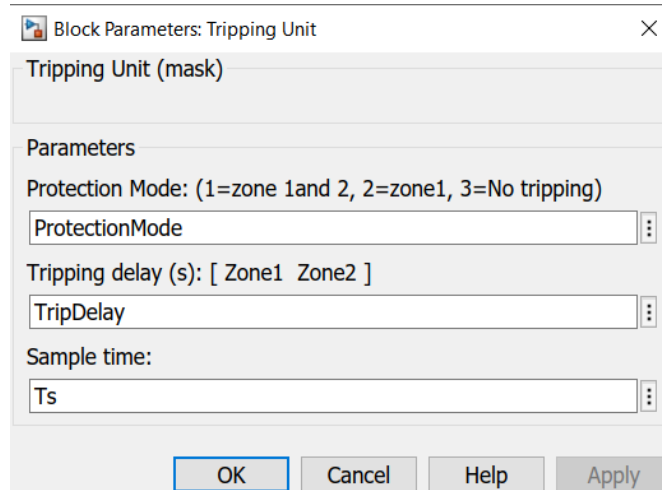
Εικόνα 4.180: Καρτέλα Initialization του “Tripping Unit” block τύπου Mask.

Η τελευταία μεταβλητή που θα ορίσουμε είναι η “Sample time” με όνομα, τιμή και περιγραφή.



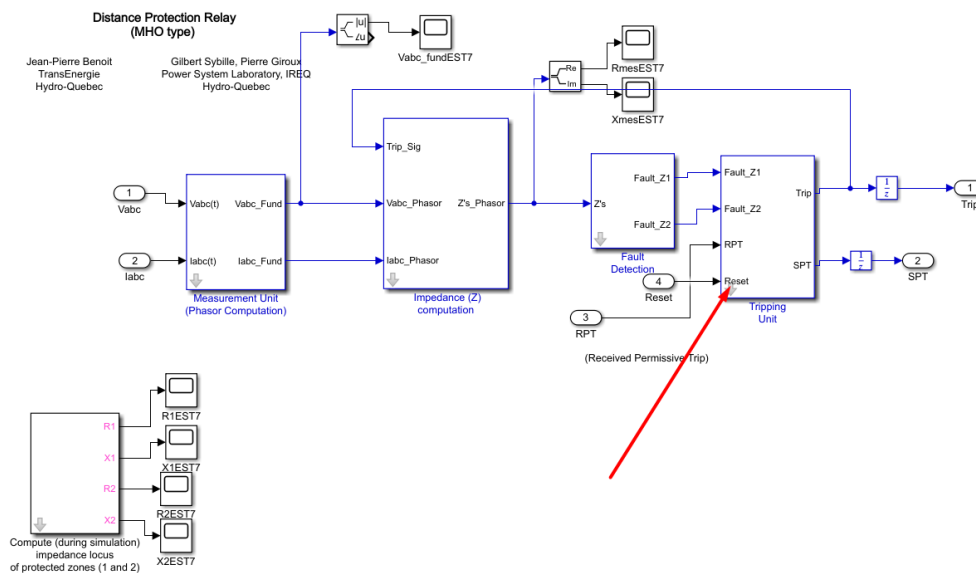
Εικόνα 4.181: Όνομα, τιμή και περιγραφή της παραμέτρου “Sample time” της καρτέλας Parameters & Dialog του “Tripping Unit” block τύπου Mask.

Ο χρήστης με διπλό κλικ πάνω στο μπλοκ επιλέγει τον συνδυασμό των ζωνών προστασίας που θα εφαρμοστούν, την χρονική καθυστέρηση λειτουργίας των ηλεκτρονόμων και τον χρόνο δειγματοληψίας που θα εφαρμοστεί κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης στο εν λόγω block.



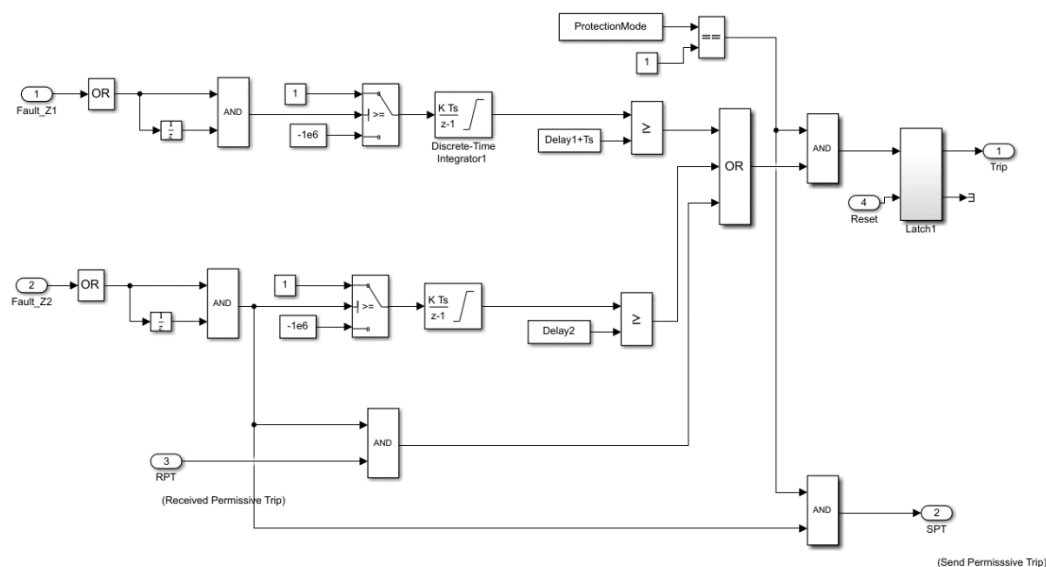
Εικόνα 4.182: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “ Tripping Unit ” block.

Ενώ με επιλογή στο βέλος “Look inside mask” εισέρχεται στο εσωτερικό υποσύστημα.



Εικόνα 4.183: Πεδίο “Look inside mask” του “Tripping Unit” block.

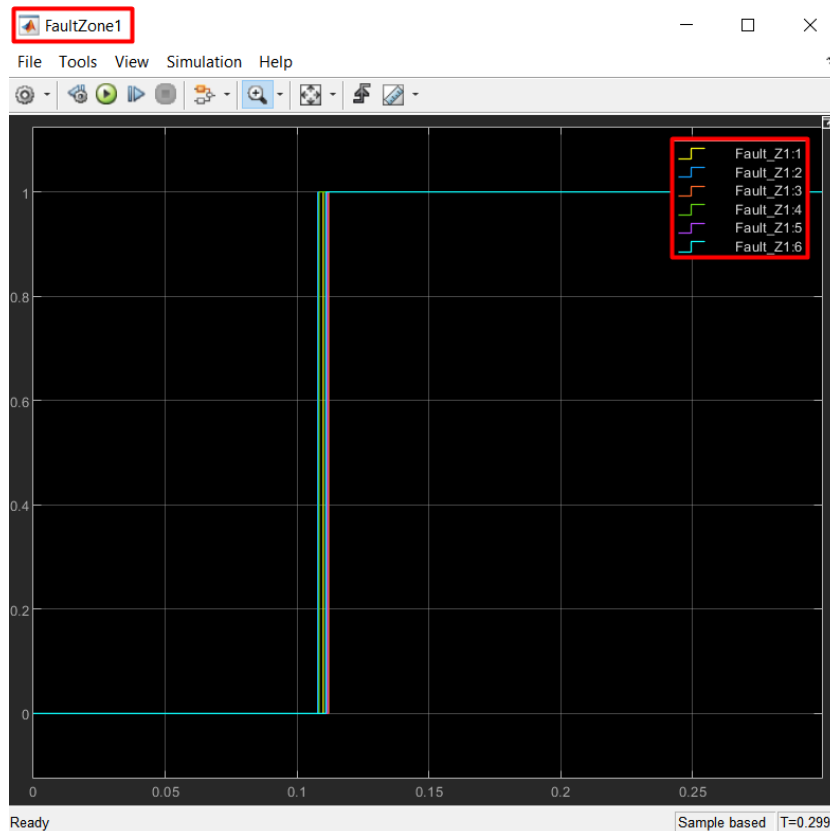
Το εσωτερικό υποσύστημα του block “Fault Detection“ πρέπει να έχει την παρακάτω μορφή:



Εικόνα 4.184: Εσωτερικό υποσύστημα του “ Tripping Unit” block.

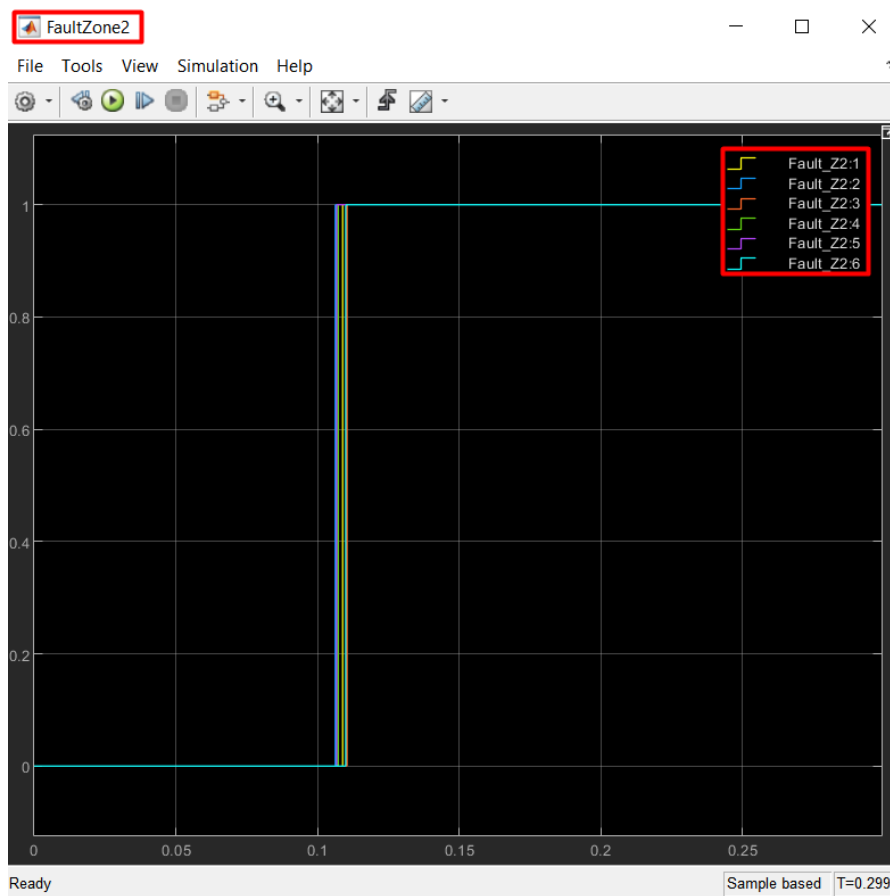
Τρόπος Λειτουργίας Υποσυστήματος:

Τα “Inport” blocks “Fault_Z1” (Ζώνη 1) και “Fault_Z2” (Ζώνη 2) περιέχουν το κάθε ένα έξι σήματα πληροφορίας τα οποία θα είναι μοναδιαίοι παλμοί έναυσης αν οι σύνθετες αντιστάσεις που είχαν υπολογιστεί σε προηγούμενο στάδιο έπεφταν εντός της ζώνης 1 ή της ζώνης 2 αντίστοιχα. Τα “Inport” blocks εισάγονται από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Inport”. Με διπλό κλικ ορίζουμε το “Port Number” που τους αρμόζει. Για την ζώνη 1:



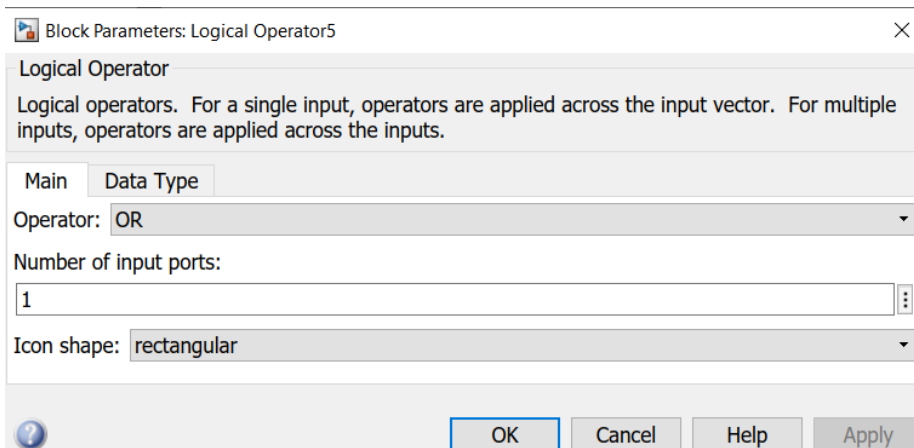
Εικόνα 4.185: Γραφική απεικόνιση των μοναδιαίων παλμών έναυσης της ζώνης προστασίας 1 που εισάγει το “Inport” block “Fault_Z1”.

Για την ζώνη 2:



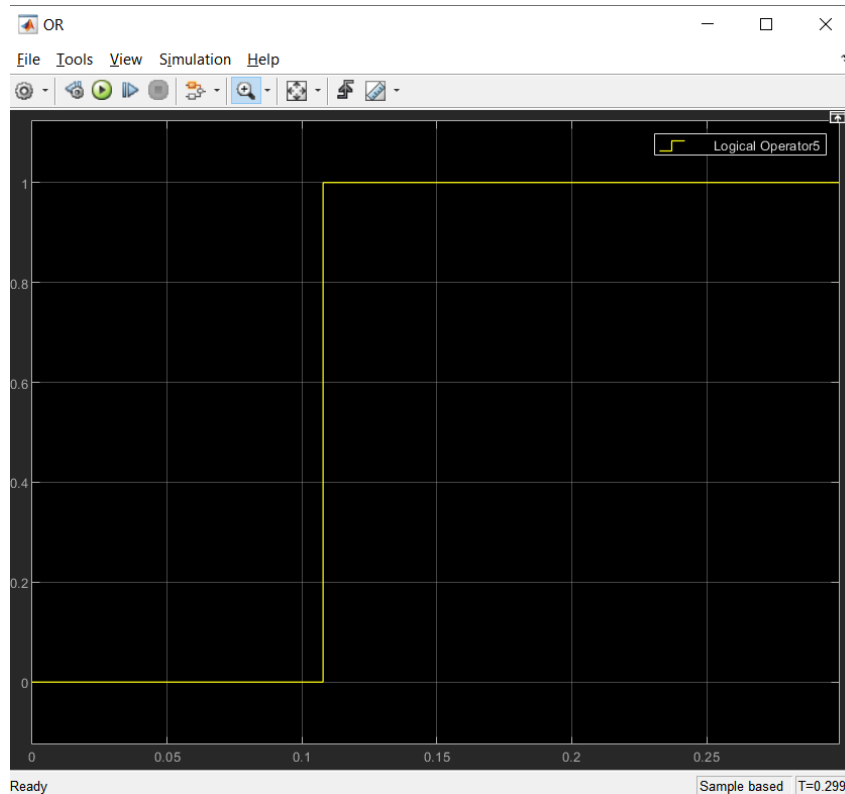
Εικόνα 4.186: Γραφική απεικόνιση των μοναδιαίων παλμών έναυσης της ζώνης προστασίας 2 που εισάγει το “Inport” block “Fault_Z2”.

Από αυτούς τους παλμούς χρειαζόμαστε μόνο τον πρώτο χρονικά που γίνεται μοναδιαίος. Από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Logical Operator” εισάγουμε ένα block λογικού τελεστή. Με διπλό κλικ πάνω του επιλέγουμε στα πεδία “Operator” και “Number of input ports” τους όρους “OR” και “1” αντίστοιχα.



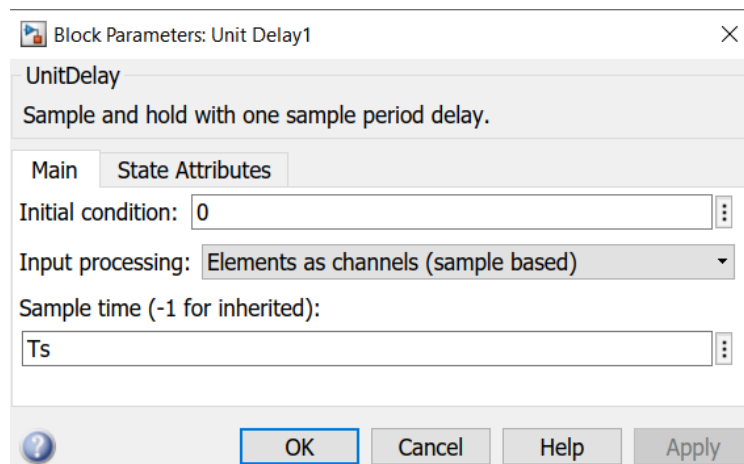
Εικόνα 4.187: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Logical Operator” block τύπου “OR” εντός του “Tripping Unit” block.

Με αυτόν τον τρόπο έχουμε εισάγει μια πύλη “OR” μιας εισόδου που δέχεται μια μεταβλητή διάνυσμα (έξι όρων) και εξάγει μοναδιαίο παλμό όταν κάποιος από τους όρους του διανύσματος γίνεται πρώτος μοναδιαίος.



Εικόνα 4.188: Γραφική απεικόνιση της εξόδου του πρώτου “Logical Operator” block τύπου “OR”.

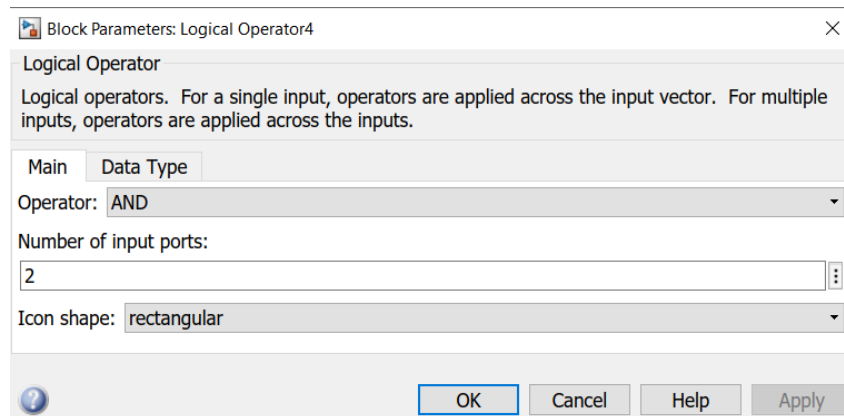
Για λόγους διασφάλισης της πληροφoρίας θα εισαχθεί μια χρονική καθυστέρηση ίσης με τον χρόνο δειγματοληψίας της προσομοίωσης “Ts” μέσω ενός “Unit Delay” block που εισάγεται από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Discrete και επιλογή “Unit Delay”. Με διπλό κλικ στο block εισάγουμε τον χρόνο δειγματοληψίας.



Εικόνα 4.189: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “UnitDelay” block εντός του “Tripping Unit” block.

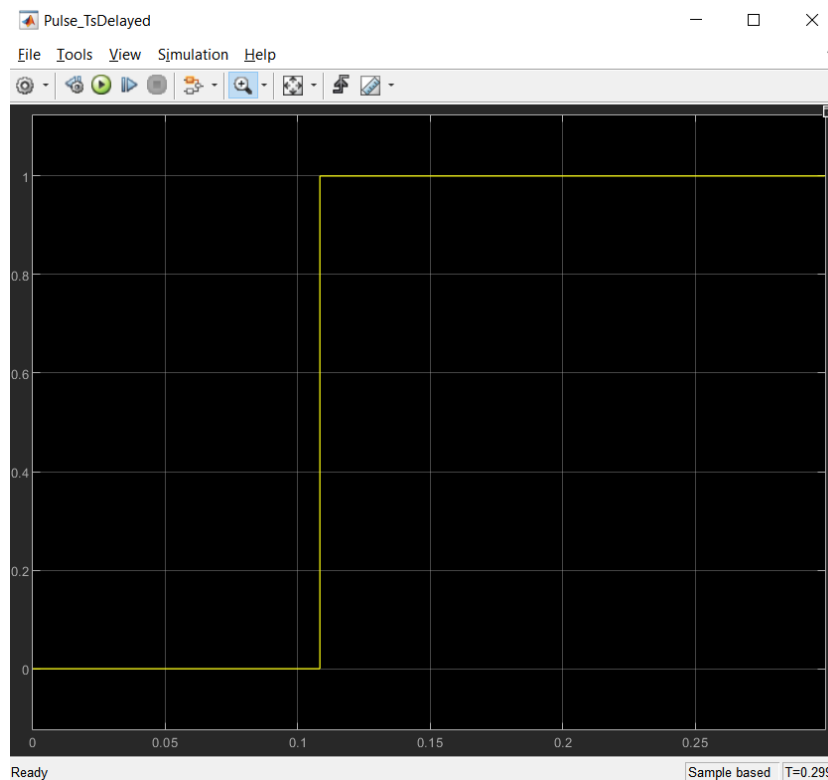
Την έξοδο του “Unit Delay” και την έξοδο του “OR” block τις εισάγουμε σε ένα “AND” block δυο εισόδων ώστε να αντιγράψουμε τον αρχικό παλμό εισάγοντας την καθυστέρηση χρόνου “Ts”. Το “AND” block εισάγεται από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και

επιλογή “Logical Operator”. Με διπλό κλικ πάνω του επιλέγουμε στα πεδία “Operator” και “Number of input ports” τους όρους “AND” και “2” αντίστοιχα.



Εικόνα 4.190: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Logical Operator” block τύπου “AND” εντός του “Tripping Unit” block.

Στην έξοδο του “AND” block λαμβάνουμε:

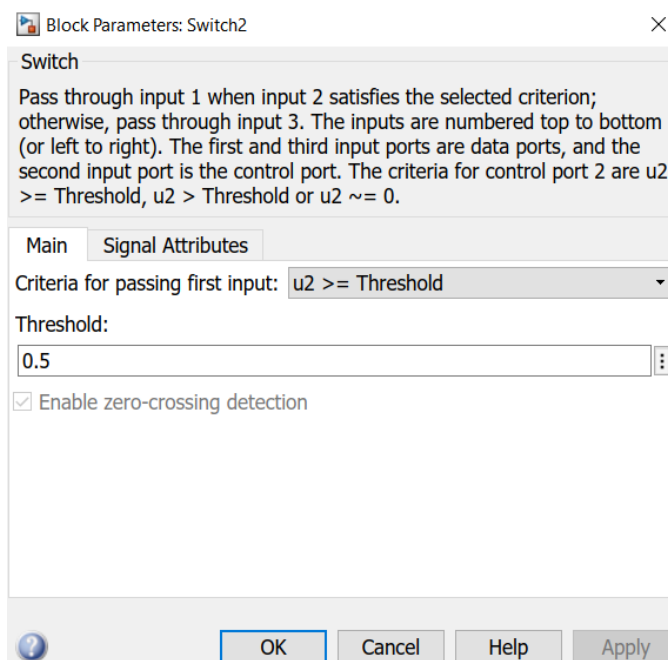


Εικόνα 4.191: Γραφική απεικόνιση της εξόδου του πρώτου “Logical Operator” block τύπου “AND”.

Θέλουμε στην συνέχεια να εισάγουμε χρονικές καθυστερήσεις που επιλέγει ο χρήστης με γνώμονα τον χρόνο “αντίδρασης” των ηλεκτρονόμων στον φυσικό κόσμο. Η υλοποίηση θα γίνει με έναν συγκριτή “>=” δυο εισόδων ,μια είσοδο για το σήμα πληροφορίας και μια για την επιθυμητή καθυστέρηση ως εισαγόμενη “Constant” μεταβλητή. Θέλουμε να προκύπτει μοναδιαίος παλμός στην έξοδο την χρονική στιγμή που το σήμα πληροφορίας γίνει μεγαλύτερο ή ίσο από την σταθερά χρονικής καθυστέρησης.

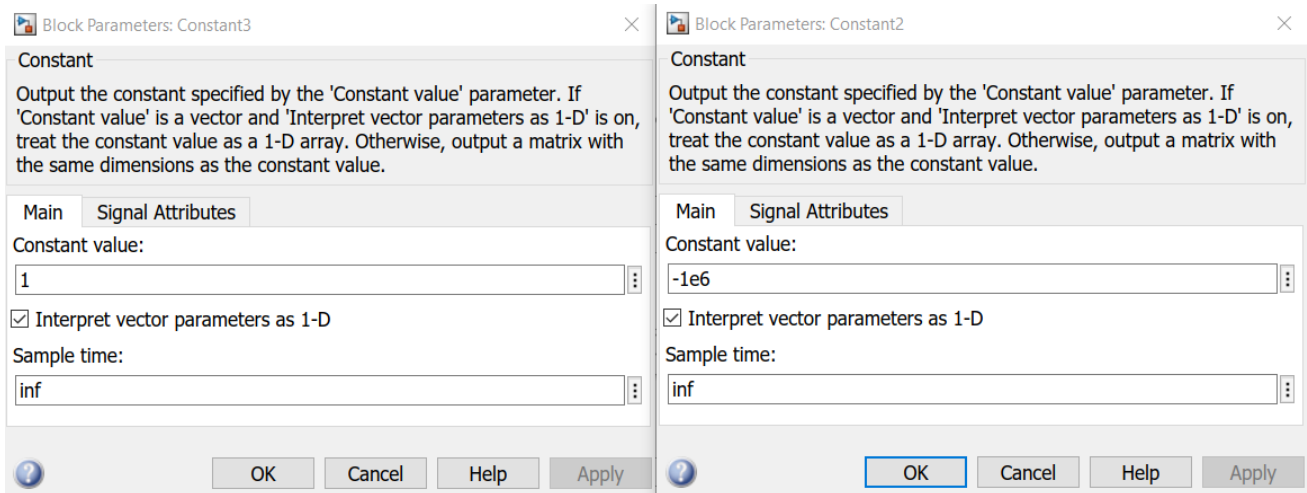
Η μορφή της συνάρτησης παλμού όμως δυσχεραίνει την σύγκριση αυτή. Ευνοϊκότερη συνάρτηση για σύγκριση με σταθερό αριθμό είναι η συνάρτηση-ράμπα. Μπορούμε να δημιουργήσουμε συνάρτηση ράμπας αν ολοκληρώσουμε σε διακριτό χρόνο τον παλμό έναυσης με μηδενικές αρχικές συνθήκες. Στην θετική ακμή του παλμού εισόδου η συνάρτηση ράμπας θα αρχίζει την ανοδική πορεία με μοναδιαία κλίση.

Προκύπτει ένα ακόμα πρόβλημα, στο block-ολοκληρωτή διακριτού χρόνου, η τιμή μηδέν δεν αναγνωρίζεται. Ο αρχικός παλμός μηδενικής και μοναδιαίας στάθμης θα πρέπει να μετατραπεί σε παλμό αρνητικής και μοναδιαίας στάθμης ώστε για το χρόνο που ο παλμός είναι αρνητικός, η συνάρτηση ράμπας να εξάγει μηδενικό σήμα, ενώ για τον χρόνο που ο παλμός είναι θετικός, η συνάρτηση ράμπας να ακολουθεί την προδιαγεγραμμένη πορεία της. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός “Switch” block που εισάγεται από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Switch”. Με διπλό κλικ πάνω του ορίζουμε Threshold “0.5”.



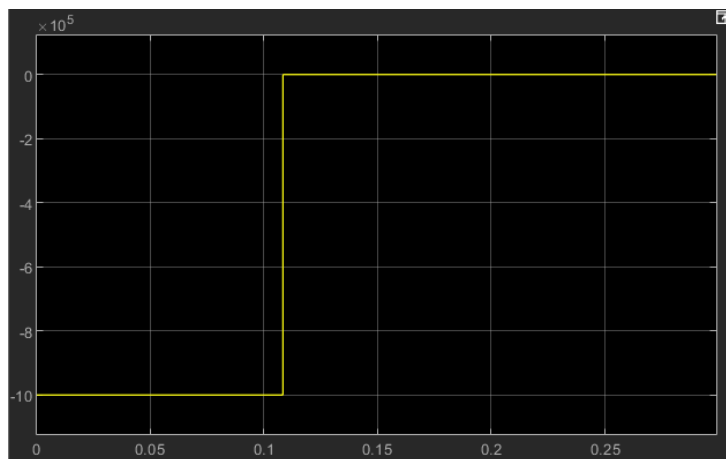
Εικόνα 4.192: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Switch” block εντός του “ Tripping Unit” block.

Στην μεσαία θύρα εισάγουμε τον παλμό της εξόδου της πύλης “AND” ενώ στην πρώτη και τρίτη θύρα εισάγουμε “Constant” blocks από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Constant”. Με διπλό κλικ πάνω τους εισάγουμε τις τιμές “1” και “-1e6” αντίστοιχα:



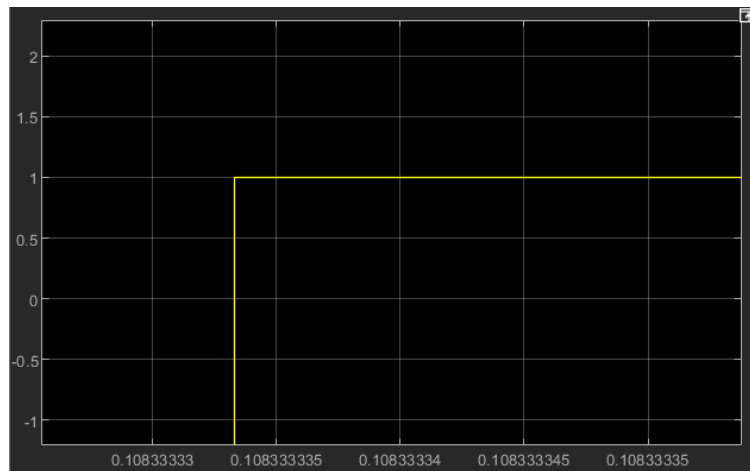
Εικόνα 4.193: Παράθυρα ορισμού παραμέτρων των “Constant” blocks “1” και “-1e6” εντός του “Tripping Unit” block.

Για το χρονικό διάστημα που ο παλμός της μεσαίας θύρας είναι μηδέν, δηλαδή μικρότερος του Threshold “0.5”, θα περνάει στην έξοδο του “Switch” block η κάτω θύρα, δηλαδή μια αρνητική σταθερά (-10^6). Για το χρονικό διάστημα που ο παλμός της μεσαίας θύρας είναι μονάδα, δηλαδή μεγαλύτερος του Threshold “0.5”, θα περνάει στην έξοδο του “Switch” block η πάνω θύρα, δηλαδή η μονάδα. Μόλις μετατρέψαμε τον παλμό μηδενικής και μοναδιαίας στάθμης σε παλμό αρνητικής και μοναδιαίας στάθμης:



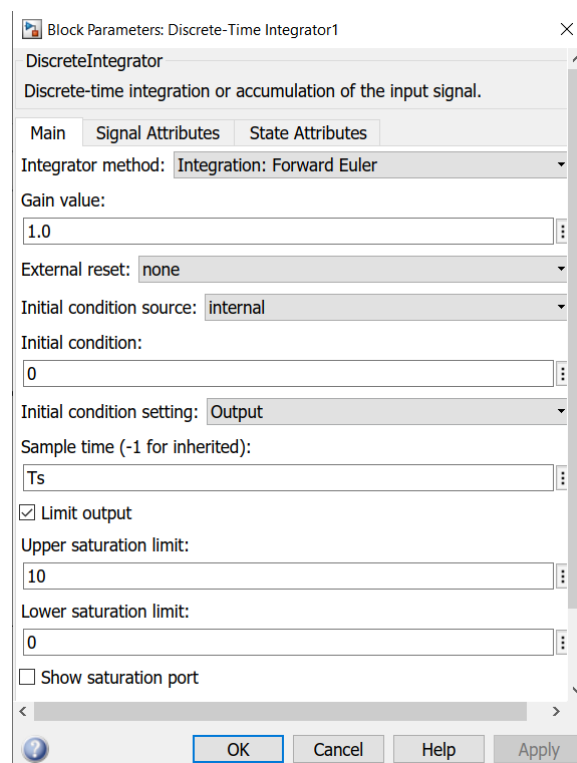
Εικόνα 4.194: Γραφική απεικόνιση της εξόδου του “Switch” block.

Με κατάλληλη μεγέθυνση φαίνεται και το μοναδιαίο πλάτος:



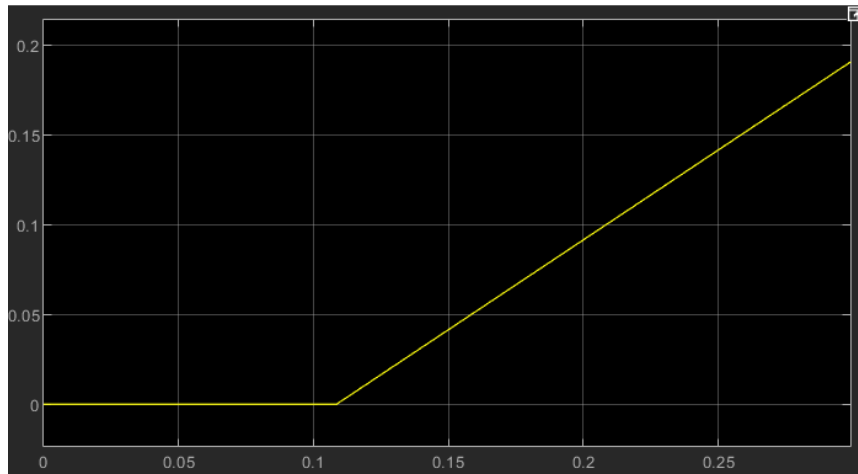
Εικόνα 4.195: Γραφική απεικόνιση της εξόδου του “Switch” block υπό μεγέθυνση.

Αυτή η πληροφορία θα εισαχθεί στο block-ολοκληρωτή διακριτού χρόνου ώστε να μετατραπεί σε συνάρτηση ράμπας. Από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Discrete-Time Integrator” εμφανίζουμε τον ολοκληρωτή. Με διπλό κλικ πάνω του επιλέγουμε μοναδιαίο κέρδος, μηδενικές αρχικές συνθήκες, χρόνο δειγματοληψίας “Ts” και τα άνω και κάτω όρια κορεσμού ενδεικτικά 10 και 0 αντίστοιχα:



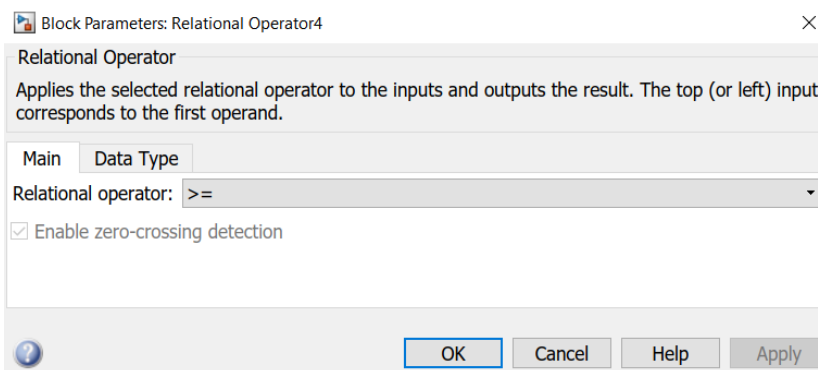
Εικόνα 4.196: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “DiscreteIntegrator” block εντός του “Tripping Unit” block.

Στην έξοδο του διακριτού ολοκληρωτή λαμβάνουμε την συνάρτηση ράμπας:



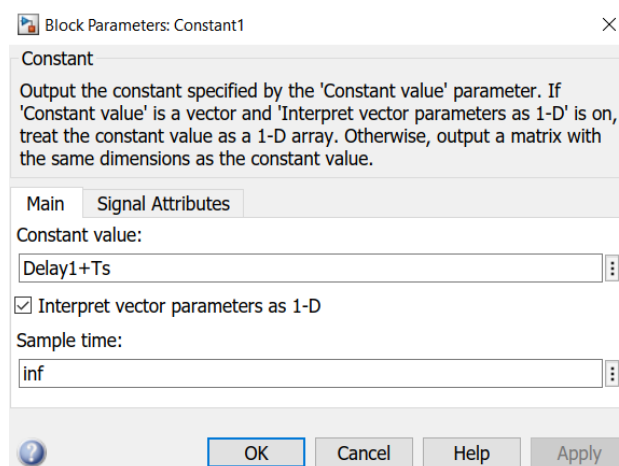
Εικόνα 4.197: Γραφική απεικόνιση της εξόδου του “DiscreteIntegrator” block.

Πλέον μπορούμε να συγκρίνουμε με την σταθερά χρονικής καθυστέρησης μέσω ενός block-συγκριτή που εξάγει μοναδιαίο παλμό όταν ικανοποιούνται οι ορισμένες συνθήκες εντός του. Από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Logical Operator” εισάγουμε ένα block λογικού τελεστή. Με διπλό κλικ πάνω του επιλέγουμε τον συγκριτή “>=”:



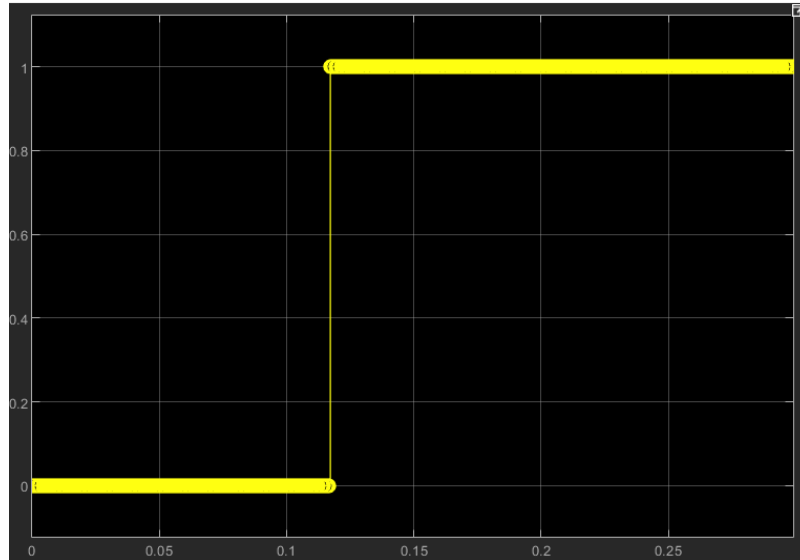
Εικόνα 4.198: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Relational Operator” block τύπου “>=” εντός του “Tripping Unit” block.

Στην πάνω θύρα εισόδου του, συνδέουμε την έξοδο του διακριτού ολοκληρωτή. Στην κάτω θύρα εισόδου του, συνδέουμε την χρονική καθυστέρηση ως “Constant” block από την πορεία Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Constant”. Με διπλό κλικ στο block εισάγουμε την επιθυμητή τιμή:



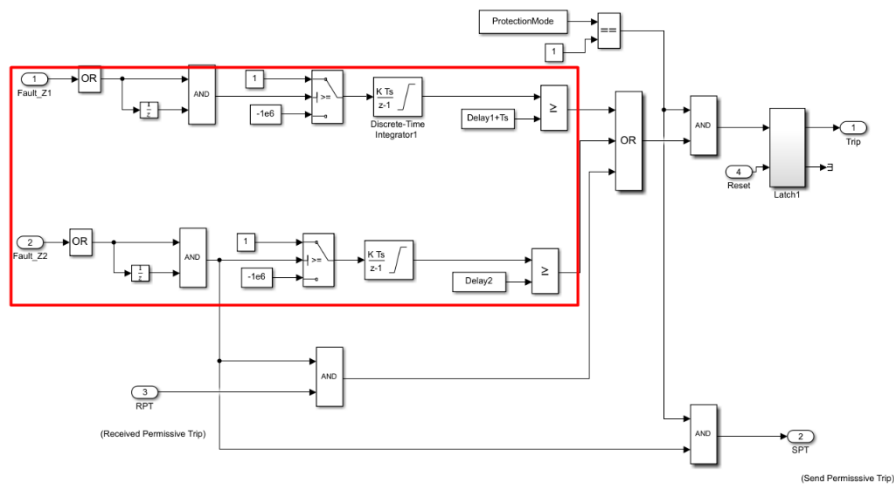
Εικόνα 4.199: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Constant” block “Delay1=Ts” εντός του “Tripping Unit” block.

Στην έξοδο του λογικού τελεστή θα εξάγεται μοναδιαίος παλμός με θετικό μέτωπο καθυστερημένο κατά “Delay1+Ts” για την ζώνη 1 ως προς τον αρχικό παλμό.



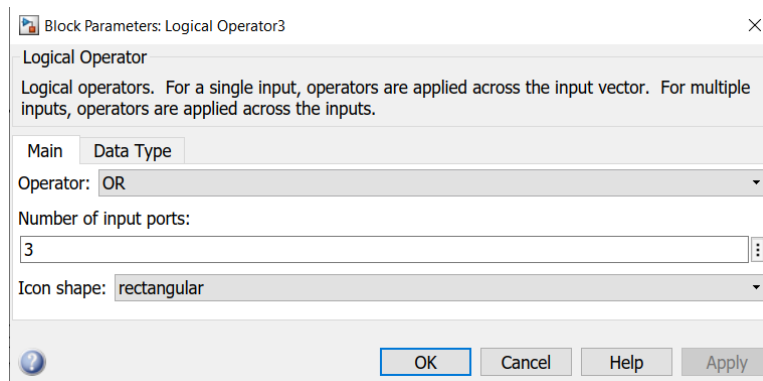
Εικόνα 4.200: Γραφική απεικόνιση της εξόδου του “Relational Operator” block τύπου “>=”.

Η δημιουργία παλμών μέχρι τώρα για την ζώνη 1 και την ζώνη 2 απαιτεί την ίδια ακριβώς υλοποίηση με μόνη διαφορά την χρονική καθυστέρηση ανοίγματος των διακοπών:



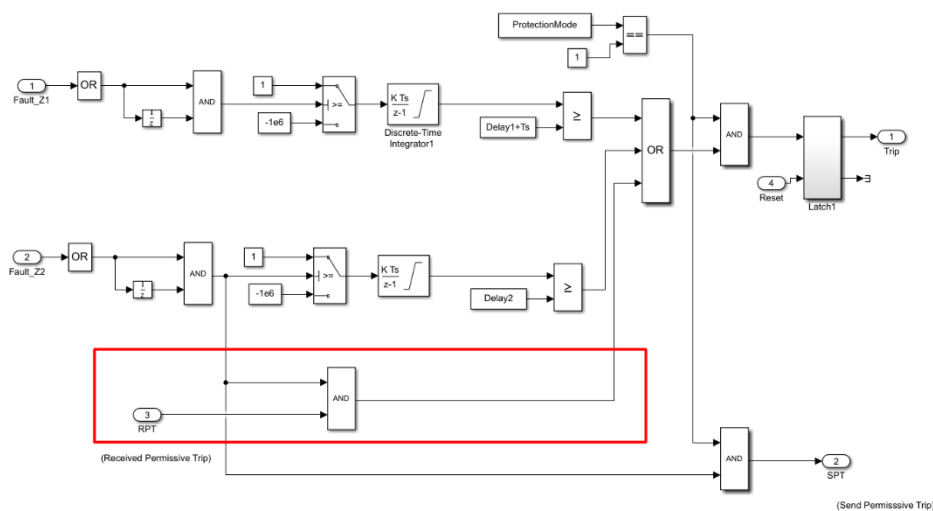
Εικόνα 4.201: Τμήμα του υποσυστήματος “Tripping Unit” που απαιτεί την ίδια υλοποίηση στα δυο του σκέλη.

Οι διαμορφωμένοι παλμοί θα περαστούν σε μια πύλη “OR” αφού πρώτα αυτή εισαχθεί από την πορεία Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Logical Operator”. Με διπλό κλικ πάνω στο block επιλέγουμε στα πεδία “Operator” και “Number of input ports” τους όρους “OR” και “3” αντίστοιχα.



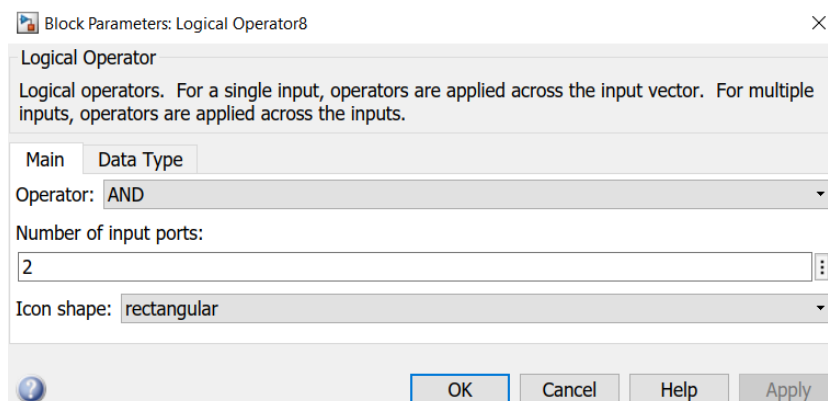
Εικόνα 4.202: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του δεύτερου “Logical Operator” block τύπου “OR” εντός του “Tripping Unit” block.

Στη τρίτη είσοδο της πύλης OR θα εισαχθεί το λογικό “AND” του παλμού της ζώνης 2, χωρίς την επιβαλλόμενη από τον χρήστη καθυστέρηση, και του “Inport” block RPT (Received Permissive Trip).



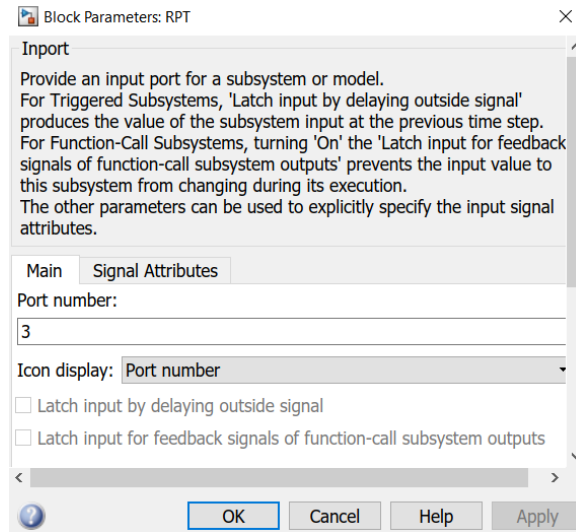
Εικόνα 4.203: Η τρίτη είσοδος του “Logical Operator” block τύπου “OR” εντός του “Tripping Unit” block.

Η πύλη AND εισέρχεται από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Logical Operator”. Με διπλό κλικ πάνω του επιλέγουμε στα πεδία “Operator” και “Number of input ports” τους όρους “AND” και “2” αντίστοιχα.



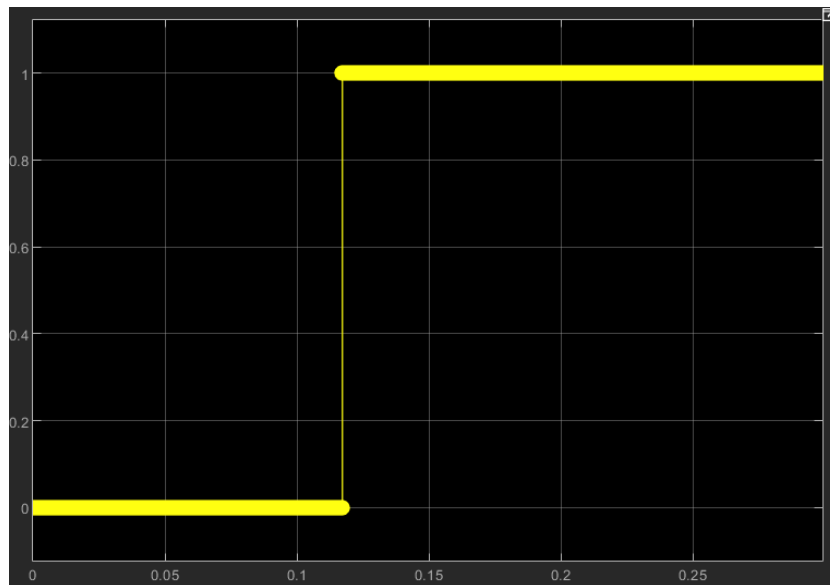
Εικόνα 4.204: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του δεύτερου “Logical Operator” block τύπου “AND” εντός του “Tripping Unit” block.

Το “Inport” block εισάγεται από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Inport”. Με διπλό κλικ πάνω του ορίζουμε το “Port input” που αναλογεί στην μεταβλητή “RPT”.



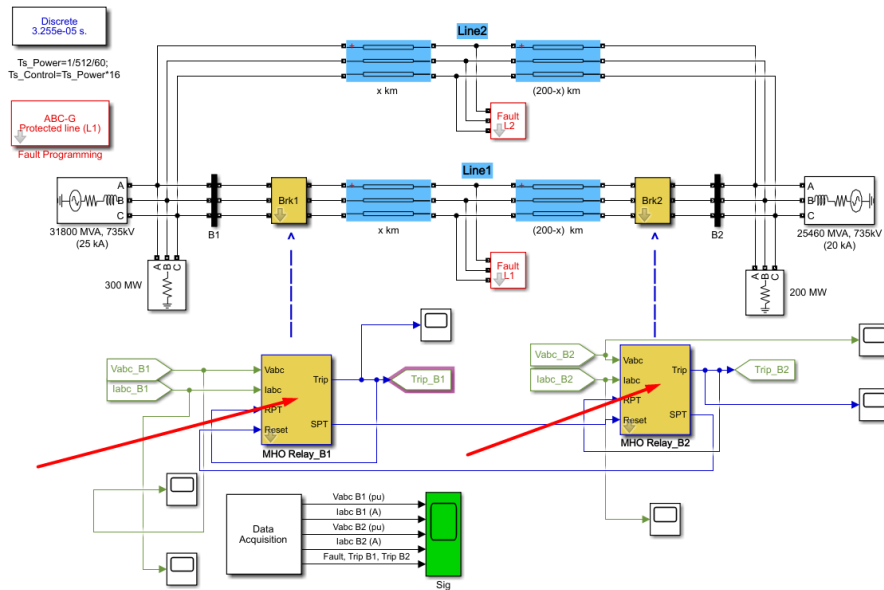
Εικόνα 4.205: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του τρίτου “Inport” block εντός του “ Tripping Unit” block.

Αν μια από τις τρεις εισόδους της πύλης OR περιέχει μοναδιαίο παλμό, τότε αυτός ο παλμός θα αντιγραφεί στην έξοδο. Αν σε παραπάνω από μια εισόδους της πύλης OR καταφθάνουν μοναδιαίοι παλμοί με θετικά μέτωπα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, η πύλη OR θα εξάγει το σήμα παλμού με το θετικό μέτωπο που προηγείται χρονικά. Εν προκειμένω:

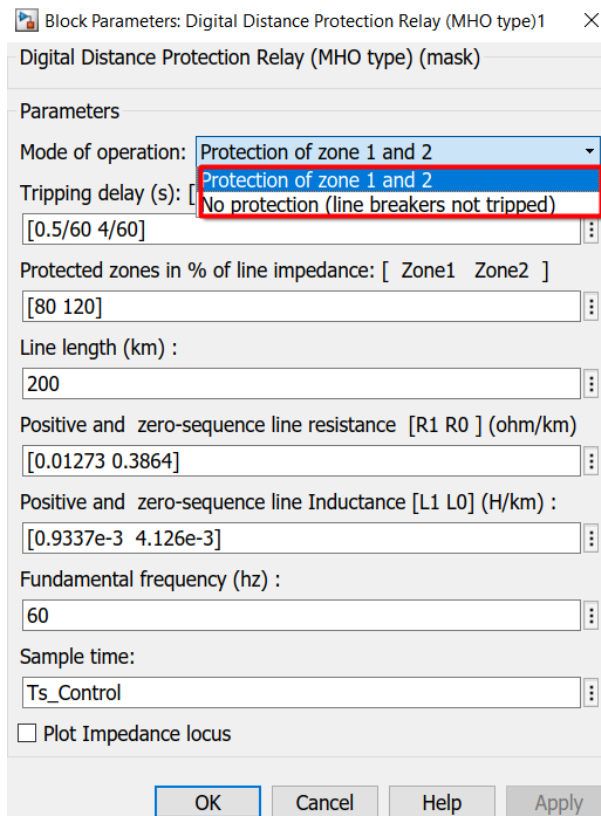


Εικόνα 4.206: Γραφική απεικόνιση της εξόδου του “Logical Operator” block τύπου “OR” τριών εισόδων.

Θέλουμε να εισάγουμε ακόμα έναν περιορισμό. Το εκτελέσιμο αρχείο δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει αν θέλει προστατευτικές ζώνες στην προσομοίωση του με διπλό κλικ πάνω στα block “MHO Relay_B1” και “MHO Relay_B2” και ρύθμιση του πεδίου “Mode of operation”:



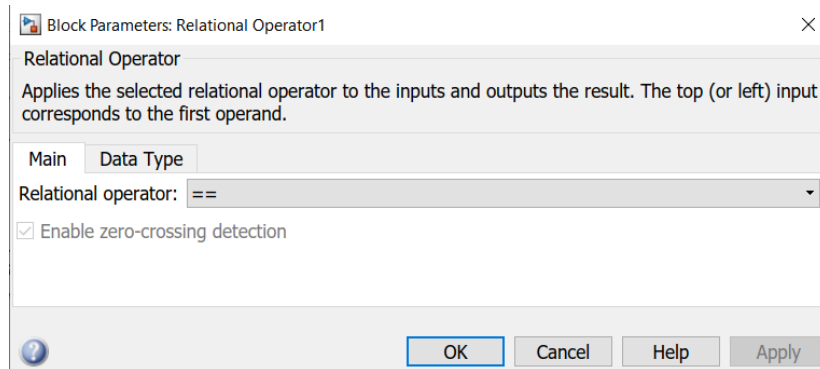
Εικόνα 4.207: “MHO Relay_B1” και “MHO Relay_B2” blocks.



Εικόνα 4.208: Πεδίο “Mode of operation” του παράθυρου ορισμού παραμέτρων του “Digital Distance Protection Relay (MHO type)” block.

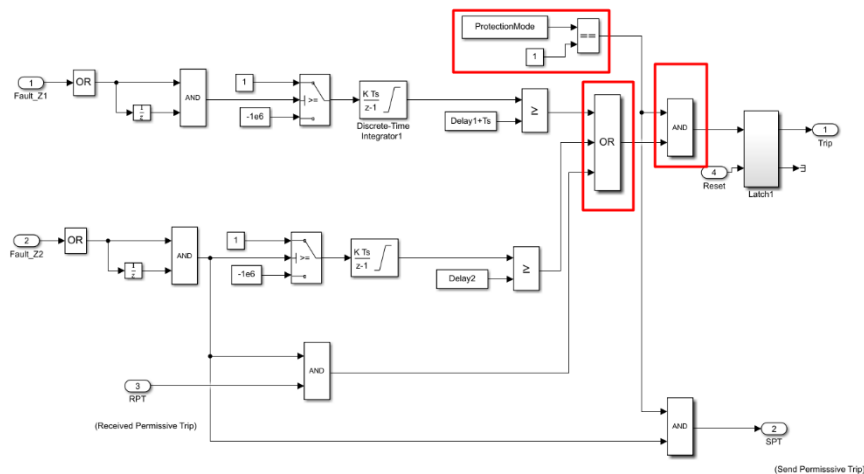
Το “Mode of operation” αντιστοιχίζεται στην μεταβλητή “ProtectionMode” την οποία εισάγουμε με διπλό κλικ σε ένα “Constant” block (εισαγωγή “Constant” block από Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Constant”). Αν ProtectionMode=1, τότε οι ζώνες 1 και 2 είναι ενεργοποιημένες. Αν ProtectionMode=0, τότε δεν υπάρχουν ζώνες προστασίας και δεν θα ανοίξουν οι ηλεκτρονόμοι σε καμία περίπτωση. Θα τοποθετήσουμε έναν συγκριτή ισότητας, που θα ελέγχει αν η μεταβλητή “ProtectionMode” είναι ίση με την μονάδα, από την διαδρομή Library Browser /

Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Relational Operator”. Με διπλό κλικ πάνω του επιλέγουμε στο πεδίο “Relational Operator” τον όρο “==”.



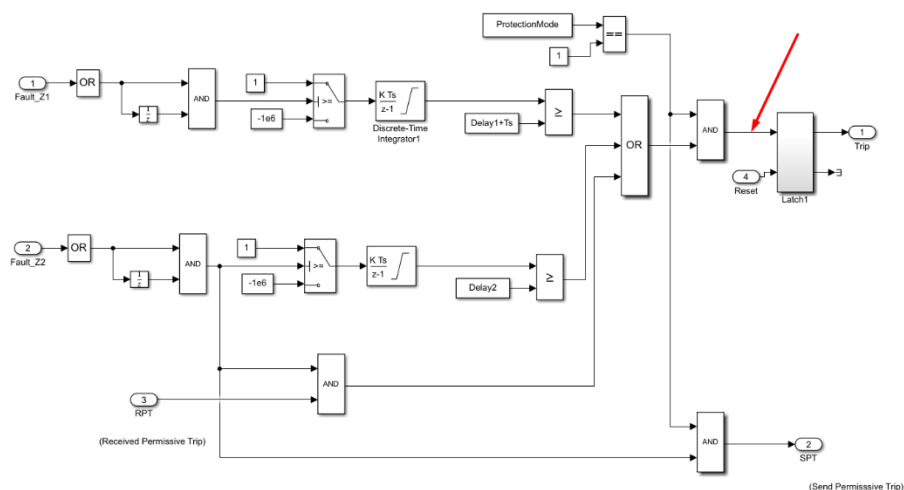
Εικόνα 4.209: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Relational Operator” block τύπου “==” εντός του “Tripping Unit” block.

Η έξοδος του λογικού τελεστή ισότητας και η έξοδος της πύλης “OR” θα εισέλθουν σε μια πύλη “AND” δυο εισόδων.



Εικόνα 4.210: Συνδεσμολογία των δυο εισόδων του “Relational Operator” block τύπου “AND”, που εισέρχεται στο “Latch1” block, εντός του “Tripping Unit” block.

Με αυτόν τον τρόπο ο μοναδιαίος παλμός στην έξοδο της πύλης “OR” αντιγράφεται στην έξοδο της πύλης “AND” υπό την προϋπόθεση ότι η μεταβλητή “ProtectionMode” είναι ίση με την μονάδα. Οι παραπάνω συνθήκες είναι αρκετές ώστε να διαμορφώσουν το σωστό σήμα που θα σταλθεί στους διακόπτες των ηλεκτρονόμων στην περίπτωση που ανιχνευτεί κάποιο σφάλμα.



Εικόνα 4.211: Σημείο δημιουργίας τελικού μοναδιαίου παλμού έναυσης που θα σταλθεί στους διακόπτες των ηλεκτρονόμων σε περίπτωση ανίχνευσης του σφάλματος.

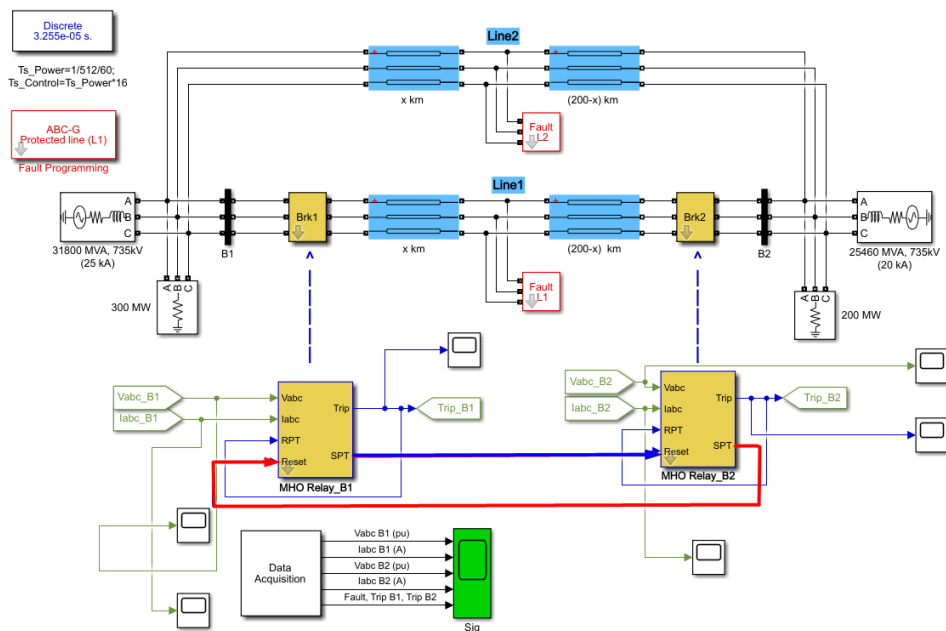
Επικοινωνία Ηλεκτρονόμων:

Οι ηλεκτρονόμοι που κατασκευάζουμε πρέπει να επικοινωνούν μεταξύ τους. Αν κάποιο σφάλμα ανιχνεύεται και από τους δύο ηλεκτρονόμους, δεν επιθυμούμε να ανοίξουν και οι δυο καθώς αυτό θα οδηγήσει σε περιττή απομόνωση μέρους του δικτύου. Θα ανοίξει μόνο ο πρώτος χρονικά που ανιχνεύει το σφάλμα.

Ο δεύτερος, θα λάβει από τον πρώτο έναν παλμό “reset”, που θα εξασφαλίζει ότι οι διακόπτες του θα παραμένουν κλειστοί μέχρι το τέλος της προσομοίωσης.

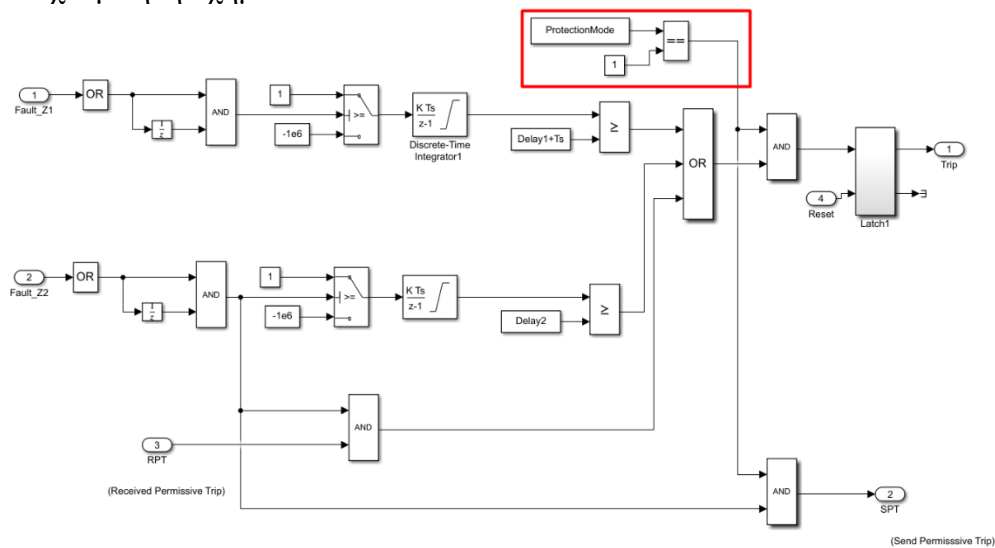
Υλοποίηση:

Για την υλοποίηση της παραπάνω ιδέας θα χρειαστεί να συνδέσουμε την έξοδο “SPT” (Send Permissive Trip) του ενός ηλεκτρονόμου με το “Reset” του άλλου και αντίστροφα:



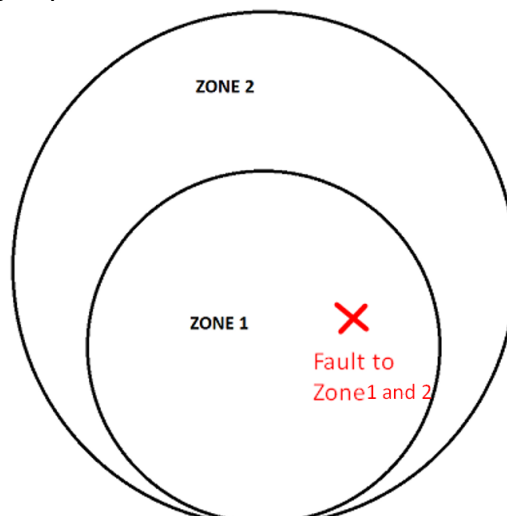
Εικόνα 4.212: Συνδεσμολογία των εισόδων “Reset” και των εξόδων “SPT” των “MHO Relay_B1” και “MHO Relay_B2” blocks.

Ο παλμός “SPT” στέλνεται από κάποιον ηλεκτρονόμο αφενός όταν έχει επιλεχθεί από τον χρήστη η εφαρμογή ζωνών προστασίας στην προσομοίωση (ProtectionMode=1) και αφετέρου όταν έχει ανιχνευτεί σφάλμα εντός οποιασδήποτε ζώνης. Η πρώτη συνθήκη εξασφαλίζεται από τον λογικό συγκριτή που έχουμε ήδη σχηματίσει.



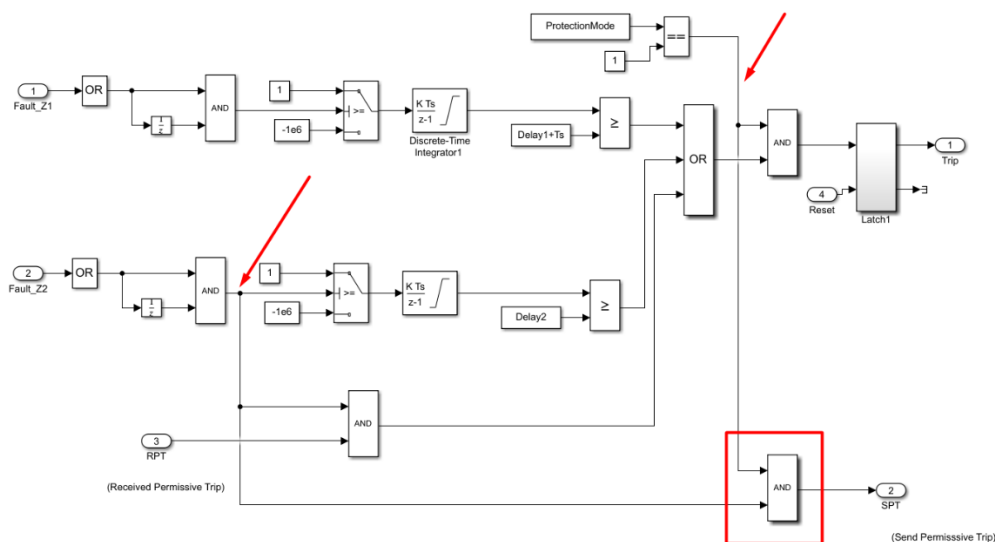
Εικόνα 4.213: Τμήμα του υποσυστήματος “Tripping Unit” που περιλαμβάνει δυο “Constant” blocks “ProtectionMode” και “1” αντίστοιχα και ένα “Relational Operator” block τύπου “==”.

Η δεύτερη συνθήκη εξασφαλίζεται από την ύπαρξη μοναδιαίου παλμού στην ζώνη 2 μιας και η ζώνη 2 περικλείει πλήρως και την ζώνη 1.



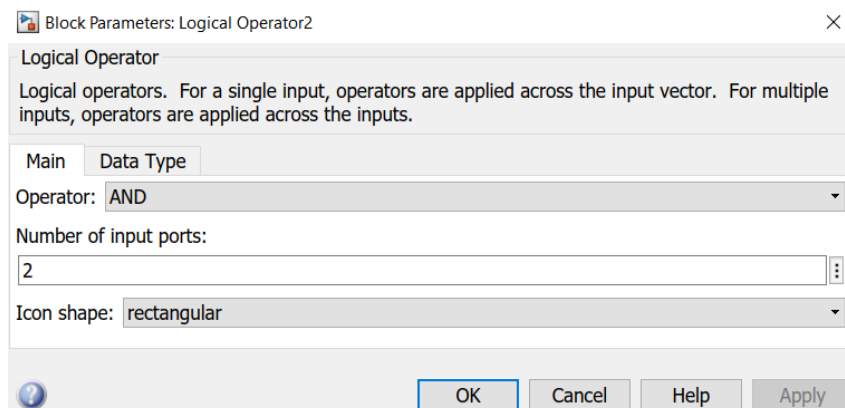
Εικόνα 4.214: Γραφική απεικόνιση των ζωνών προστασίας 1 και 2 των δυο ηλεκτρονόμων.

Επομένως θα συλλέξουμε τον παλμό έναυσης της ζώνης 2 χωρίς τις εισαγόμενες καθυστερήσεις λειτουργίας και το αποτέλεσμα του συγκριτή “==” και θα τα εισάγουμε σε ένα “AND” block που θα εξάγει μοναδιαίο παλμό μόνο όταν και τα δυο σήματα εισόδου του γίνουν μοναδιαία.



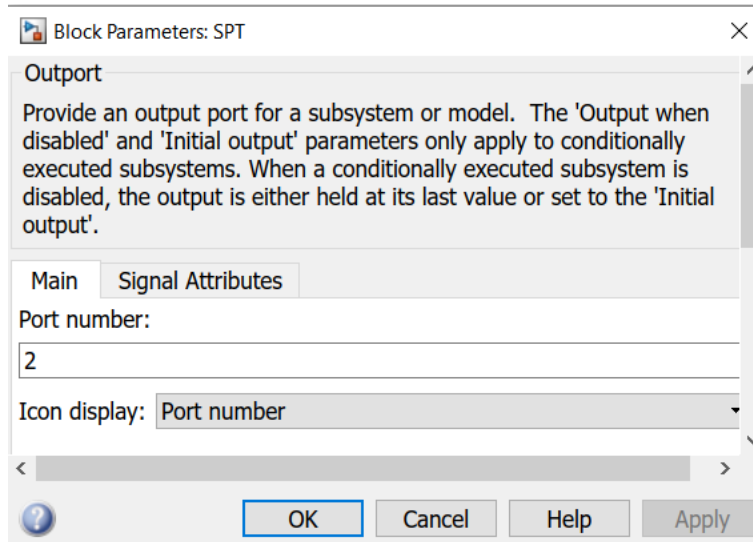
Εικόνα 4.215: Συνδεσμολογία των δυο εισόδων του “Relational Operator” block τύπου “AND”, που εξάγει τον παλμό “SPT”, εντός του “Tripping Unit” block.

Το “AND” block εισάγεται από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Logical Operator”. Με διπλό κλικ πάνω του επιλέγουμε στα πεδία “Operator” και “Number of input ports” τους όρους “AND” και “2” αντίστοιχα.



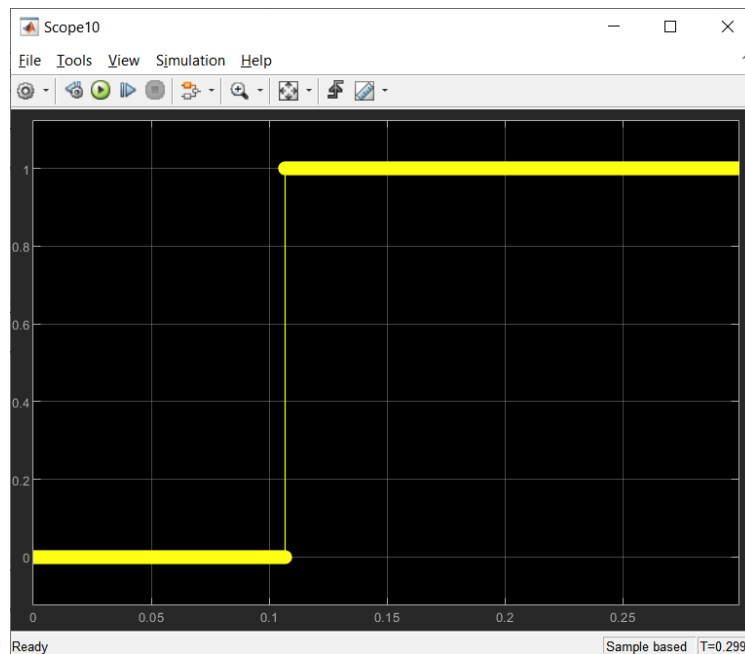
Εικόνα 4.216: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του τρίτου “Logical Operator” block τύπου “AND” εντός του “Tripping Unit” block.

Στην έξοδο του “AND” block συνδέουμε το σήμα “SPT” ως “Outport” block από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Outport”. Με διπλό κλικ πάνω του ορίζουμε το “Port number” που του αντιστοιχεί:



Εικόνα 4.217: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του δεύτερου “Outport” block εντός του “ Tripping Unit” block.

Το σήμα “SPT” περιέχει τον παλμό απενεργοποίησης του δεύτερου ηλεκτρονόμου (“Reset”) με θετικό μέτωπο την χρονική στιγμή που ανιχνεύεται για πρώτη φορά σφάλμα στον πρώτο ηλεκτρονόμο:

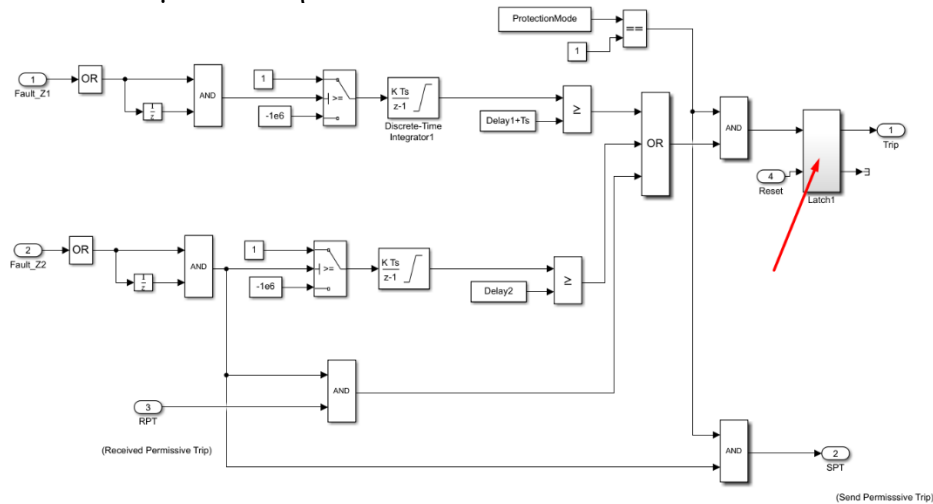


Εικόνα 4.218: Γραφική απεικόνιση του σήματος “SPT” που αντιστοιχεί στην δεύτερη έξοδο των “MHO Relay_B1” και “ MHO Relay_B2” blocks.

Προκειμένου οι ηλεκτρονόμοι να μπορούν να λαμβάνουν ταυτόχρονα σήματα έναυσης και σβέσης, ένα block “Μανδαλωτής SR” είναι το κατάλληλο. Ένας μανδαλωτής SR έχει δύο εισόδους “Set” και “Reset” και δύο εξόδους “Q” και “Q’”. Η έξοδος “Q’” είναι το συμπλήρωμα της εξόδου “Q”. Ο πίνακας αλήθειας του μανδαλωτή “SR” είναι ο παρακάτω:

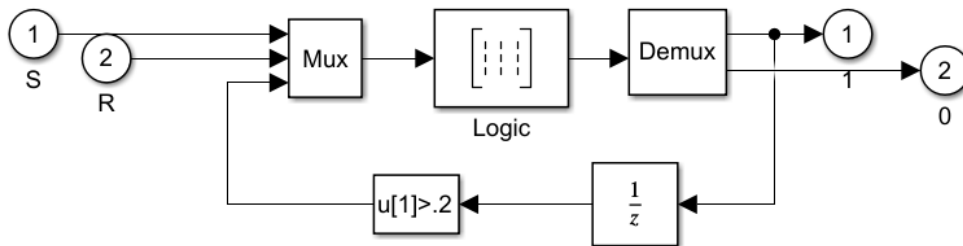
S	R	Q	Q’
0	0	HOLD	-
0	1	0 (RESET)	1
1	0	1 (SET)	0
1	1	FORBIDDEN	FORBIDDEN

Με διπλό κλικ στο block-μανδαλωτή “Latch1”:



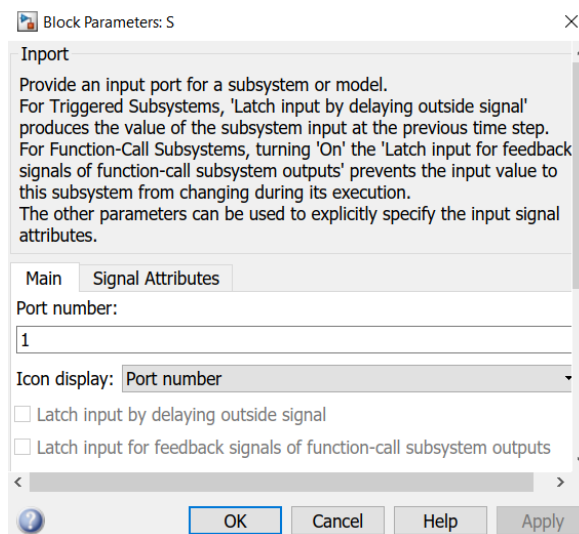
Εικόνα 4.219: “Latch1” block.

Εισερχόμαστε στο εσωτερικό υποσύστημα:



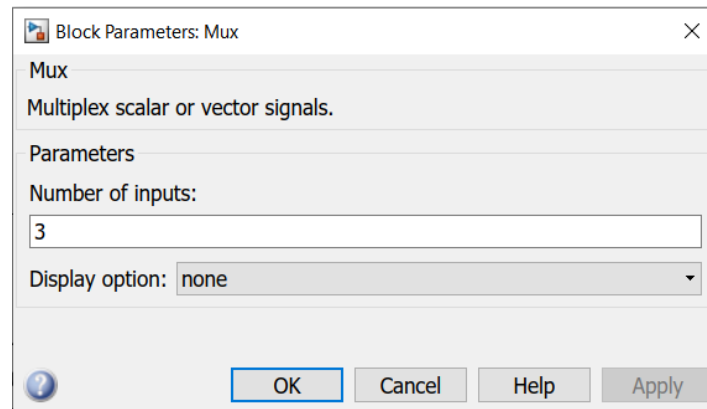
Εικόνα 4.220: Εσωτερικό υποσύστημα του “Latch1” block.

Η θύρα εισόδου “S” (Set) περιέχει το σήμα ανοίγματος των διακοπών που έχει διαμορφωθεί στα προηγούμενα βήματα του συστήματος “Tripping Unit” ενώ η θύρα εισόδου “R” (Reset) περιέχει το σήμα “SPT” που αποστέλλει ο δεύτερος ηλεκτρονόμος. Τα “Inport” blocks εισάγονται από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Inport”. Με διπλό κλικ πάνω του ορίζουμε το “Port number” που του αντιστοιχεί:



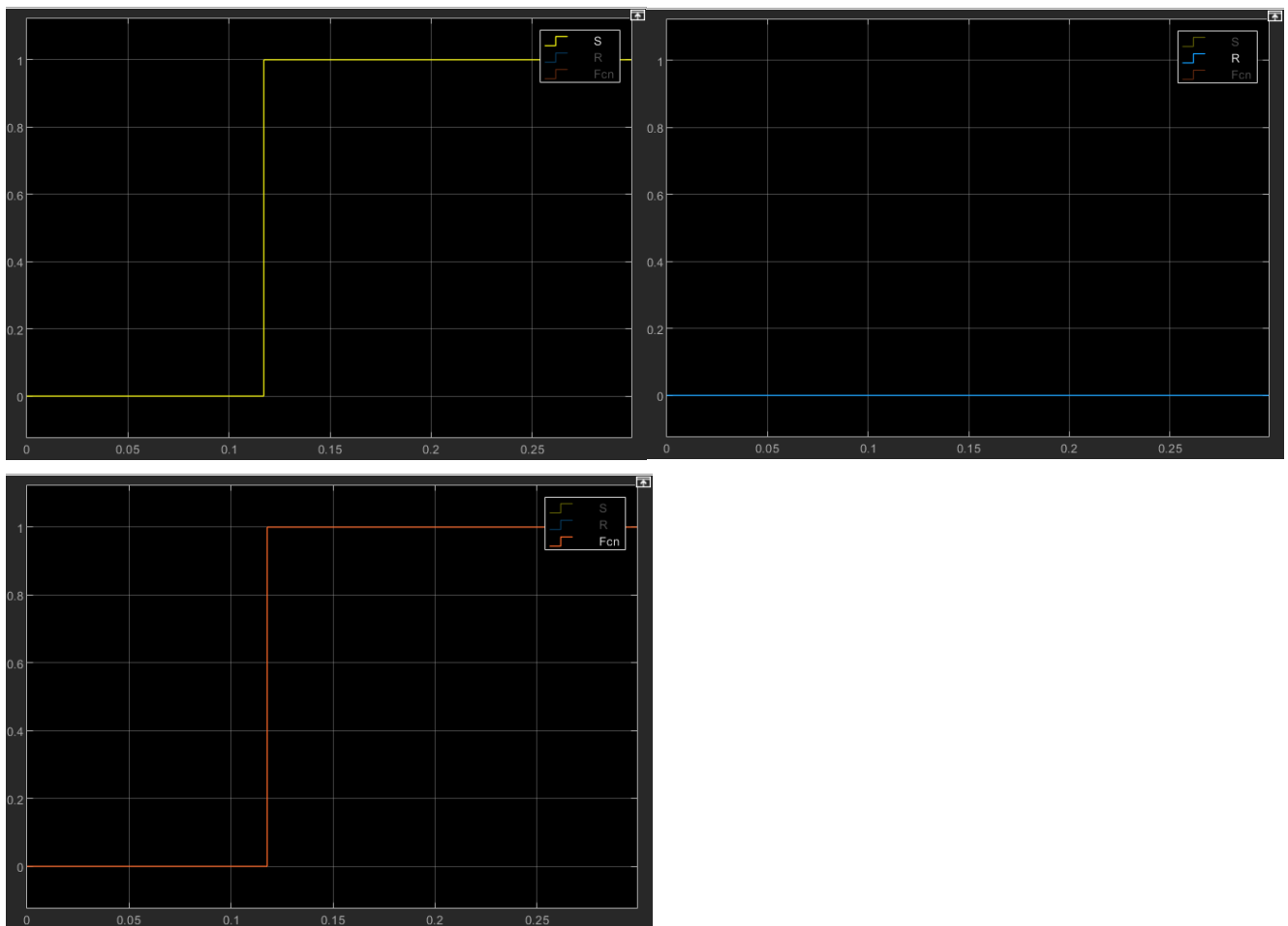
Εικόνα 4.221: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων των “Inport” blocks εντός του “Latch1” block.

Τα σήματα εισόδου “S” και “R” καθώς και ένα σήμα ανάδρασης που περιέχει την πληροφορία του “S” καθυστερημένη κατά ένα κύκλο προσομοίωσης “Ts” εισάγονται σε έναν πολυπλέκτη 3 σε 1 που ευρίσκεται από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Mux”. Με διπλό κλικ πάνω του ορίζουμε το επιθυμητό πλήθος των εισόδων:



Εικόνα 4.222: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Mux” block εντός του “Latch1” block.

Τα σήματα “S”, “R” και το σήμα ανάδρασης για τον ηλεκτρονόμο που ανοίγει πρώτος είναι αντίστοιχα τα παρακάτω:

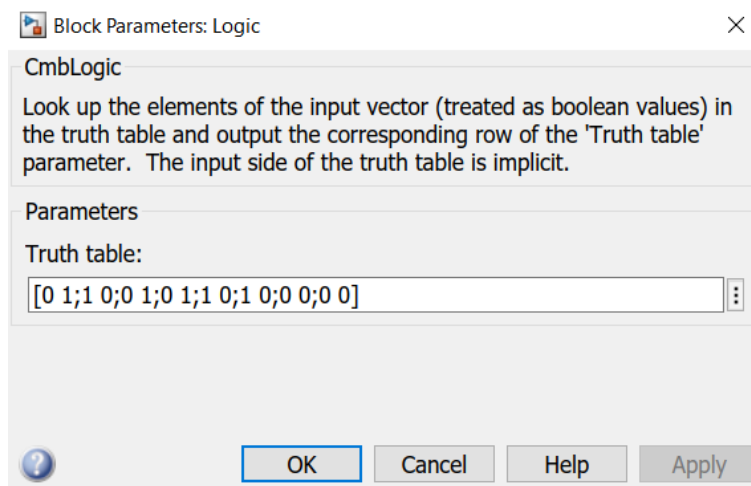


Εικόνα 4.223: Γραφική απεικόνιση των σημάτων “S”, “R” και του σήματος ανάδρασης του ηλεκτρονόμου που ανιχνεύει πρώτος το σφάλμα.

Για να δημιουργηθεί ο μανδαλωτής πρέπει τα σήματα εισόδου του και τα σήματα εξόδου του να έχουν πάντα την σχέση που ορίζει ο πίνακας αλήθειας του. Στην περίπτωση τριών σημάτων εισόδου, με τρίτο σήμα το σήμα ανάδρασης, ο πίνακας αλήθειας πρέπει να είναι ο ακόλουθος:

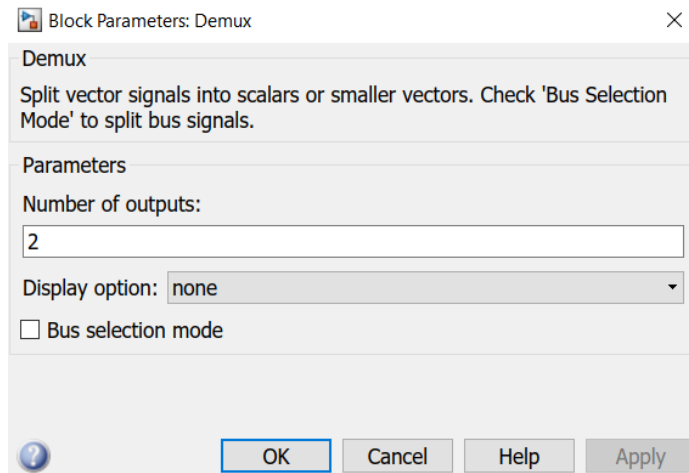
Input 1 (Set)	Input 2 (Reset)	Input 3 (Feedback)	Output 1	Output 2
0	0	0	0	1
0	0	1	1	0
0	1	0	0	1
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	1	0
1	1	0	0	0
1	1	1	0	0

Η επιβολή της παραπάνω συμπεριφοράς των εξόδων στους διάφορους συνδυασμούς των εισόδων είναι εφικτή μέσω της σύνδεσης ενός “CmbLogic” block στην έξοδο του πολυπλέκτη. Το “CmbLogic” εισάγεται από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Logic and Bit Operations και επιλογή “Combinatorial Logic”. Με διπλό κλικ πάνω του εισάγουμε την συμπεριφορά των εξόδων υπό μορφή πίνακα 8x2:



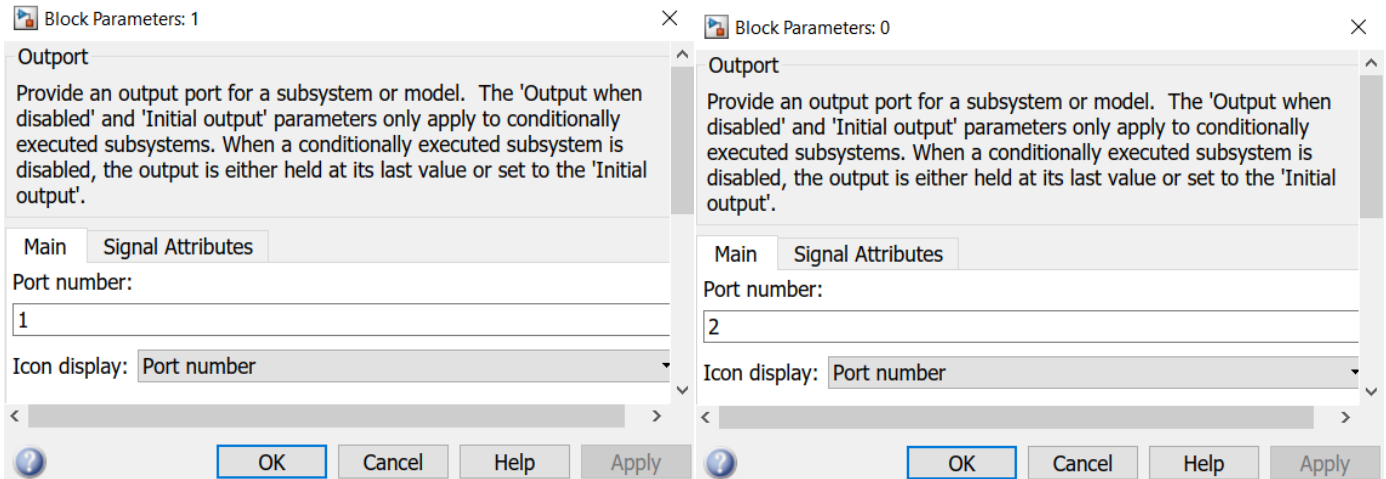
Εικόνα 4.224: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “CmbLogic” block εντός του “Latch1” block.

Στην συνέχεια, την έξοδο του “CmbLogic” την συνδέουμε σε έναν αποπλέκτη 1 σε 2 “Demux” ώστε να εξάγουμε τις δυο απολήξεις του μανδαλωτή. Ο αποπλέκτης εισάγεται από την πορεία Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Demux ”. Με διπλό κλικ πάνω του ορίζουμε το επιθυμητό πλήθος των εξόδων:



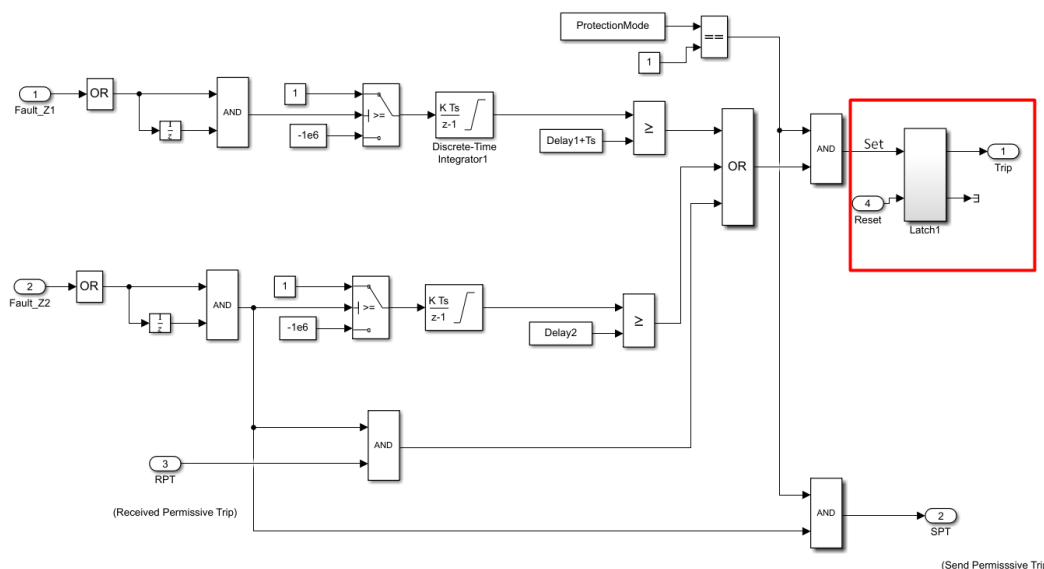
Εικόνα 4.225: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Demux” block εντός του “Latch1” block.

Οι δυο απολήξεις του μανδαλωτή εισάγονται ως “Outport” blocks από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Outport”. Με διπλό κλικ πάνω τους ορίζουμε τα “Port number” που τους αντιστοιχούν:



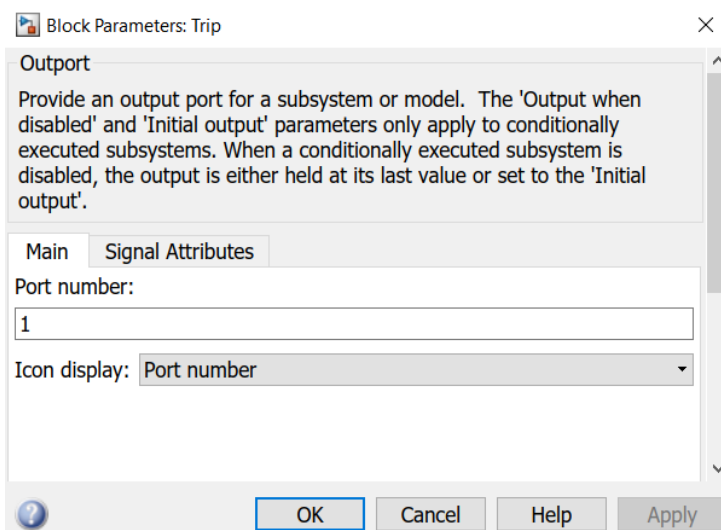
Εικόνα 4.226: Παράθυρα ορισμού παραμέτρων των “Outport” blocks εντός του “Latch1” block.

Ο μανδαλωτής “Latch1” στην θύρα εισόδου “Set” δέχεται τον παλμό έναυσης των διακοπών. Στην θύρα εισόδου “Reset” δέχεται τον παλμό απενεργοποίησης “SPT” από τον δεύτερο ηλεκτρονόμο στην περίπτωση που ο δεύτερος ηλεκτρονόμος ανίχνευσε το σφάλμα πρώτος. Στην πρώτη θύρα εξόδου “Q” συνδέουμε το “Outport” block “Trip” που περιέχει την προς αποστολή στους διακόπτες πληροφορία. Στην δεύτερη θύρα “Q” “ συνδέουμε ένα τερματικό block καθώς δεν θα αξιοποιηθεί στην προσομοίωση.



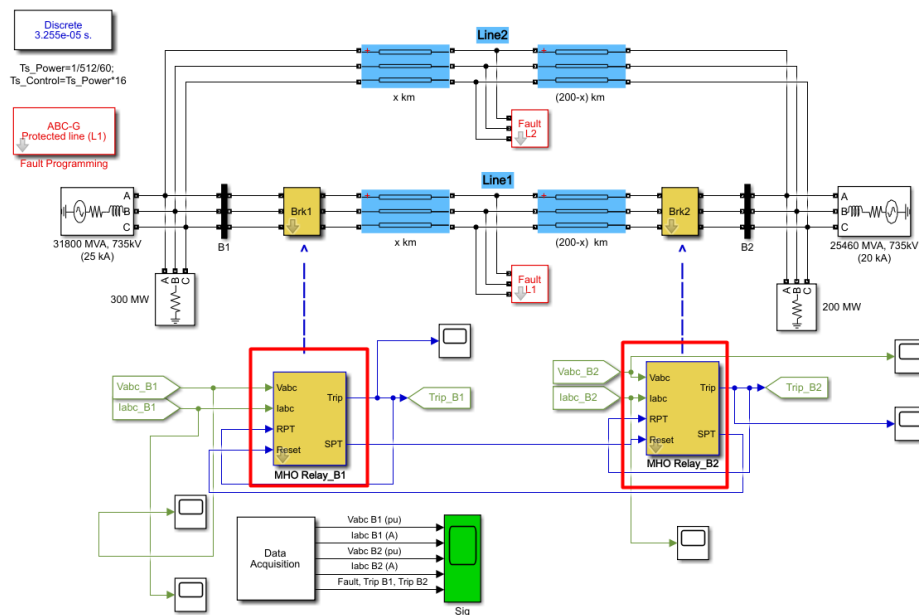
Εικόνα 4.227: Συνδεσμολογία εισόδων και εξόδων του “Latching Unit” block εντός του “Tripping Unit” block.

Το “Outport” block “Trip” εισάγεται από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Outport”. Με διπλό κλικ πάνω του ορίζουμε το “Port number” που του αντιστοιχεί:



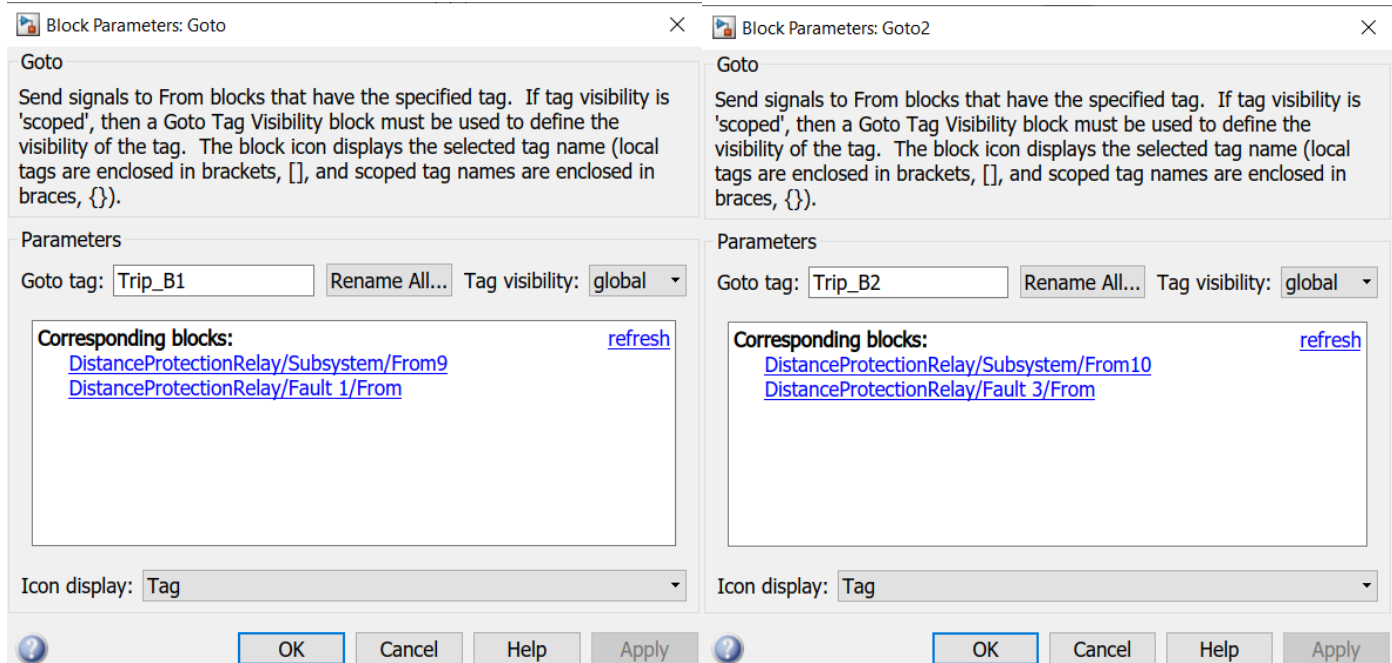
Εικόνα 4.228: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του πρώτου “Outport” block εντός του “Tripping Unit” block.

Τέλος το “Terminator” block εισάγεται από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Terminator”. Η δημιουργία των ηλεκτρονόμενων προστασίας τύπου Mho έχει πλέον ολοκληρωθεί:



Εικόνα 4.229: Σύνδεση των εισόδων και εξόδων των “MHO Relay_B1” και “MHO Relay_B2” blocks.

Στην έξοδο “Trip” τους, συνδέουμε δυο “Go to” blocks που εισάγουμε από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Signal Routing και επιλογή “Goto”. Με διπλό κλικ πάνω τους ορίζουμε την ονομασία τους στο πεδίο “Goto tag”:

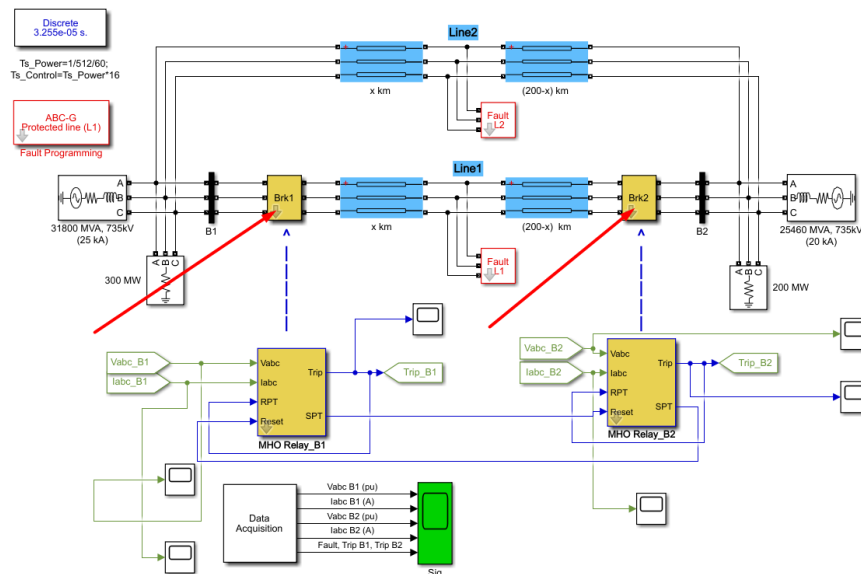


Εικόνα 4.230: Παράθυρα ορισμού παραμέτρων των “Goto” blocks “Trip_B1” και “Trip_B2” εντός του “Tripping Unit” block.

4.9 Διακόπτες κυκλώματος

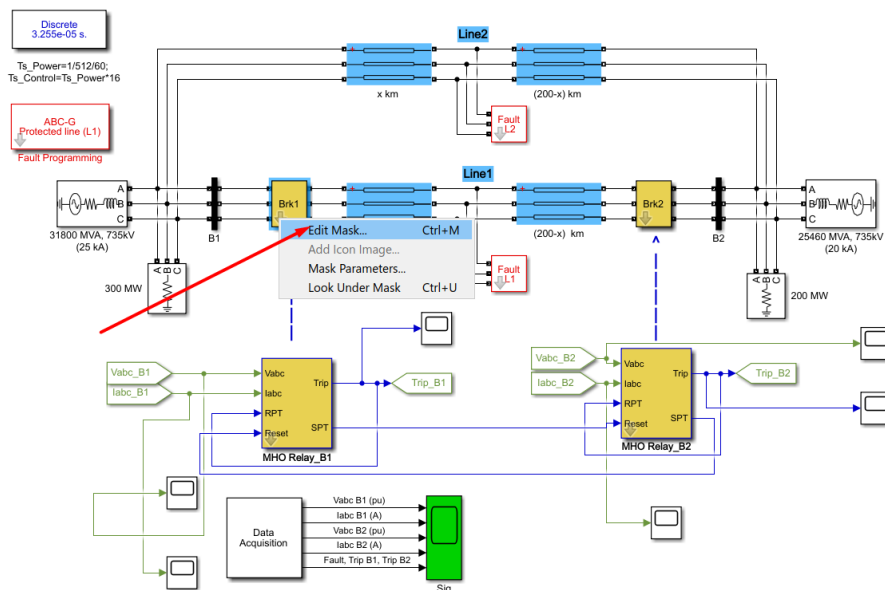
Θέλουμε να δημιουργήσουμε δυο συστήματα-block που όταν λαμβάνουν τα σήματα έναυσης “Trip” από τους ηλεκτρονόμους των ζυγών B1 και B2, θα απομονώνουν τις τρεις φάσεις της γραμμής. Ταυτόχρονα θέλουμε να μπορούμε να ορίζουμε τον χρόνο δειγματοληψίας και τις

καθυστερήσεις λειτουργίας των διακοπών που αναπόφευκτα υπάρχουν σε πραγματικές εφαρμογές. Με δεξί κλικ στο βέλος “Look inside mask”:



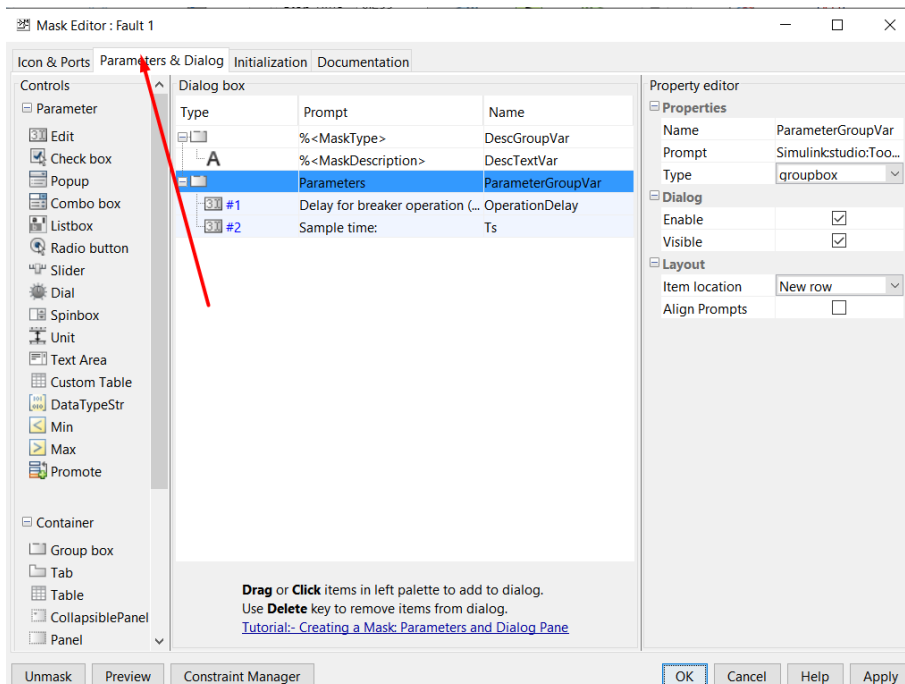
Εικόνα 4.231: “Brk1” και “Brk2” blocks.

Και επιλογή “Edit Mask”:



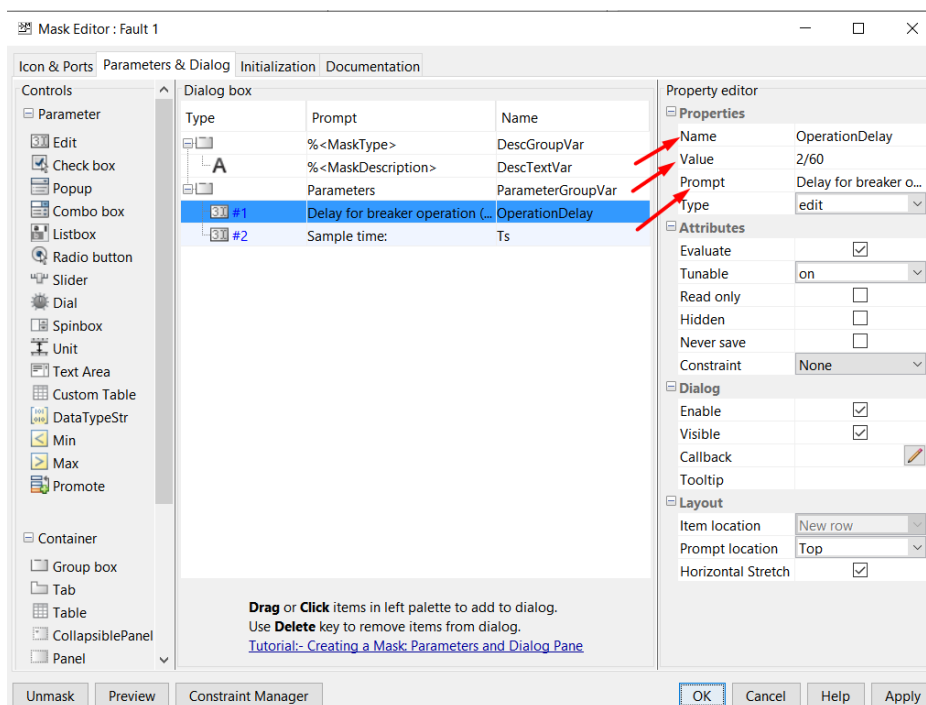
Εικόνα 4.232: Επεξεργασία του “Brk1” block τύπου Mask.

Οδηγούμαστε στον “Mask Editor”. Επιλέγοντας την καρτέλα “Parameters & Dialog”:



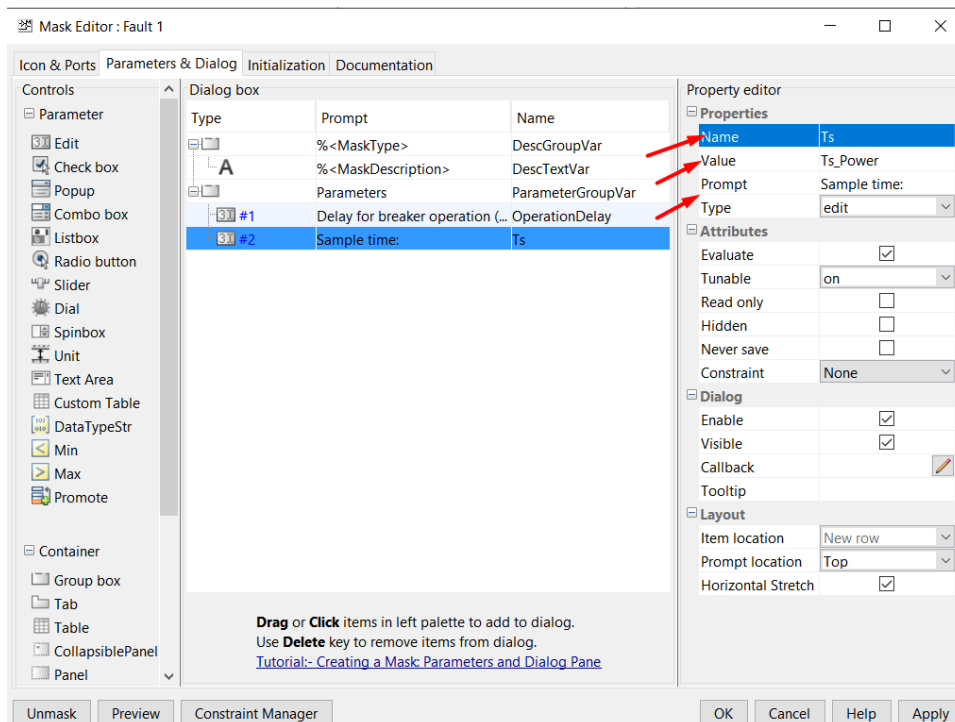
Εικόνα 4.233: Καρτέλα Parameters & Dialog του “Brk1” block τύπου Mask.

Ορίζουμε την μεταβλητή “Delay for breaker operation” με όνομα, τιμή και περιγραφή.



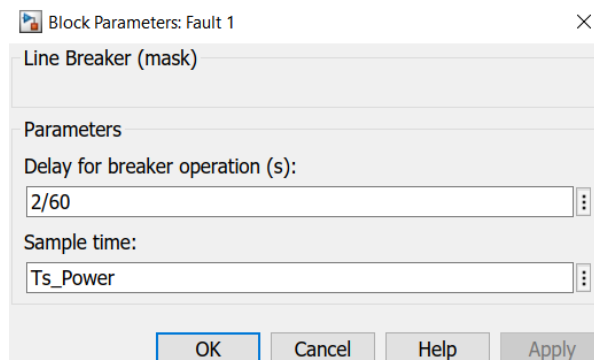
Εικόνα 4.234: Όνομα, τιμή και περιγραφή της παραμέτρου “Delay for breaker operation” της καρτέλας Parameters & Dialog του “Brk1” block τύπου Mask.

Έπειτα θα ορίσουμε την μεταβλητή “Sample time” με όνομα, τιμή και περιγραφή.



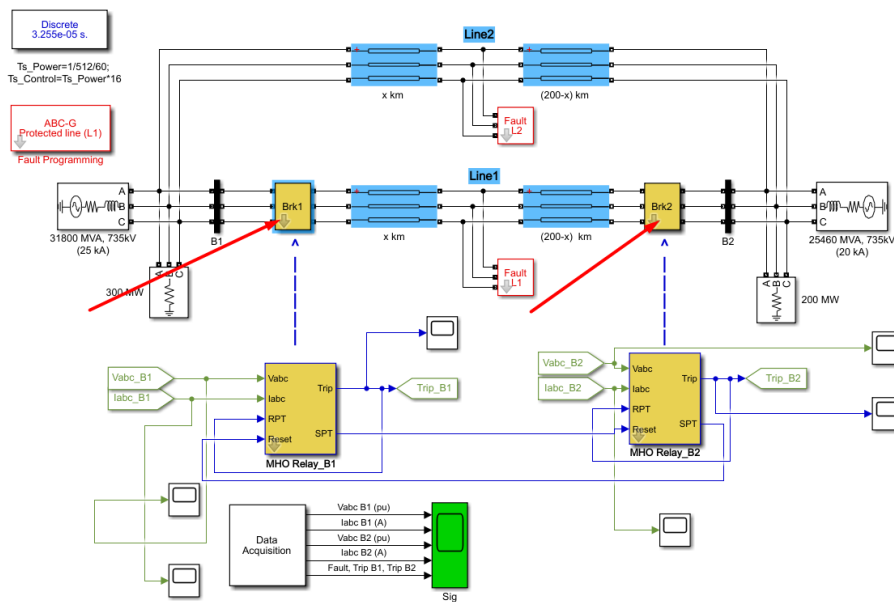
Εικόνα 4.235: Όνομα, τιμή και περιγραφή της παραμέτρου “Sample time” της καρτέλας *Parameters & Dialog* του “Brkl” block τύπου Mask.

Ο χρήστης με διπλό κλικ πάνω στο μπλοκ την χρονική καθυστέρηση λειτουργίας των ηλεκτρονόμων και τον χρόνο δειγματοληψίας που θα εφαρμοστεί κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης στο εν λόγω block.



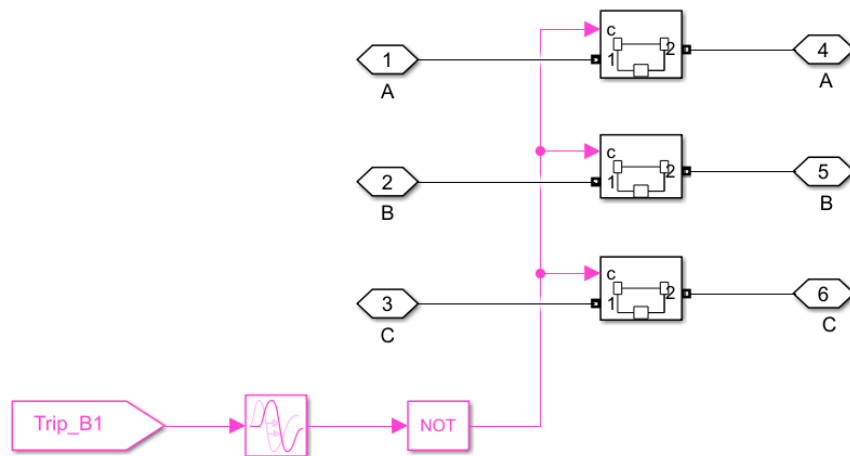
Εικόνα 4.236: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Brkl” block.

Ενώ με επιλογή στο βέλος “Look inside mask” εισέρχεται στο εσωτερικό υποσύστημα.



Εικόνα 4.237: Πεδία “Look inside mask” των “Brk1” και “Brk2” blocks.

Το εσωτερικό υποσύστημα του block “Fault Detection” πρέπει να έχει την παρακάτω μορφή:

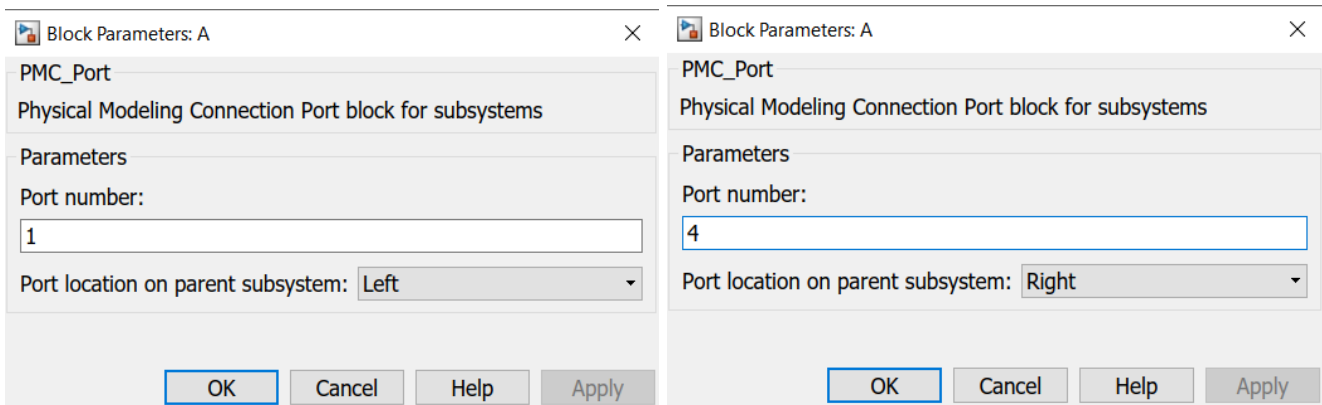


Εικόνα 4.238: Εσωτερικό υποσύστημα του “Brk1” block.

Τρόπος Λειτουργίας Υποσυστήματος:

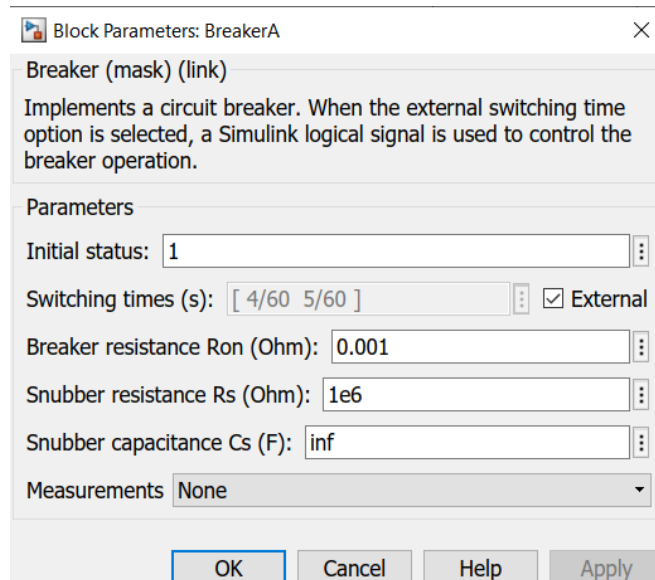
Τα “PMC_Port/left” και “ PMC_Port/right” blocks A, B και C προσομοιώνουν την φυσική σύνδεση των φάσεων της γραμμής μεταφοράς. Οι διακόπτες είναι “Normally Closed” διακόπτες ελεγχόμενοι από ένα σήμα εισόδου. Όταν το σήμα εισόδου του διακόπτη είναι μοναδιαίο, ο διακόπτης παραμένει κλειστός ενώ όταν το σήμα εισόδου μηδενιστεί, ο διακόπτης ανοίγει. Επομένως, μέσω ενός “From” block θα εισαχθεί ο παλμός έναυσης “Trip” από την έξοδο των ηλεκτρονόμων και θα αντιστραφεί σε έναν λογικό τελεστή “NOT”. Με αυτόν τον τρόπο όταν ο παλμός έναυσης είναι μηδενικός, οι διακόπτες παραμένουν κλειστοί ενώ όταν ο παλμός έναυσης γίνει μοναδιαίος, οι διακόπτες θα ανοίξουν. Στο σήμα “Trip” θα εφαρμοστεί και μια καθυστέρηση λόγω της προσομοίωσης. Τα “PMC_Port/left” και “ PMC_Port/right” blocks θα εισαχθούν από τη διαδρομή Library Browser / Simscape / Utilities και επιλογή “Connection Port” αντίστοιχα. Με διπλό

κλικ πάνω τους ορίζουμε τον αριθμό του port που τους αρμόζει και την θέση τους στο υποσύστημα (δεξιά ή αριστερά).



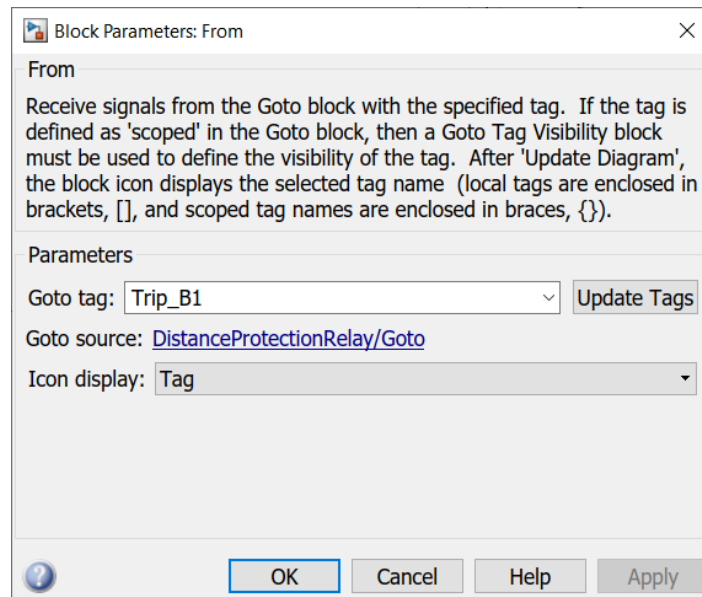
Εικόνα 4.239: Παράθυρα ορισμού παραμέτρων των “PMC_Port” blocks εντός του “Brk1” block.

Οι διακόπτες εισάγονται από την διαδρομή Library Browser / Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Fundamental Blocks / Elements και επιλογή “Breaker”. Με διπλό κλικ πάνω στο block ορίζουμε τα φυσικά του χαρακτηριστικά:



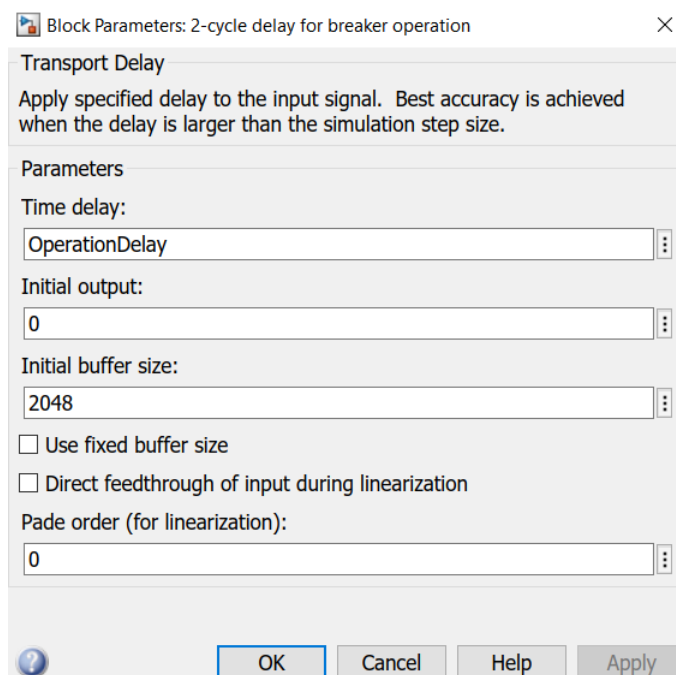
Εικόνα 4.240: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων των “Breaker” blocks εντός του “Brk1” block.

Τα “From” blocks “Trip_B1” και “Trip_B2” επικοινωνούν άμεσα με τα αντίστοιχα “Go to” blocks τους που είχαμε ορίσει προηγουμένως αρκεί να έχουν ίδια ονομασία και ανανεωμένη ετικέτα. Με διπλό κλικ πάνω στα “From” blocks εισάγουμε την ονομασία τους στο πεδίο “Goto tag” και ύστερα επιλέγουμε “Update Tags”:



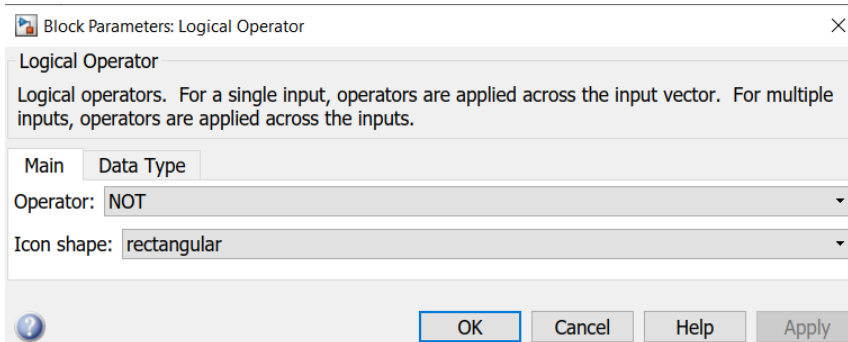
Εικόνα 4.241: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων των “From” blocks εντός του “Brk1” block.

Η εισαγωγή χρονικής καθυστέρησης πραγματοποιείται με ένα “Transport Delay” block από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Continuous και επιλογή “Transport Delay”. Με διπλό κλικ πάνω του ορίζουμε την επιθυμητή χρονική καθυστέρηση και το μέγεθος του buffer (προτείνεται 2048):



Εικόνα 4.242: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Transport Delay” block εντός του “Brk1” block.

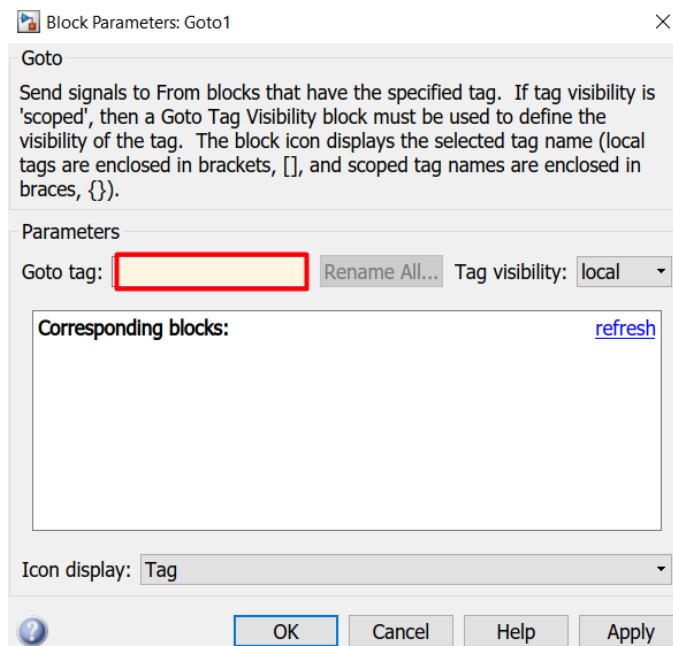
Τέλος, ο λογικός τελεστής “NOT” εισάγεται από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Logical Operator”. Με διπλό κλικ πάνω του επιλέγουμε στο πεδίο “Operator” τον όρο “NOT”.



Εικόνα 4.243: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Logical Operator” block τύπου “NOT” εντός του “Brkl” block.

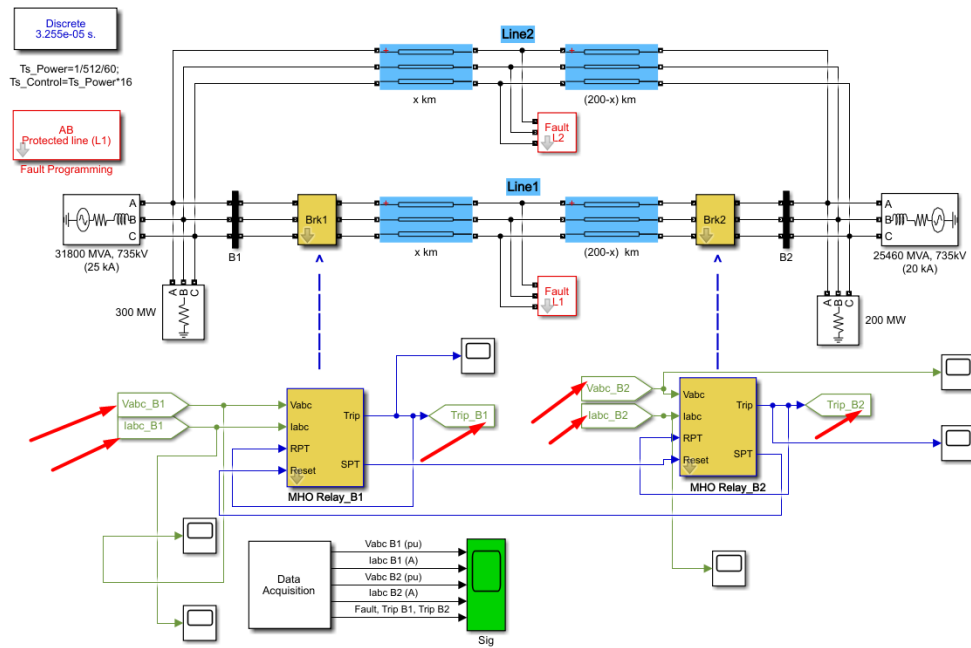
4.10 Συλλογή δεδομένων

Στην αρχική οθόνη του αρχείου Simulink θέλουμε να υπάρχει ένα σύστημα-block που να συλλέγει και να απεικονίζει τα σήματα ενδιαφέροντος μας, όπως οι τριφασικές τάσεις και ρεύματα στον ζυγό B1, οι τριφασικές τάσεις και ρεύματα στον ζυγό B2, τα σήματα ενεργοποίησης των διακοπτικών στοιχείων και το σήμα σφάλματος. Για να καταφέρουμε να συλλέξουμε τα σήματα αυτά πρέπει αρχικά να συνδέσουμε “Go to” blocks στα σημεία του συστήματος που περιλαμβάνουν τις αντίστοιχες πληροφορίες. Τα “Go to” blocks τα εισάγουμε από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Signal Routing και επιλογή “Go to” και έπειτα συνδέουμε την άκρη τους στο σημείο που θέλουμε να διαβάζουν. Έπειτα με διπλό κλικ πάνω τους εισάγουμε την ονομασία τους.



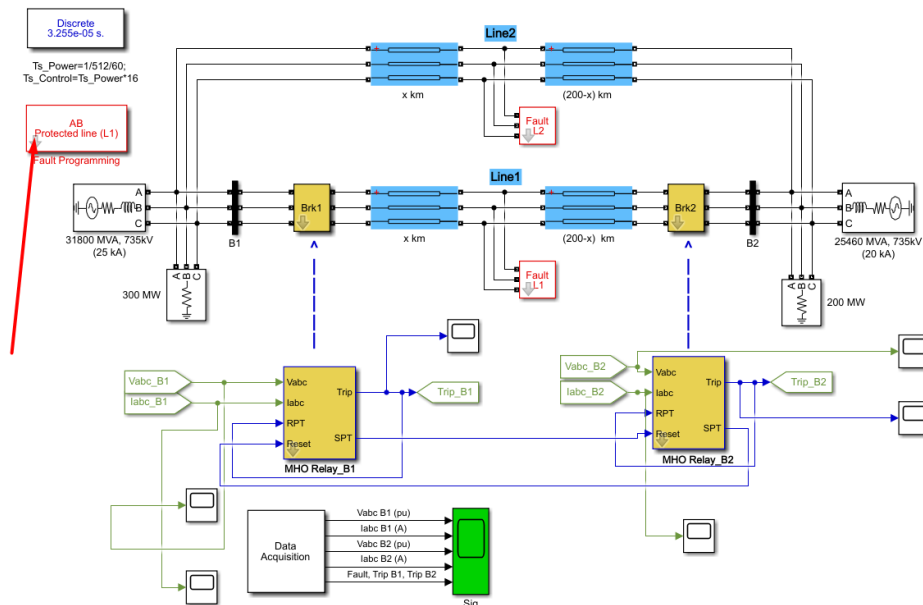
Εικόνα 4.244: : Παράθυρο ορισμού παραμέτρων των “Goto” blocks “Vabc_B1”, “Vabc_B2”, “Iabc_B1”, “Iabc_B2”, “Trip_B1” και “Trip_B2” στην αρχική οθόνη του αρχείου Simulink.

Στην προκειμένη περίπτωση τοποθετούμε “Go to” blocks με ονομασίες “Vabc_B1”, “Iabc_B1”, “Vabc_B2”, “Iabc_B2”, “Trip_B1” και “Trip_B2” στα εξής σημεία:



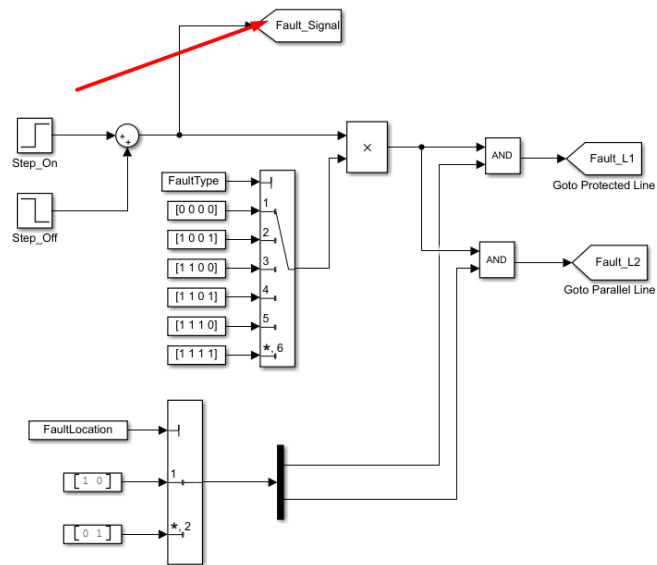
Εικόνα 4.245: “Goto” blocks “Vabc_B1”, “Vabc_B2”, “Iabc_B1”, “Iabc_B2”, “Trip_B1” και “Trip_B2” στην αρχική οθόνη του αρχείου Simulink.

Θα τοποθετήσουμε και ένα “Go to” block που να παρακολουθεί το σήμα σφάλματος με όνομα “Fault_Signal”. Επιλέγουμε “Look inside mask” στο “Fault Programming” block:



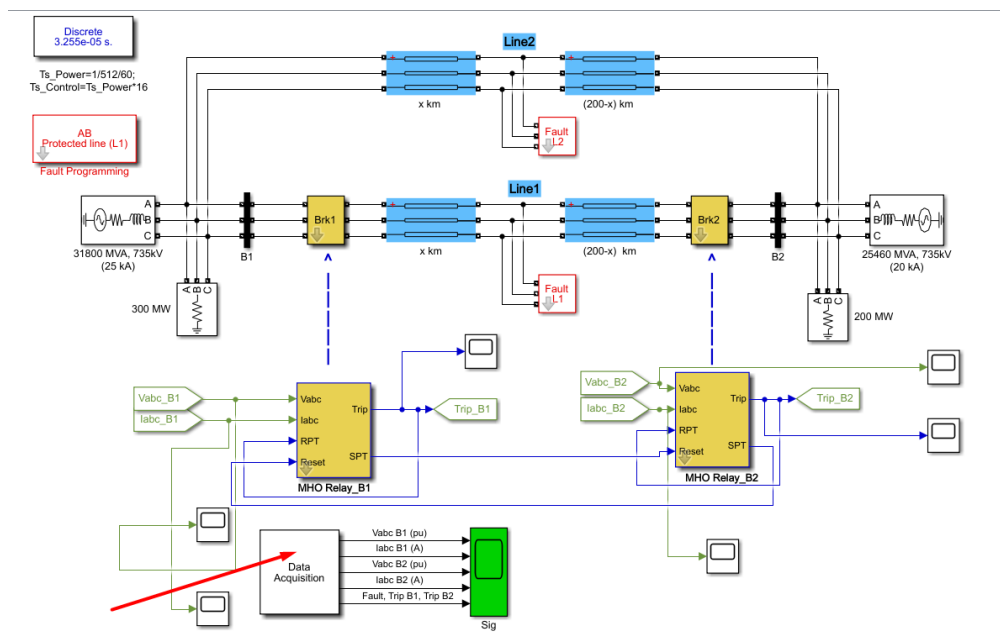
Εικόνα 4.246: Πεδίο “Look inside mask” του “Fault Programming” block.

Και έπειτα:



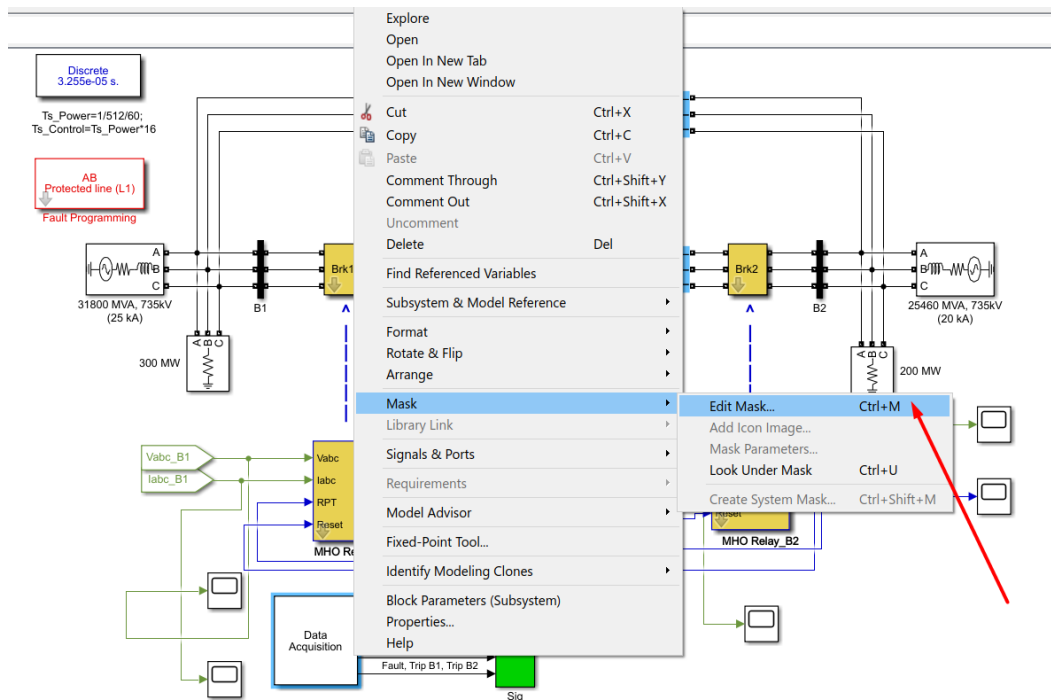
Εικόνα 4.247: “Goto” block “Fault_Signal” εντός του “Fault Programming” block.

Πλέον μπορούμε να αναλύσουμε το σύστημα “Data Acquisition”:



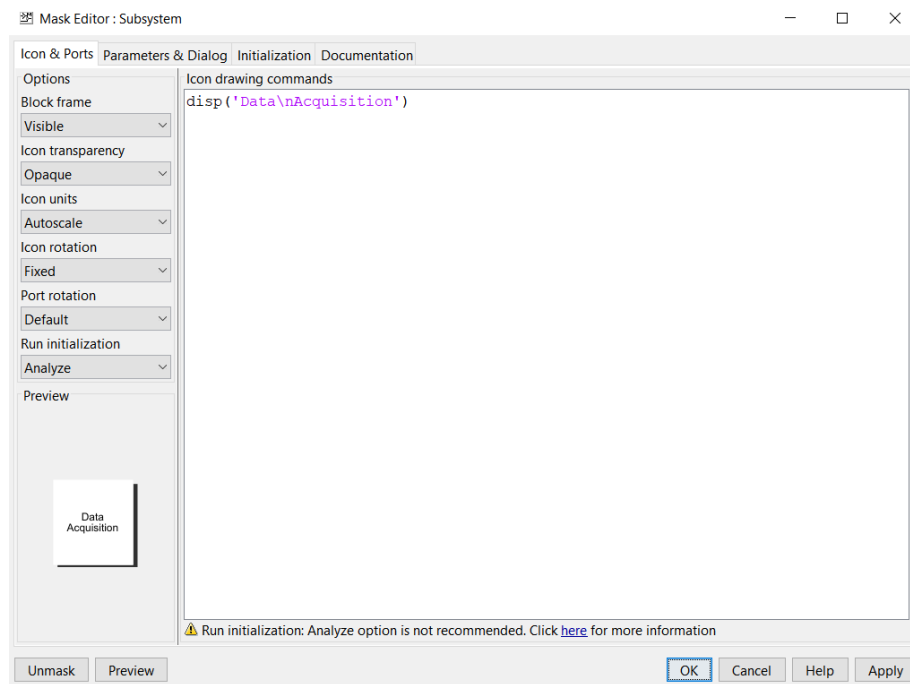
Εικόνα 4.248: “Data Acquisition” block.

Κάνουμε αρχικά δεξί κλικ πάνω του, επιλογή “Mask” και έπειτα “Edit Mask”:



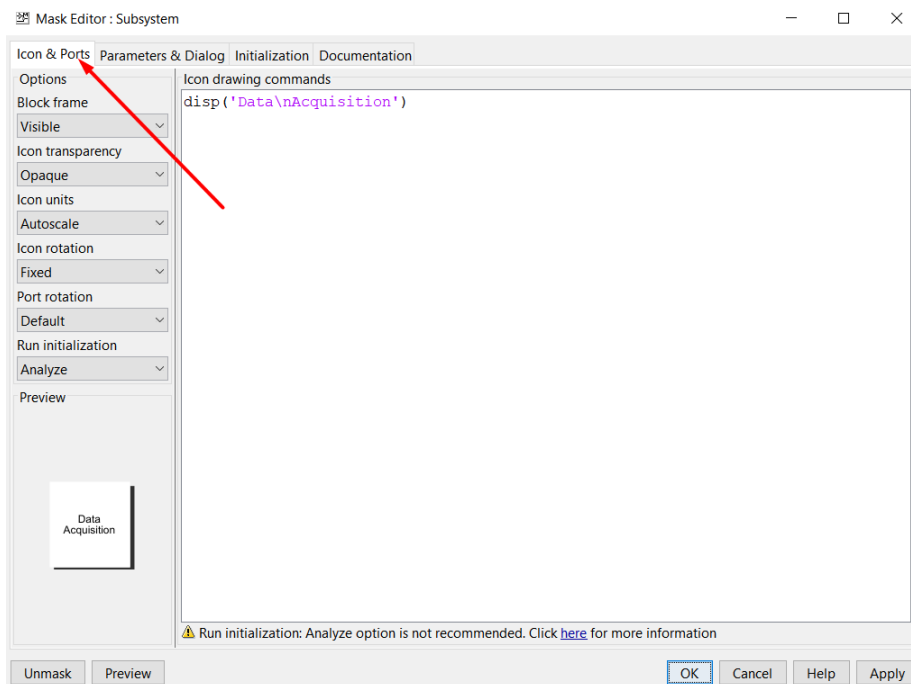
Εικόνα 4.249: Επεξεργασία του “Data Acquisition” block τύπου Mask.

Ανοίγεται ο Mask Editor:



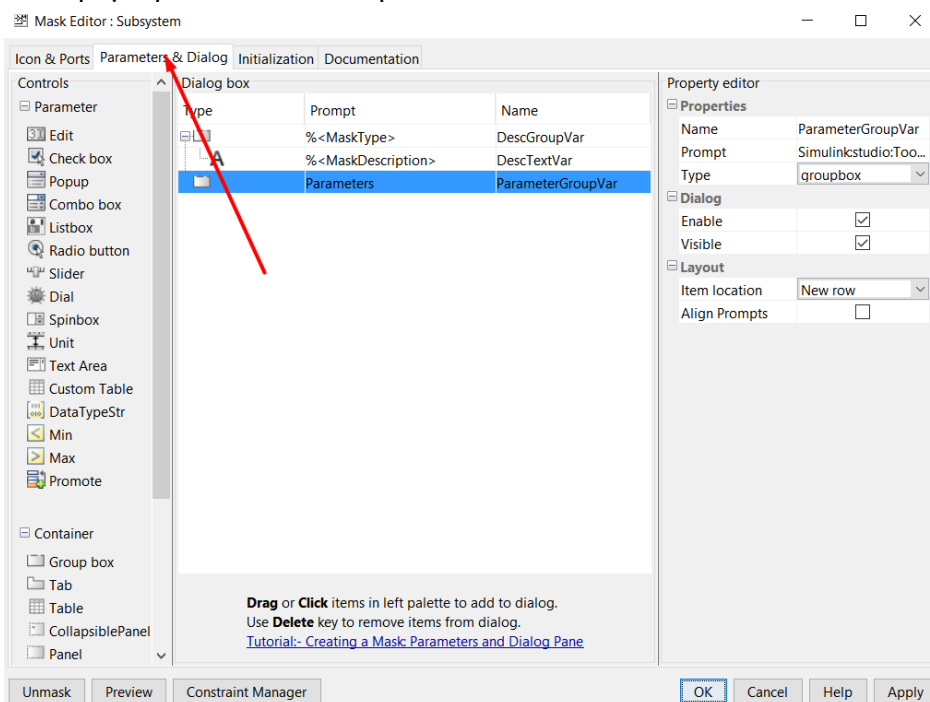
Εικόνα 4.250: “Mask Editor” του “Data Acquisition” block.

Στην καρτέλα “Icon & Ports” μπορούμε να προγραμματίσουμε το όνομα που θα απεικονίζεται στο block. Εν προκειμένω “Data Acquisition”.



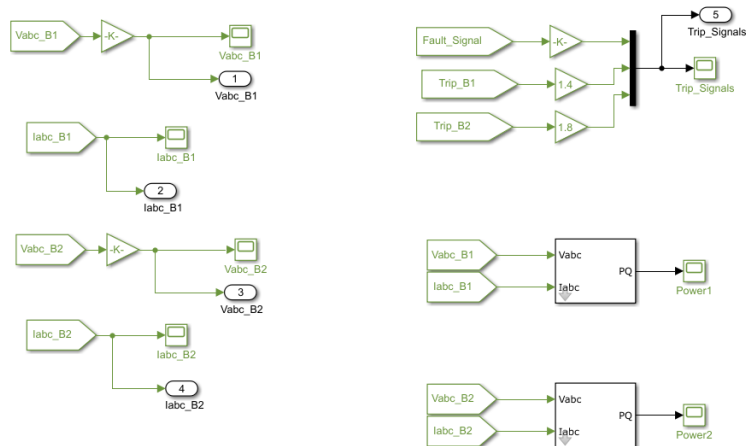
Εικόνα 4.251: Καρτέλα Icons & Ports του “Data Acquisition” block τύπου Mask.

Το εν λόγω block είναι ένα σύστημα χωρίς εισόδους, επομένως στην καρτέλα “Parameters & Dialog” η λίστα παραμέτρων θα είναι κενή.



Εικόνα 4.252: Καρτέλα Parameters & Dialog του “Data Acquisition” block τύπου Mask.

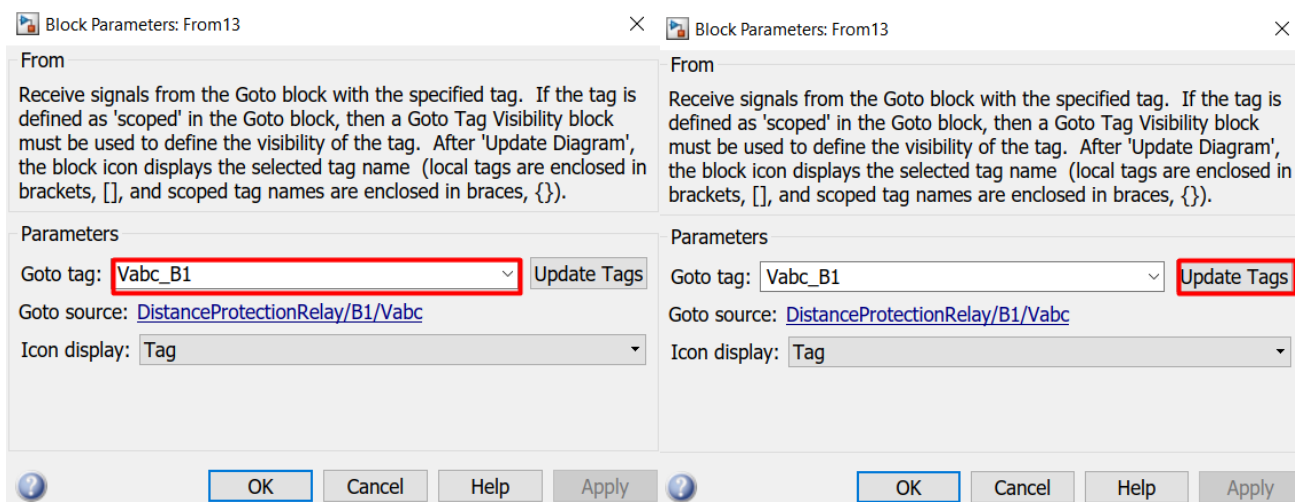
Με διπλό κλικ πάνω στο block “Data Acquisition” πρέπει να απεικονίζεται το παρακάτω υποσύστημα:



Εικόνα 4.253: Εσωτερικό υποσύστημα του “Data Acquisition ” block.

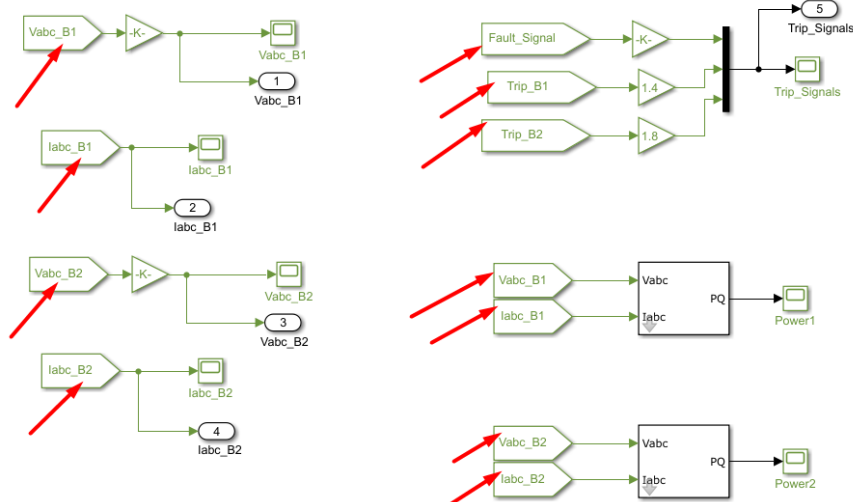
Παρατηρούμε πως δεν υπάρχουν “Inport” blocks. Τα σήματα εισάγονται στο υποσύστημα μέσω “From” blocks που ευρίσκονται από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Signal Routing και επιλογή “From”.

Τα “From” blocks επικοινωνούν άμεσα με τα αντίστοιχα “Go to” blocks τους που ορίσαμε προηγουμένως αρκεί να έχουν ίδια ονομασία και ανανεωμένη ετικέτα. Με διπλό κλικ πάνω στα “From” blocks εισάγουμε την ονομασία τους στο πεδίο “Goto tag” και ύστερα επιλέγουμε “Update Tags”:



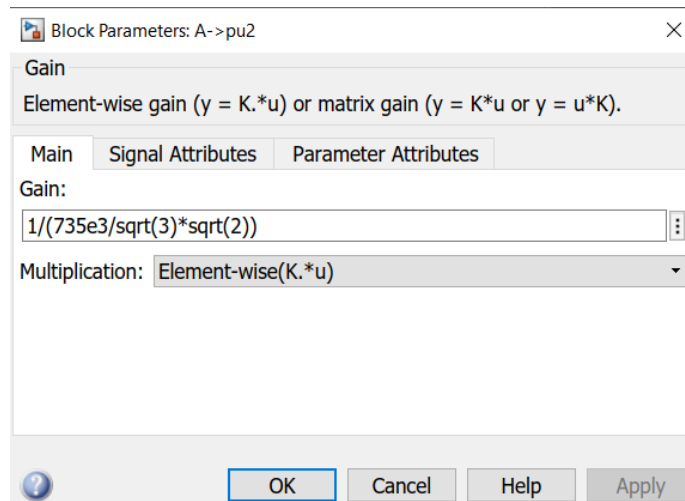
Εικόνα 4.254: Πεδία “Goto tag” και “Update Tags” των “From” blocks του “Data Acquisition ” block.

Αφού επαναληφθεί αυτή η διαδικασία για όλα τα “From” blocks συλλέγουμε όλες τις απαραίτητες πληροφορίες που θέλουμε να εποπτεύουμε:



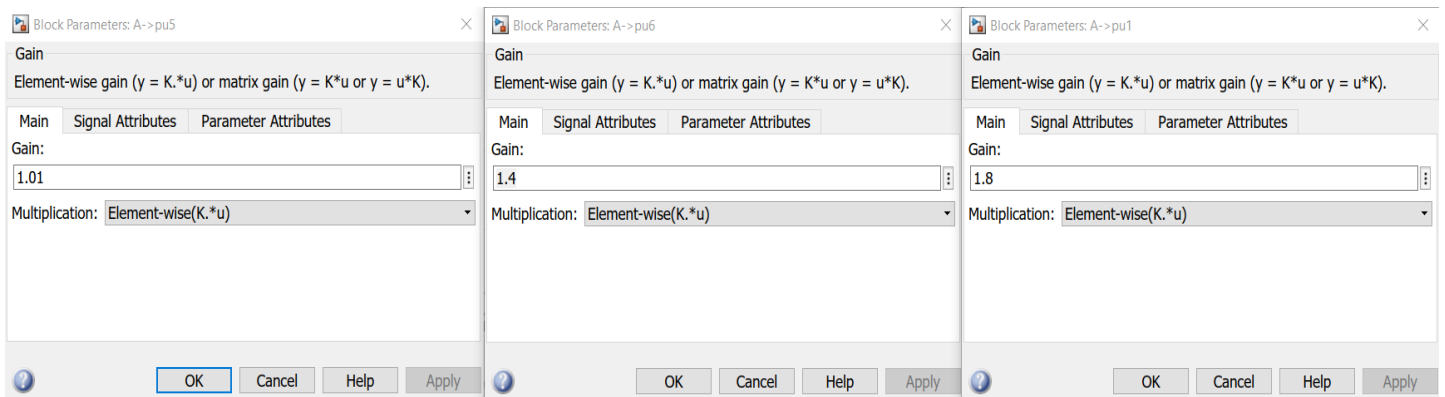
Εικόνα 4.255: “From” blocks του “Data Acquisition” block.

Μπορούμε να σχηματίσουμε ανά μονάδα τιμές τάσεων αν εισάγουμε κατάλληλα κέρδη στην έξοδο των αντίστοιχων “From” blocks μέσω “Gain” blocks που εισάγουμε από τη διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Gain”. Με διπλό κλικ πάνω τους, στο πεδίο “Gain”, ορίζουμε το επιθυμητό κέρδος. Εν προκειμένω:



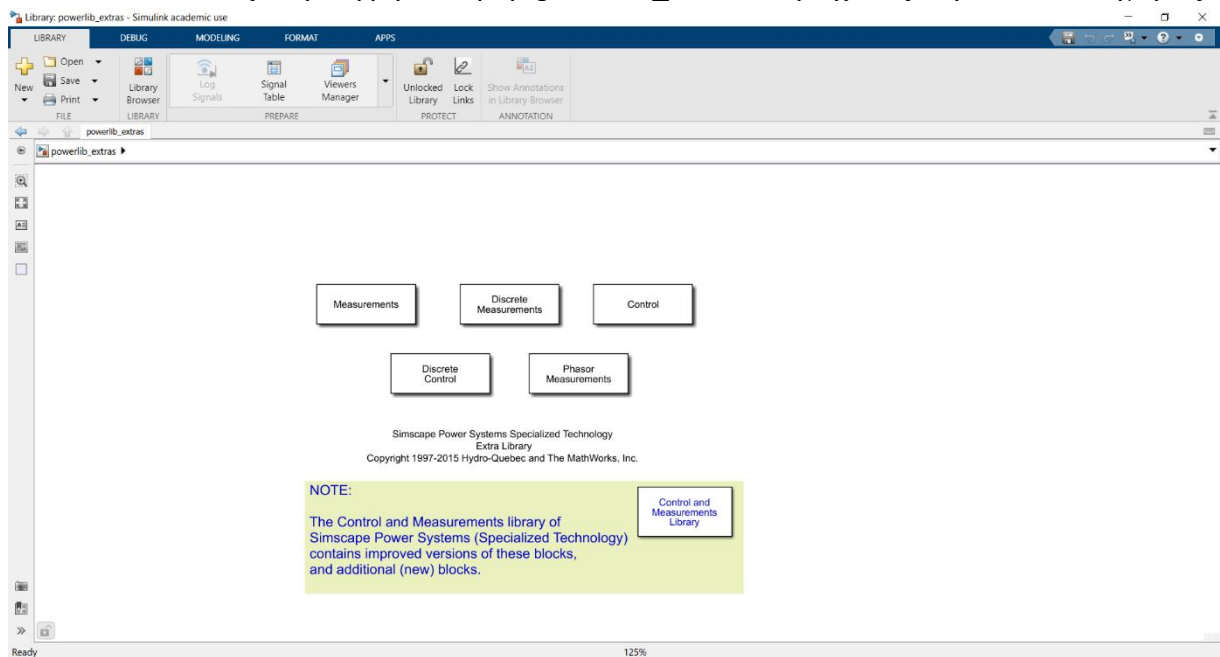
Εικόνα 4.256: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων των δυο “Gain” blocks, που εφαρμόζονται στις τάσεις “Vabc_B1” και “Vabc_B2” αντίστοιχα, εντός του “Data Acquisition” block.

“Gain” blocks θα εφαρμόσουμε και στους παλμούς “Fault_Signal”, “Trip_B1” και “Trip_B2” ώστε οι κυματομορφές να μην αλληλεπικαλύπτονται σχηματικά. Τα κέρδη που θα εφαρμόσουμε με την ίδια διαδικασία θα είναι ενδεικτικά τα παρακάτω:



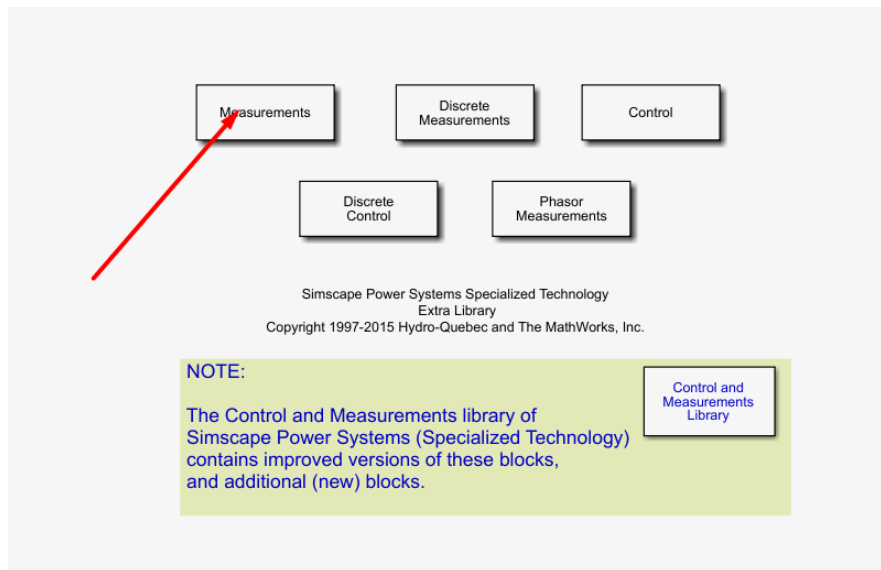
Εικόνα 4.257: Παράθυρα ορισμού παραμέτρων των τριών “Gain” blocks, που εφαρμόζονται στα σήματα “Fault_Signal”, “Trip_B1” και “Trip_B2” αντίστοιχα, εντός του “Data Acquisition” block.

Ενδιαφέρον θα ήταν να μπορούμε να παρακολουθούμε την ενεργό και άεργο ισχύ που διαχέονται από τους ζυγούς καθ’ όλη την διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτό είναι εφικτό αν τα σήματα “Vabc_B1”, “Iabc_B1” και “Vabc_B2”, “Iabc_B2” αντίστοιχα τα εισάγουμε σε δυο συστήματα-block της εξωτερικής βιβλιοθήκης powerlib_extras ονομαζόμενα “3-phase Instantaneous Active & Reactive Power”. Η εξωτερική βιβλιοθήκη “powerlib_extras” περιέχει τις παρακάτω κατηγορίες:



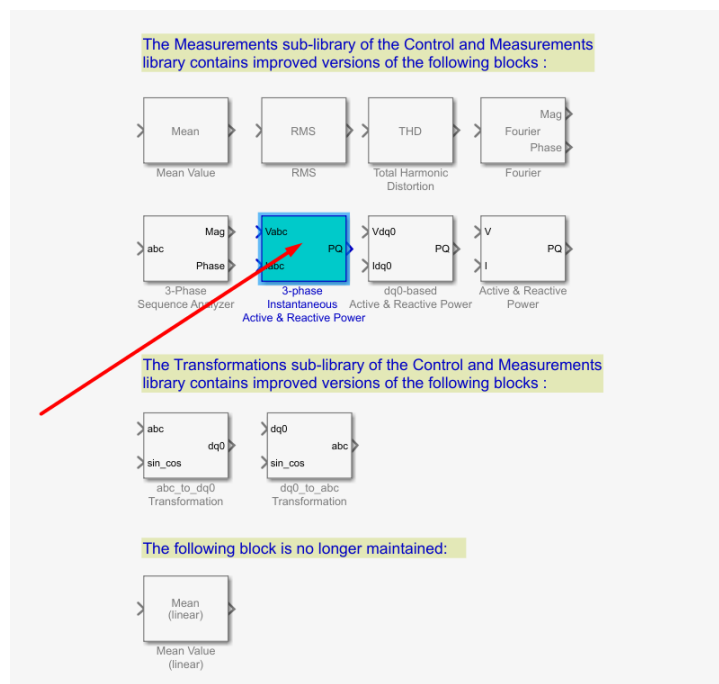
Εικόνα 4.258: Βιβλιοθήκη “powerlib_extras”.

Πατώντας διπλό κλικ στο σύστημα “Measurements”:



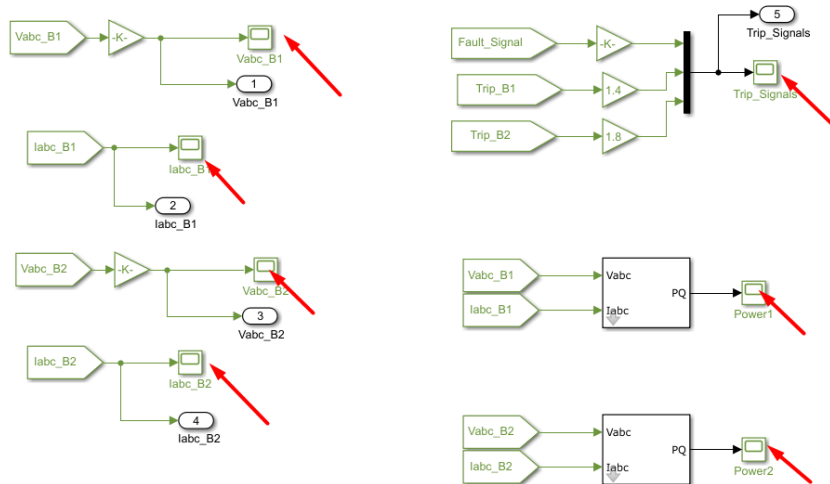
Εικόνα 4.259: Κατηγορία “Measurements” της βιβλιοθήκης “powerlib_extras”.

Βρίσκουμε το block που αναζητούμε:



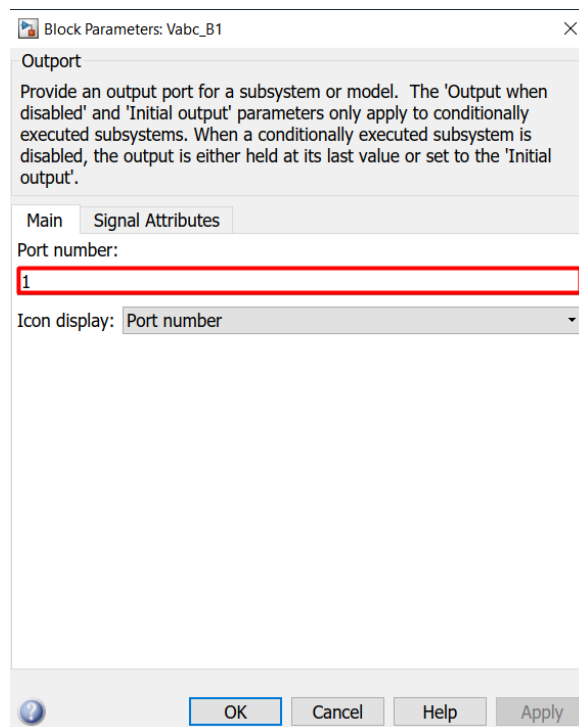
Εικόνα 4.260: “3-phase Instantaneous Active & Reactive Power” block εντός της κατηγορίας “Discrete Measurements” της βιβλιοθήκης “powerlib_extras”.

Όλα τα σήματα που προαναφέρθηκαν μπορούμε να τα απεικονίσουμε ως προς τον χρόνο μέσω “Scope” blocks από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Sinks , επιλογή “Scope” και διπλό κλικ πάνω τους.



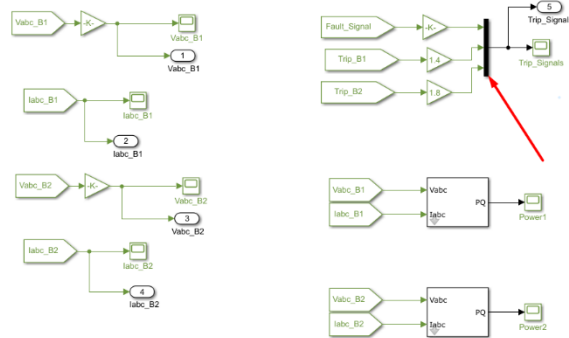
Εικόνα 4.261: “Scope” blocks εντός του “Data Acquisition ” block.

Τοποθετώντας “Outport” blocks στα σήματα “Vabc_B1” (ανά μονάδα), “Iabc_B1”, “Vabc_B2”(ανά μονάδα), “Iabc_B2”, “Trip_B1”, “Trip_B2” και “Fault_Signal”, δημιουργούμε αντίστοιχες εξόδους (outputs) στο αρχικό σύστημα-block “Data Acquisition”. Τα “Outport” blocks εισάγονται από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Outport”. Με διπλό κλικ πάνω τους ορίζουμε τον αριθμό του port που τους αντιστοιχεί. Για παράδειγμα:



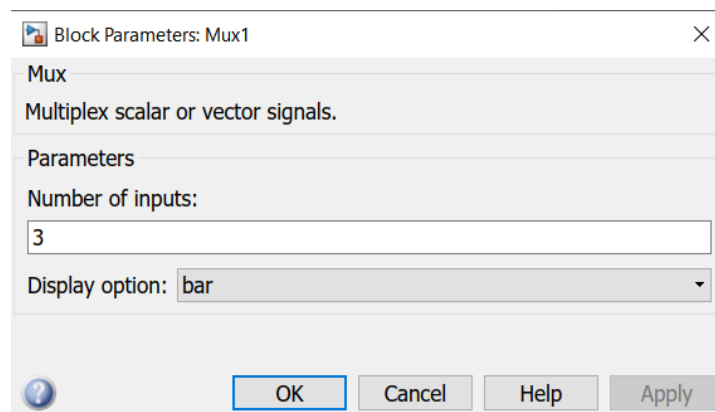
Εικόνα 4.262: : Παράθυρο ορισμού παραμέτρων των “Outport” blocks “Vabc_B1”, “Vabc_B2”, “Iabc_B1”, “Iabc_B2”, “Trip_B1”, “Trip_B2” και “Fault_Signal” εντός του “Data Acquisition ” block.

Προκειμένου να απεικονιστούν σε κοινούς άξονες τα σήματα “Trip_B1” , “Trip_B2” και “Fault_Signal” θα τα εισάγουμε σε έναν πολυπλέκτη 3 σε 1 από την διαδρομή Library Browser / Simulink / Commonly Used Blocks και επιλογή “Mux”.



Εικόνα 4.263: “Mux” block εντός του “Data Acquisition ” block.

Με διπλό κλικ πάνω τους θα ορίσουμε τον αριθμό των εξόδων (τρεις στην προκειμένη περίπτωση).

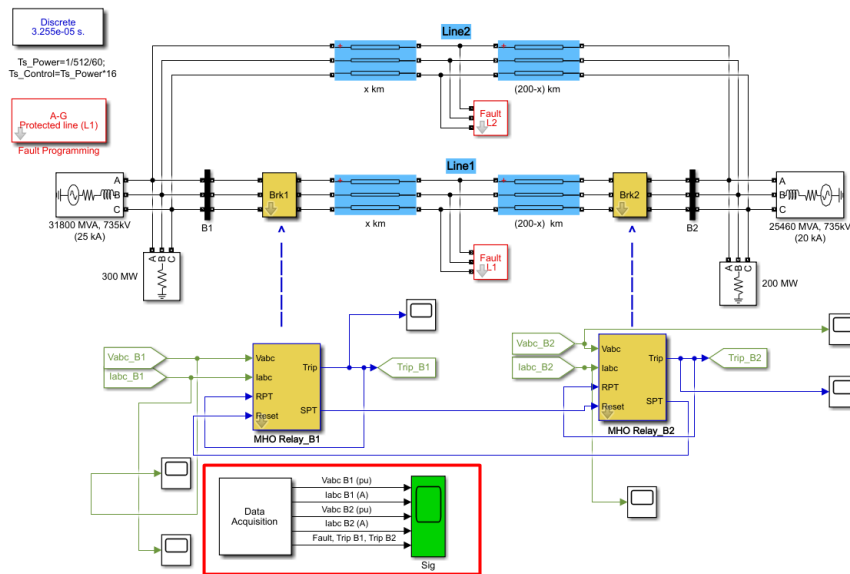


Εικόνα 4.264: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Mux” block εντός του “Data Acquisition ” block.

Το “Data Acquisition” block που μόλις υλοποιήσαμε εξάγει προς ένα “Scope” block πέντε εισόδων:

1. Τις κυματομορφές της τάσης (ανά μονάδα) του ζυγού B1
2. Τα ρεύματα του ζυγού B1
3. Τις κυματομορφές της τάσης (ανά μονάδα) του ζυγού B2
4. Τα ρεύματα του ζυγού B2
5. Το σήμα σφάλματος και τους παλμούς έναυσης των διακοπτικών στοιχείων των ζυγών B1 και B2.

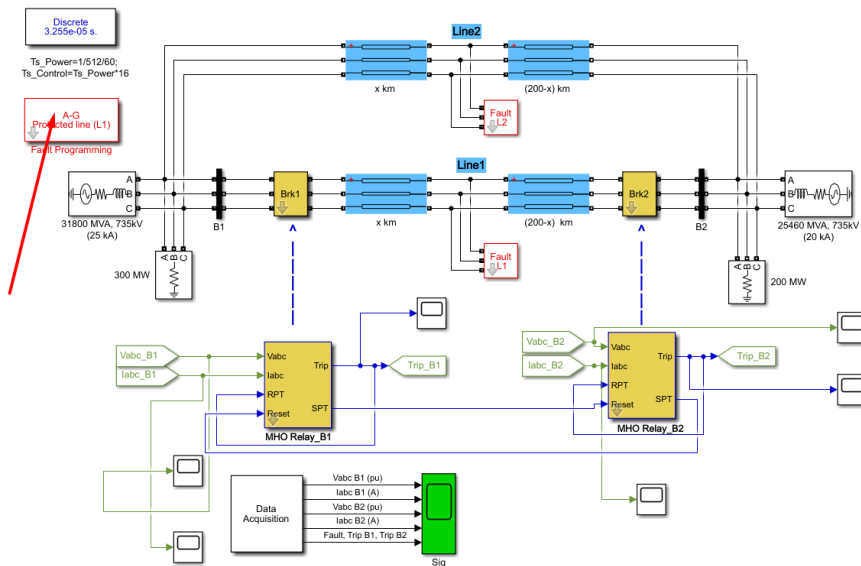
Μπορούμε πλέον να εποπτεύουμε με διπλό κλικ πάνω στο “Scope” block “Sig” την συμπεριφορά του δικτύου και των διακοπών σε σφάλματα όλων των ειδών.



Εικόνα 4.265: “Data Acquisition” block σε σύνδεση με το “Scope” block “Sig”.

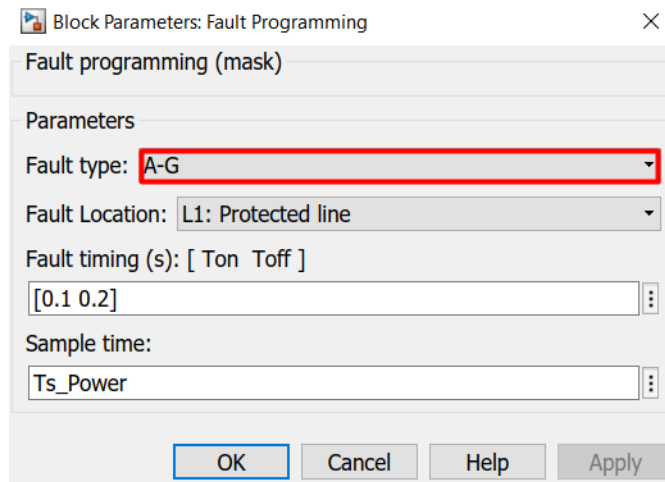
4.11 Προσομοίωση βραχυκυκλωμάτων

Με διπλό κλικ πάνω στο block “Fault Programming”:



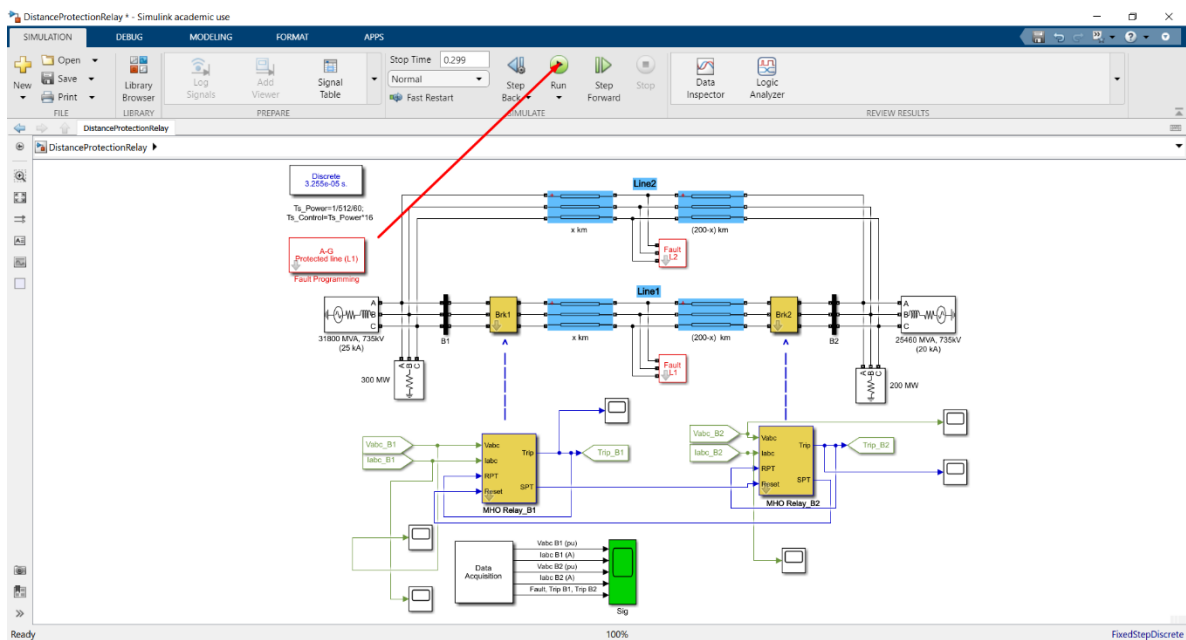
Εικόνα 4.266: “Fault Programming” block.

Και επιλογή επιθυμητού είδους σφάλματος στο πεδίο “Fault type”:



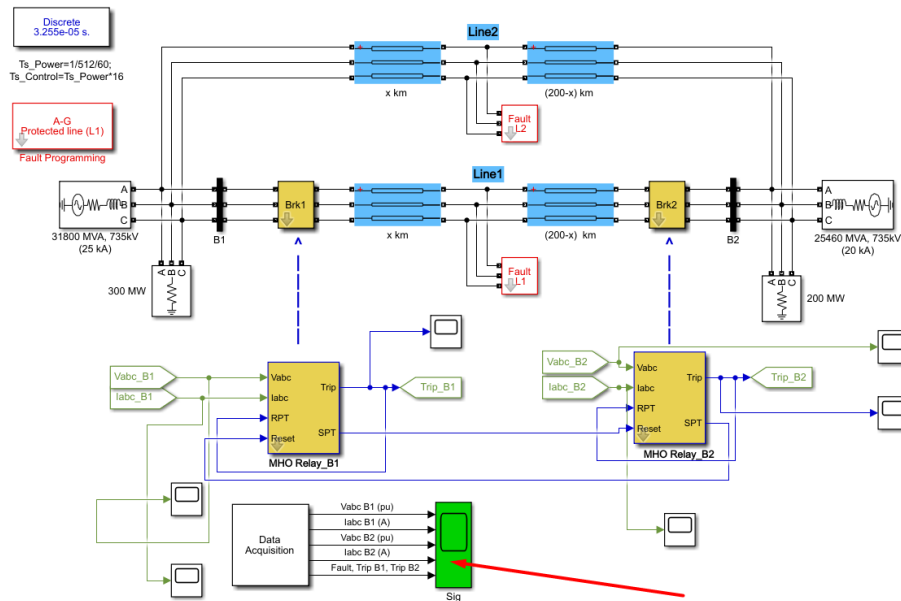
Εικόνα 4.267: Πεδίο “Fault type” του παράθυρου ορισμού παραμέτρων του “Fault Programming” block.

Τρέχουμε την προσομοίωση:



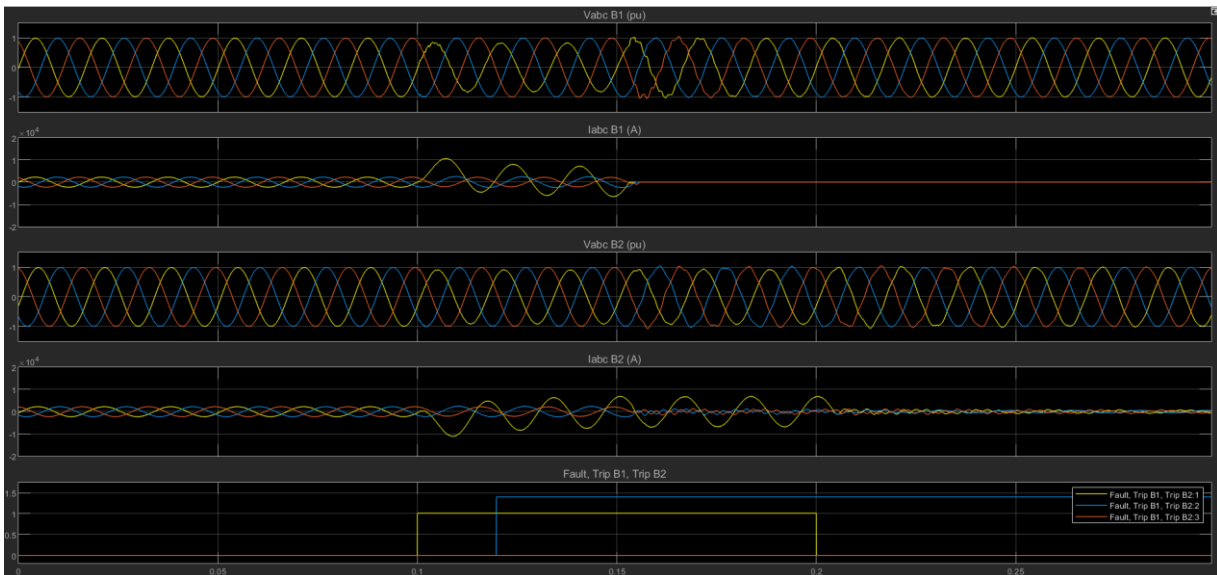
Εικόνα 4.268: Συντόμευση “Run” για εκκίνηση της προσομοίωσης.

Με διπλό κλικ στο “Sig” Scope block:



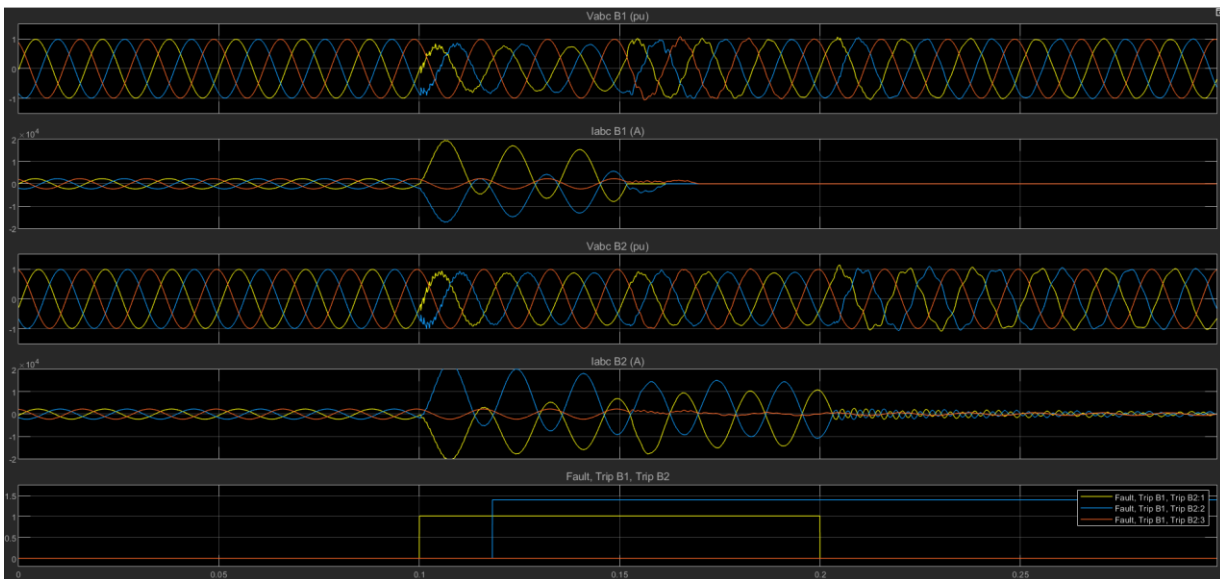
Εικόνα 4.269: Εποπτεία του δικτύου μέσω του “Sig” block τύπου “Scope”.

1. Για μονοφασικό προς γη σφάλμα:



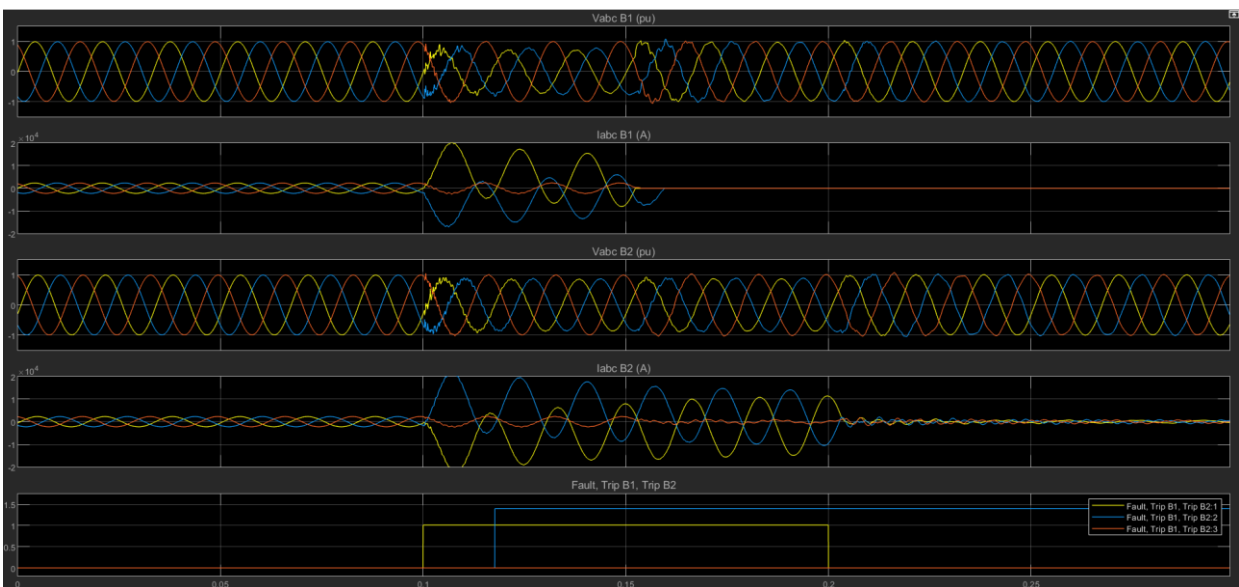
Εικόνα 4.270: Γραφική απεικόνιση των παραμέτρων “Vabc_B1”, “Iabc_B1”, “Vabc_B2”, “Iabc_B2”, “Trip_B1”, “Trip_B2” και “Fault_Signal” κατά το μονοφασικό προς γη σφάλμα.

2. Για διφασικό χωρίς γη σφάλμα:



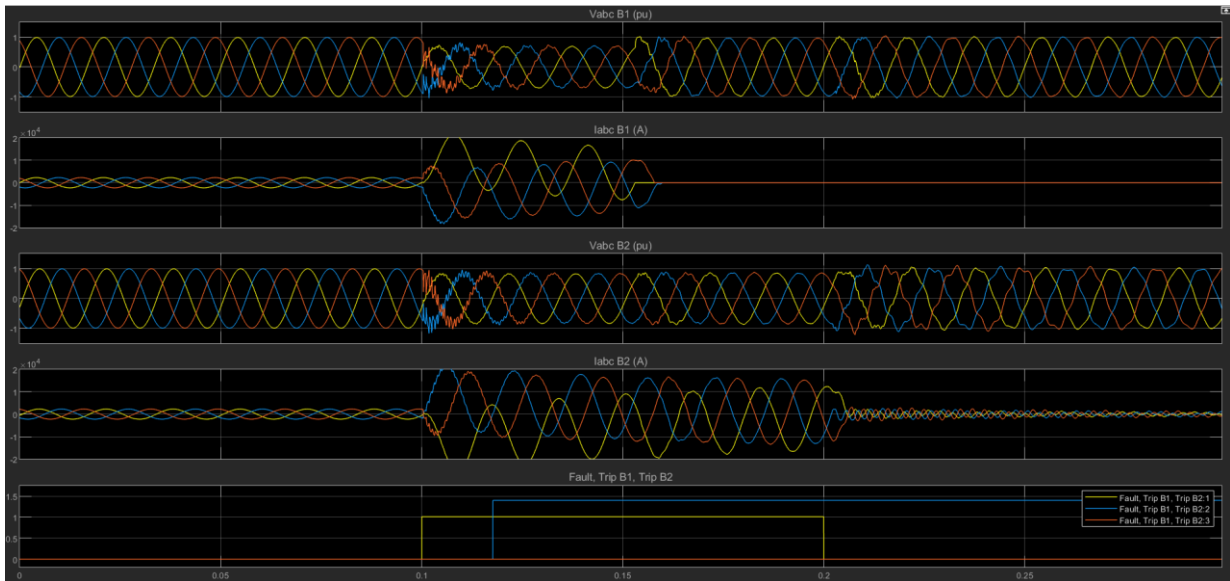
Εικόνα 4.271: Γραφική απεικόνιση των παραμέτρων “Vabc_B1”, “Iabc_B1”, “Vabc_B2”, “Iabc_B1”, “Trip_B1”, “Trip_B2” και “Fault_Signal” κατά το διφασικό χωρίς γη σφάλμα.

3. Για διφασικό με γη σφάλμα:



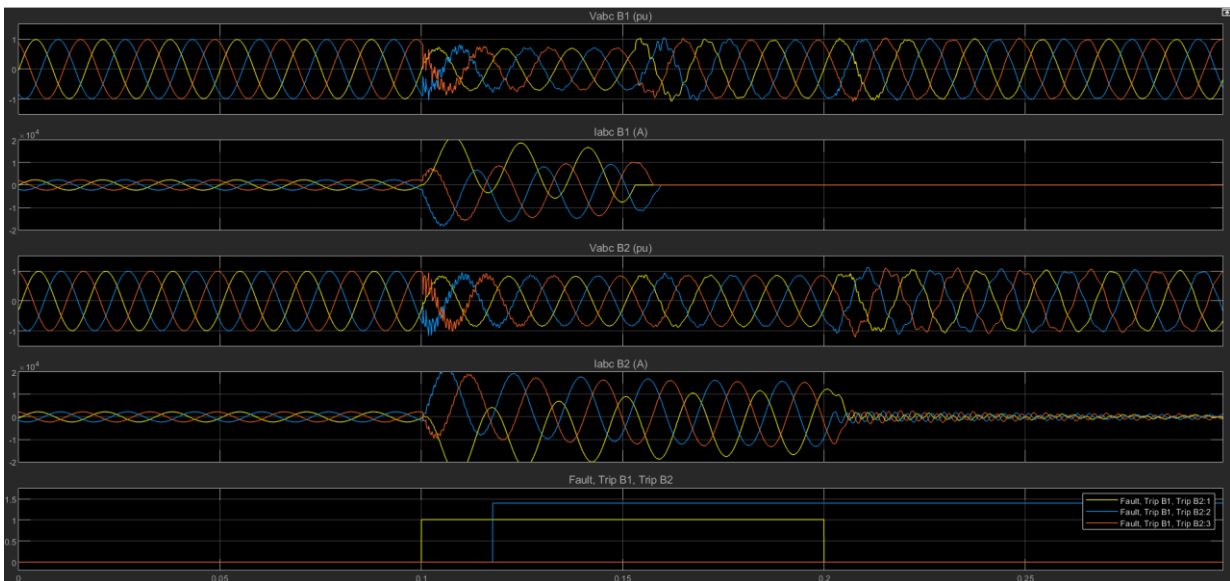
Εικόνα 4.272: Γραφική απεικόνιση των παραμέτρων “Vabc_B1”, “Iabc_B1”, “Vabc_B2”, “Iabc_B1”, “Trip_B1”, “Trip_B2” και “Fault_Signal” κατά το διφασικό προς γη σφάλμα.

4. Τριφασικό χωρίς γη σφάλμα:



Εικόνα 4.273: Γραφική απεικόνιση των παραμέτρων “ V_{abc_B1} ”, “ I_{abc_B1} ”, “ V_{abc_B2} ”, “ I_{abc_B1} ”, “ $Trip_B1$ ”, “ $Trip_B2$ ” και “ $Fault_Signal$ ” κατά το τριφασικό χωρίς γη σφάλμα.

5. Τριφασικό με γη σφάλμα:



Εικόνα 4.274: Γραφική απεικόνιση των παραμέτρων “ V_{abc_B1} ”, “ I_{abc_B1} ”, “ V_{abc_B2} ”, “ I_{abc_B1} ”, “ $Trip_B1$ ”, “ $Trip_B2$ ” και “ $Fault_Signal$ ” κατά το τριφασικό προς γη σφάλμα.

5^ο Κεφάλαιο

Εγχειρίδιο χρήσης εκτελέσιμου αρχείου

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, αρχικά θα παρουσιάσουμε τον τρόπο ορισμού των απαιτούμενων παραμέτρων της προσομοίωσης στα διάφορα πεδία. Στην συνέχεια, θα αναδειχθεί η διαδικασία επιλογής του είδους του σφάλματος που θα πλήξει την γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και η διαδικασία εποπτείας των τάσεων, των ρευμάτων και της ισχύος που διακινείται σε όλα τα στάδια του ηλεκτρικού δικτύου.

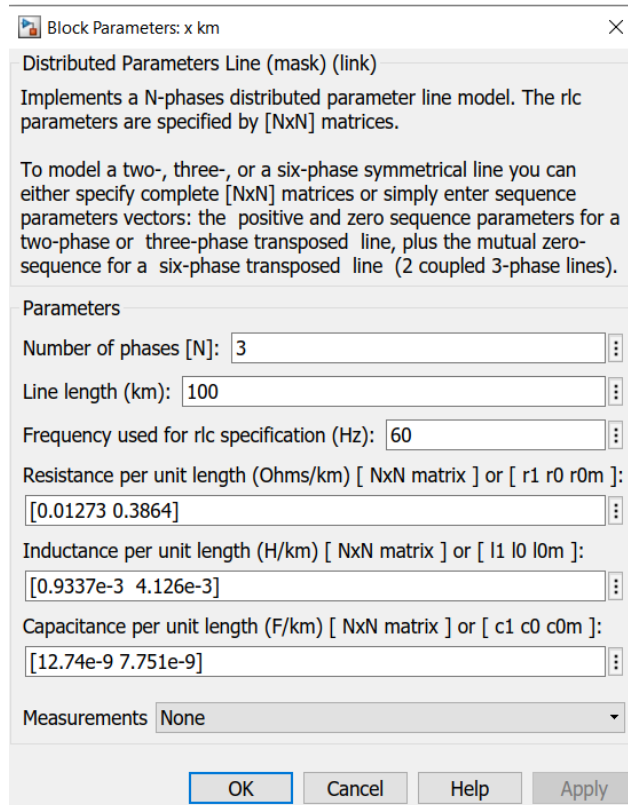
5.2 Ορισμός απαιτούμενων παραμέτρων

- Βήμα 1

Αρχικά το πρώτο που παρατηρούμε είναι πως πάνω αριστερά αναγράφεται “Discrete” και από κάτω ο χρόνος δειγματοληψίας. Ο χρόνος δειγματοληψίας έχει περασθεί σαν μεταβλητή η οποία έχει ορισθεί στο Matlab (Workspace) με τιμή $Ts_Power=3.2552083333333333e-05$ second. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η προσομοίωση είναι διακριτού χρόνου (Discrete Time). Μπορεί να οριστεί οποιοσδήποτε χρόνος επιθυμούμε αρκεί να είναι συμβατός με τις απαιτήσεις της προσομοίωσης. Σε επόμενα βήματα θα χρειαστεί να ορίσουμε χρόνους δειγματοληψίας διαφόρων παραμέτρων.

- Βήμα 2

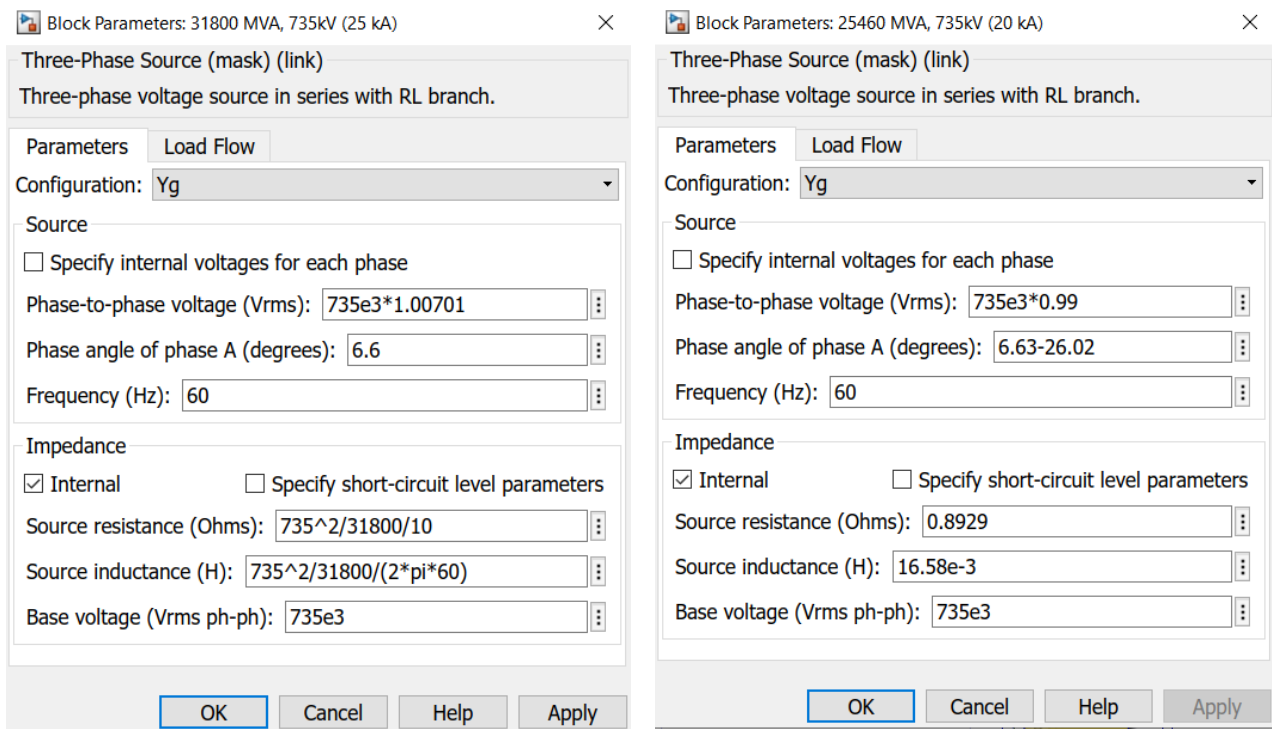
Οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αναπαρίστανται ως Line 1 και Line 2 με μπλε χρώμα. Η κάθε μια γραμμή χωρίζεται σε δύο μέρη, αριστερά και δεξιά του σημείου σφάλματος, όπου το κάθε ένα από αυτά επιτρέπει τον δικό του προσδιορισμό παραμέτρων. Κάνοντας διπλό κλικ σε οποιοδήποτε από τα τέσσερα μπλε block των γραμμών, μπορούμε να καθορίσουμε τον αριθμό των φάσεων τους, το μήκος τους, τη συχνότητα του ρεύματος που τις διαρρέει και την ειδική αντίσταση, επαγωγή και χωρητικότητα τους. Δίνονται ενδεικτικά κάποιες τιμές παραμέτρων.



Εικόνα 5.1: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Distributed Parameters Line” block.

- Βήμα 3

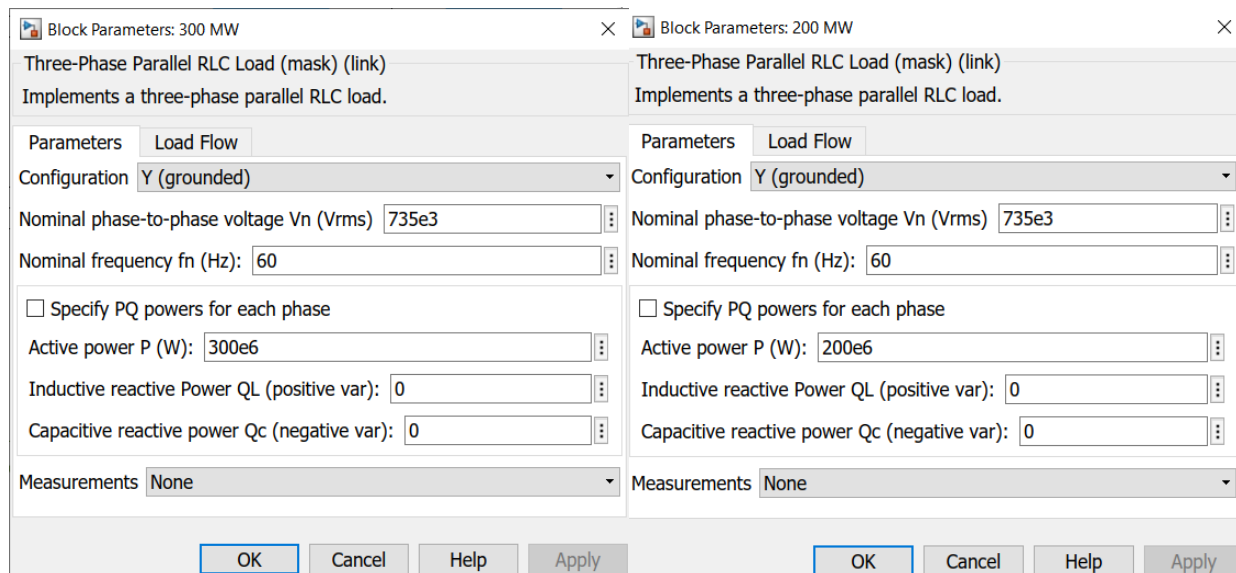
Στα άκρα των γραμμών, στους ζυγούς B1 και B2 του σχήματος δηλαδή, συνδέονται τριφασικές πηγές τάσεως και τριφασικά φορτία. Κάνοντας διπλό κλικ σε κάθε μια πηγή μπορούμε να ορίσουμε ξεχωριστά την rms τιμή της πολικής τάσης που παρέχει, τη φασική γωνία της φάσης A, τη συχνότητα και την εσωτερική αντίσταση και αντίδραση της. Παρατίθενται ενδεικτικά παράμετροι για τις δύο πηγές στους ζυγούς B1 και B2.



Εικόνα 5.2: Παράθυρα ορισμού παραμέτρων των “Three-Phase Source” blocks.

- Βήμα 4

Ομοίως, κάνοντας διπλό κλικ στα φορτία μπορούμε να ορίσουμε τον τρόπο σύνδεσης τους (αστέρας ή τρίγωνο), την ονομαστική πολική τάση τους, την ονομαστική συχνότητα καθώς και την ενεργό και άεργο ισχύ που καταναλώνουν.

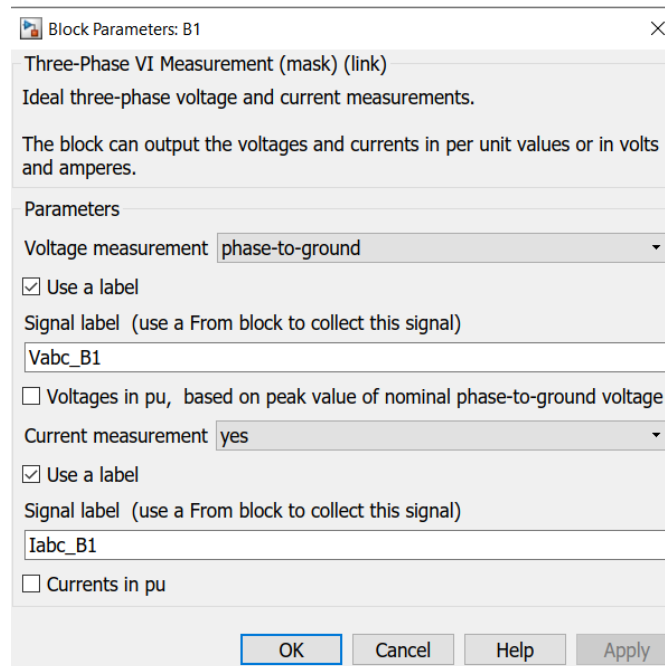


Εικόνα 5.3: Παράθυρα ορισμού παραμέτρων των “Three-Phase Parallel RLC load” blocks.

- Βήμα 5

Οι ζυγοί B1 και B2 αποτελούν από μόνοι τους blocks-μετρητές που μετράνε φασικές ή πολικές τάσεις και ρεύματα στο σημείο που βρίσκονται. Αποθηκεύουν τις μετρήσεις αυτές στις μεταβλητές Vabc_B1, Vabc_B2, Iabc_B1, Iabc_B2 τις οποίες τις δέχονται ως εισόδους οι ηλεκτρονόμοι όπως θα

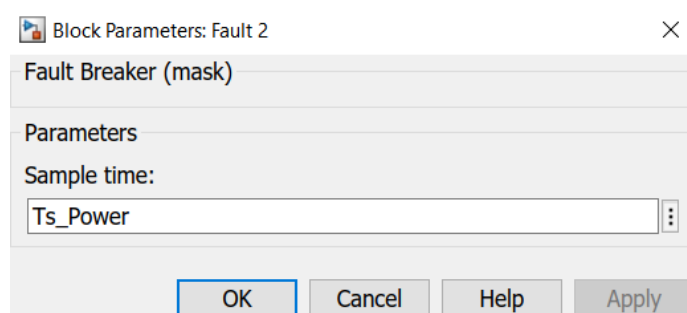
αναλύσουμε παρακάτω. Η περιοχή δήλωσης παραμέτρων ανοίγει με διπλό κλικ πάνω στους ζυγούς B1, B2.



Εικόνα 5.4: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Three-Phase VI Measurements” block.

- Βήμα 6

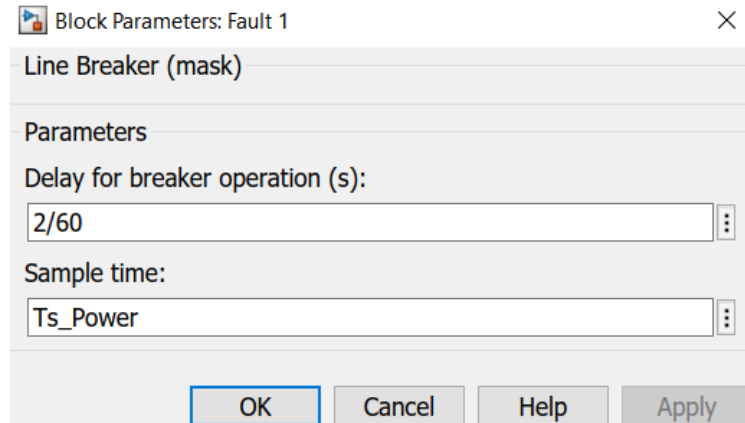
Τα κόκκινα blocks “Fault L1” και “Fault L2” στο ενδιάμεσο των γραμμών προκειμένου να μοντελοποιηθούν με σωστό χρονισμό το σφάλμα πρέπει να είναι ορισμένα με τον χρόνο δειγματοληψίας της προσομοίωσης (Ts_Power).



Εικόνα 5.5: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Fault Breaker” block.

- Βήμα 7

Πατώντας με διπλό κλικ πάνω στους διακόπτες Brk1 και Brk2 (Line Breakers) μπορούμε να ορίσουμε τον χρόνο αντίδρασης τους σε δευτερόλεπτα (καθυστέρηση λειτουργίας) και τον χρόνο δειγματοληψίας υπό τον οποίο λειτουργούν. Ο χρόνος δειγματοληψίας είναι αυτός της προσομοίωσης (Ts_Power).



Εικόνα 5.6: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Line Breaker” block.

- Βήμα 8

Οι τελευταίες παράμετροι που μένει να ορισθούν πριν ξεκινήσουμε την προσομοίωση είναι οι ηλεκτρονόμοι αποστάσεως τύπου Mho στους ζυγούς B1 και B2 με ονομασίες MHO_Relay_B1 και MHO_Relay_B2 αντίστοιχα. Πατώντας διπλό κλικ πάνω τους ανοίγει και εδώ το παράθυρο δήλωσης παραμέτρων. Σε αυτό το παράθυρο μπορούμε να καθορίσουμε τις ζώνες προστασίας ως ποσοστά της γραμμής (Zone 1 και Zone 2) , τις χρονικές καθυστερήσεις λειτουργίας (Tripping delays) των ηλεκτρονόμων για τις ζώνες 1 και 2 αντίστοιχα, το μήκος της γραμμής, τις αντιστάσεις και αντιδράσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας ανά χιλιόμετρο (η αρνητική ακολουθία θεωρείται ίση με την θετική) και φυσικά τη θεμελιώδη συχνότητα του δικτύου και τον χρόνο δειγματοληψίας. Ο χρόνος δειγματοληψίας στο συγκεκριμένο παράδειγμα έχει εισαχθεί από πίνακες στο Matlab και έχει πάρει την τιμή $Ts_Control = 5.208333333333333e-04$ second. Προφανώς είναι μεγαλύτερος από τον χρόνο δειγματοληψίας της προσομοίωσης Ts_Power .

Block Parameters: Digital Distance Protection Relay (MHO type)1

Digital Distance Protection Relay (MHO type) (mask)

Parameters

Mode of operation: Protection of zone 1 and 2

Tripping delay (s): [Zone1 Zone2]

[0.5/60 4/60]

Protected zones in % of line impedance: [Zone1 Zone2]

[80 120]

Line length (km) :

200

Positive and zero-sequence line resistance [R1 R0] (ohm/km)

[0.01273 0.3864]

Positive and zero-sequence line Inductance [L1 L0] (H/km) :

[0.9337e-3 4.126e-3]

Fundamental frequency (hz) :

60

Sample time:

Ts_Control

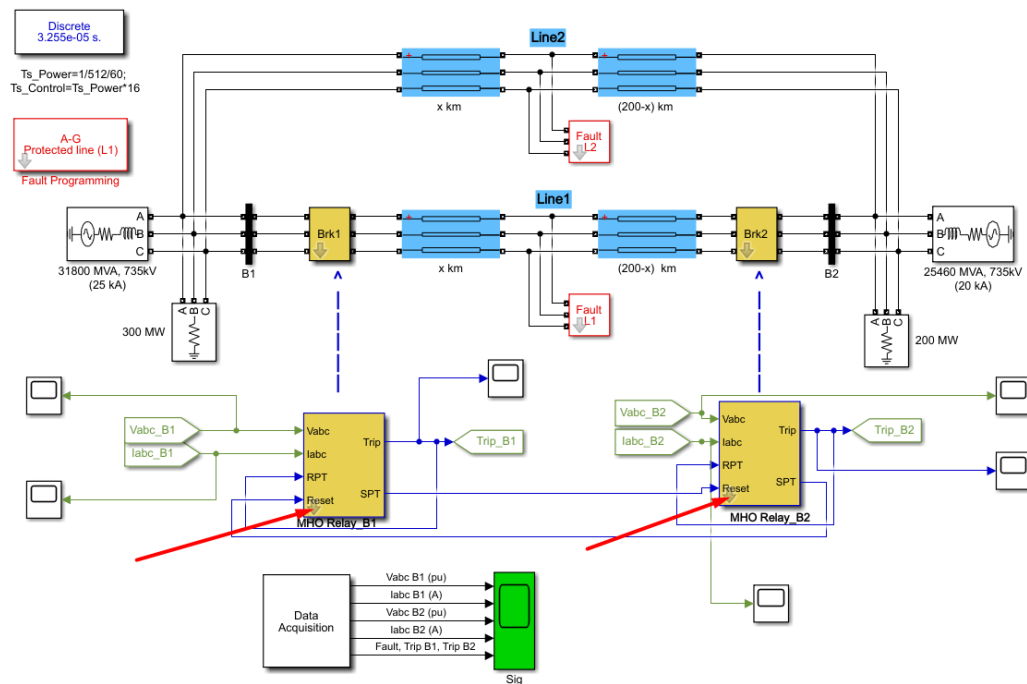
☐ Plot Impedance locus

OK Cancel Help Apply

Εικόνα 5.7: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Digital Distance Protection Relay (MHO type)” block.

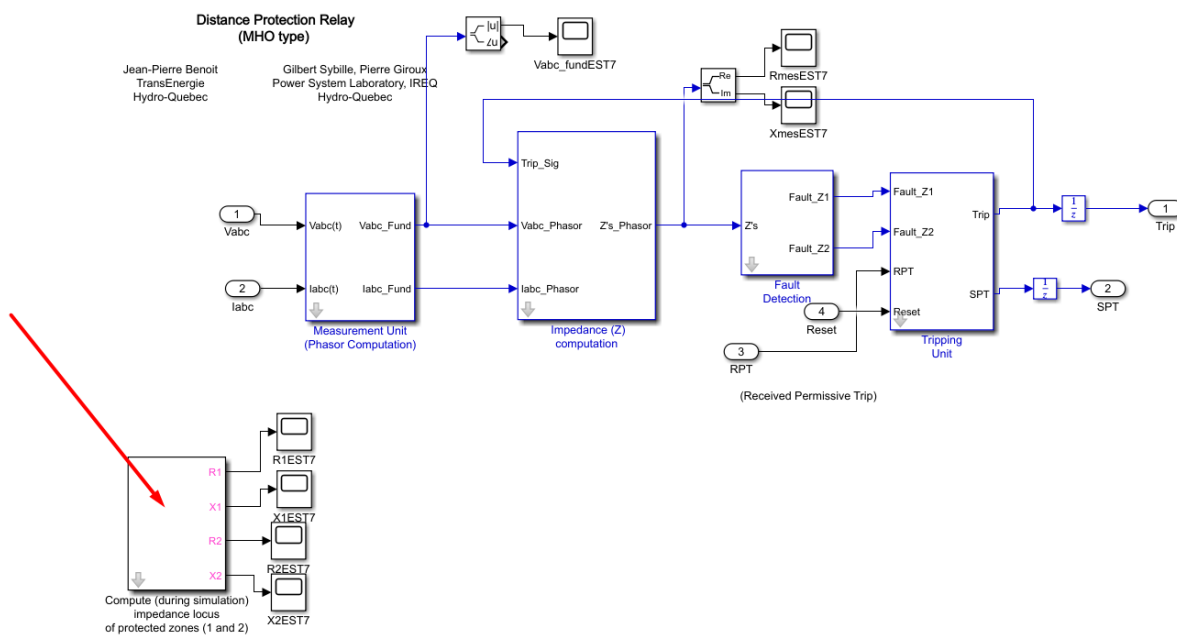
- Βήμα 9

Στους ηλεκτρονόμους προστασίας αποστάσεως μπορούμε να ορίσουμε τους κύκλους Mho που επιθυμούμε. Κάνουμε αριστερό κλικ στο κάτω αριστερά μέρος των κίτρινων block MHO_Relay_B1 και MHO_Relay_B2 (Look inside mask):



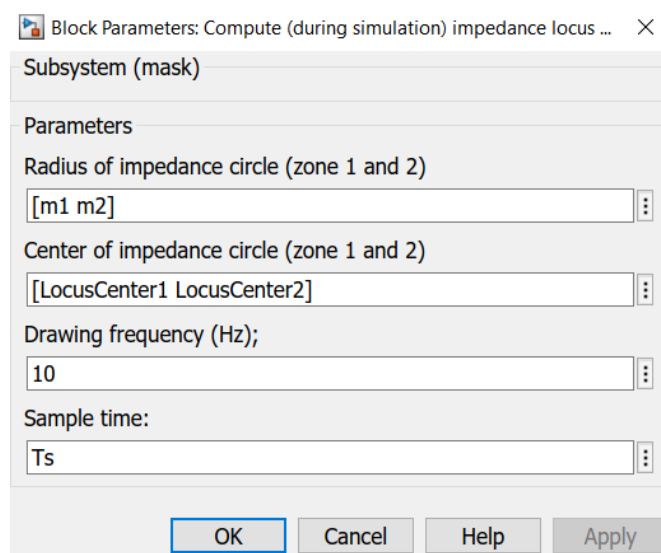
Εικόνα 5.8: Πεδία “Look inside mask” των “MHO Relay_B1” και “MHO Relay_B2” blocks.

Στο υποσύστημα που μεταβήκαμε κάνουμε διπλό κλικ στο block “ Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and 2) “



Εικόνα 5.9: “Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and2)” block.

και μας ανοίγει το εξής παράθυρο παραμετροποίησης.



Εικόνα 5.10: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Compute (during simulation) impedance locus of protected zones (1 and2)” block.

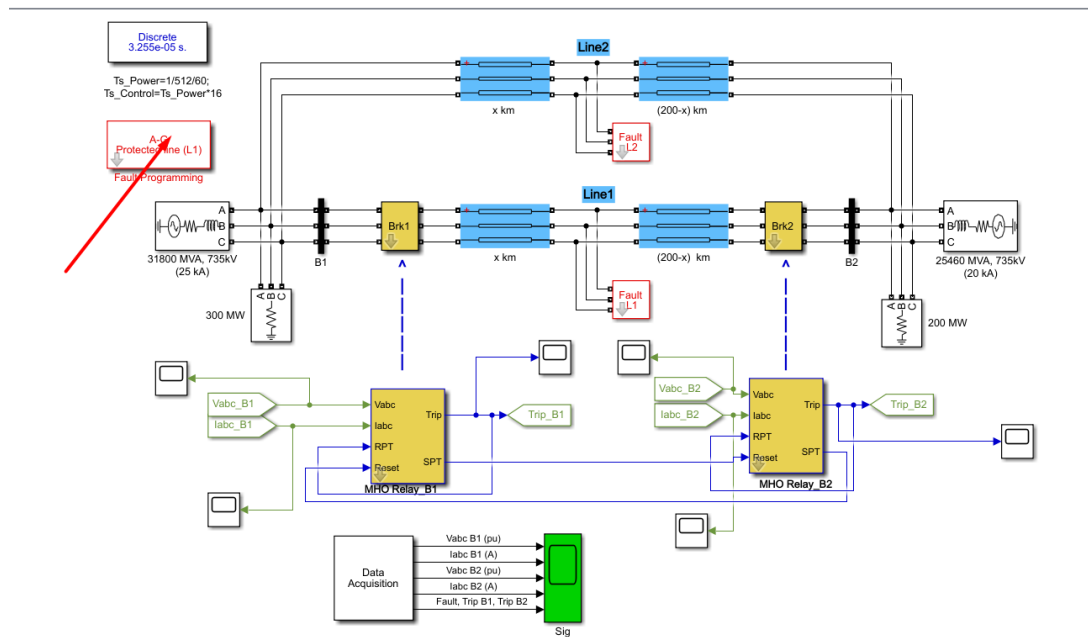
Μπορούμε πλέον να ορίσουμε τις ακτίνες και τα κέντρα των κύκλων M_{ho} που επιθυμούμε καθώς επίσης την συχνότητα και τον χρόνο δειγματοληψίας. Ο προσδιορισμός των απαιτούμενων παραμέτρων έχει ολοκληρωθεί. Θα δούμε παρακάτω πως μπορούμε να επιλέξουμε το είδος των σφαλμάτων που θα πλήττουν την γραμμή και πως με εποπτικό τρόπο θα μπορούμε να παρακολουθούμε τις μεταβλητές του συστήματος σε όλα τα στάδια του.

5.3 Επιλογή είδους σφάλματος στις τριφασικές γραμμές *Line 1* ή *Line 2*

Τα είδη σφαλμάτων που μπορούν να συμβούν σε μια τριφασική γραμμή είναι πέντε.

Μονοφασικό προς γη	A-G
Διφασικό χωρίς γη	BC
Διφασικό με γη	BC-G
Τριφασικό χωρίς γη	ABC
Τριφασικό με γη	ABC-G

Κάνουμε διπλό κλικ στο κόκκινο block με όνομα Fault Programming:

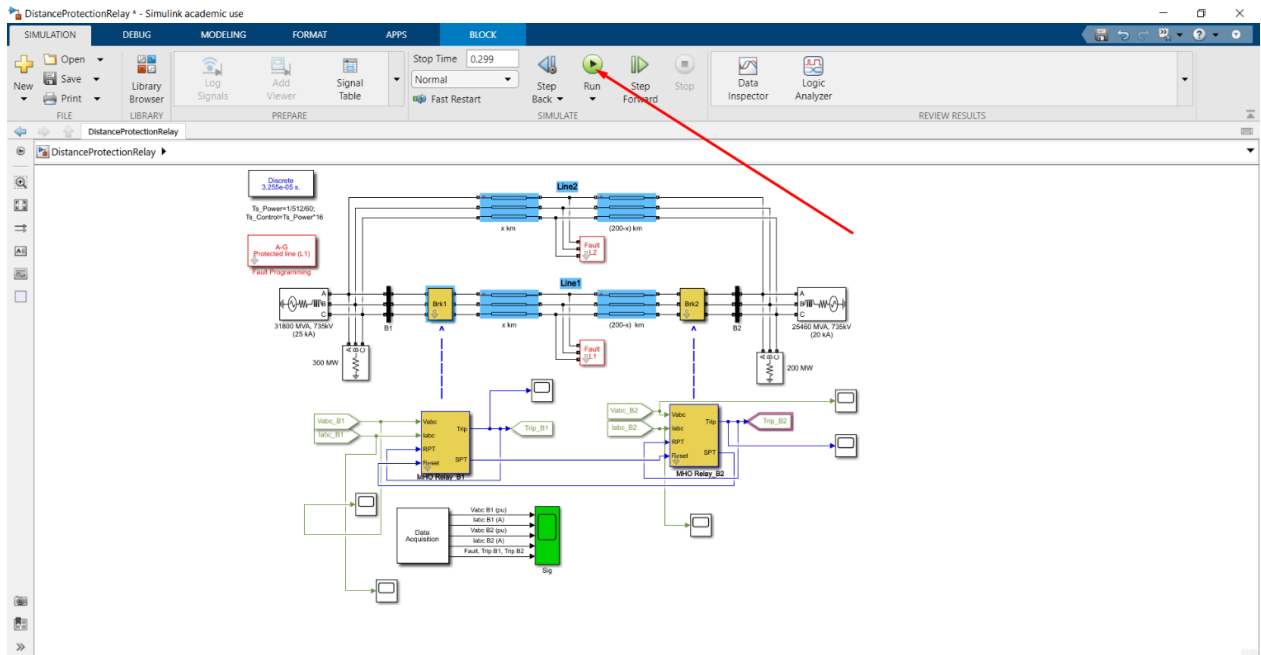


Εικόνα 5.11: “Fault Programming” block.

Στο μενού που ανοίγει μπορούμε να επιλέξουμε το είδος σφάλματος που επιθυμούμε (Fault type) , τη γραμμή που θέλουμε να συμβεί το σφάλμα (Fault Location), τη χρονική διάρκεια του σφάλματος (Fault timing σε seconds) και το χρόνο δειγματοληψίας, ο οποίος είναι αυτός της προσομοίωσης ιδανικά.

Εικόνα 5.12: Παράθυρο ορισμού παραμέτρων του “Fault Programming” block.

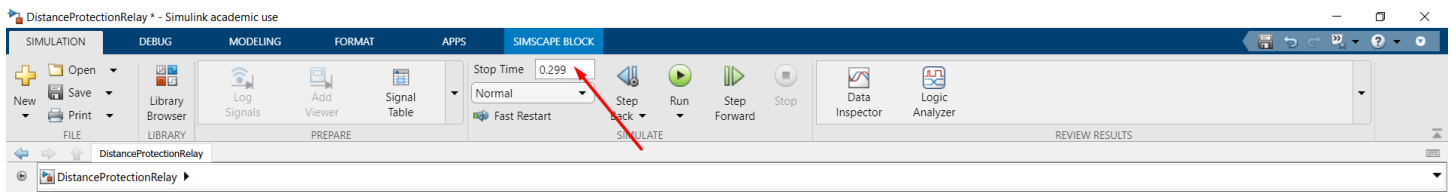
Πλέον, έχουν συμπληρωθεί όλα τα απαραίτητα πεδία. Μπορούμε να τρέξουμε την προσομοίωση από το κουμπί run στην καρτέλα “Simulation”.



Εικόνα 5.13: Συντόμευση “Run” για εκκίνηση της προσομοίωσης.

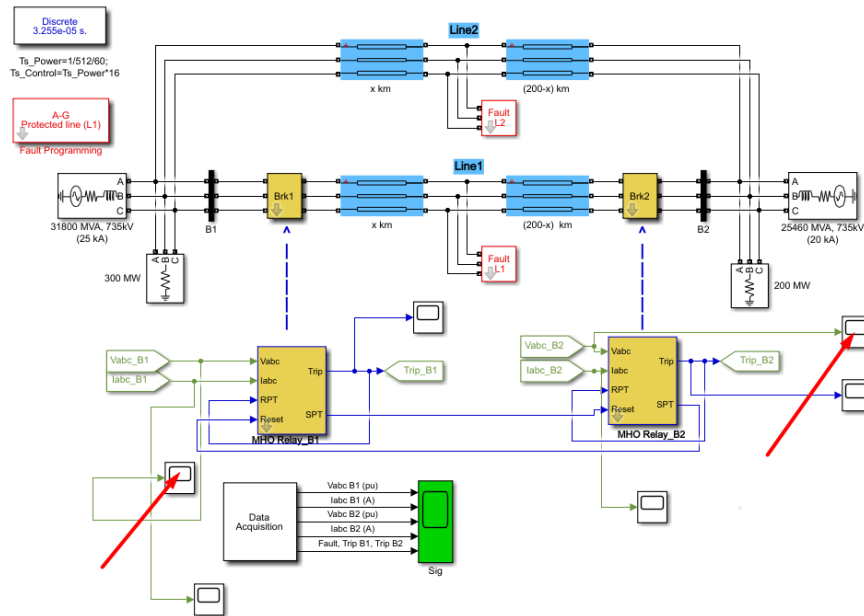
5.4 Εποπτεία τάσεων, ρευμάτων και ισχύος σε όλα τα στάδια του ηλεκτρικού δικτύου

Ο χρόνος για τον οποίο πραγματοποιείται η προσομοίωση ορίζεται ως Stop Time και ρυθμίζεται από την καρτέλα simulation στο εξής σημείο της οθόνης:

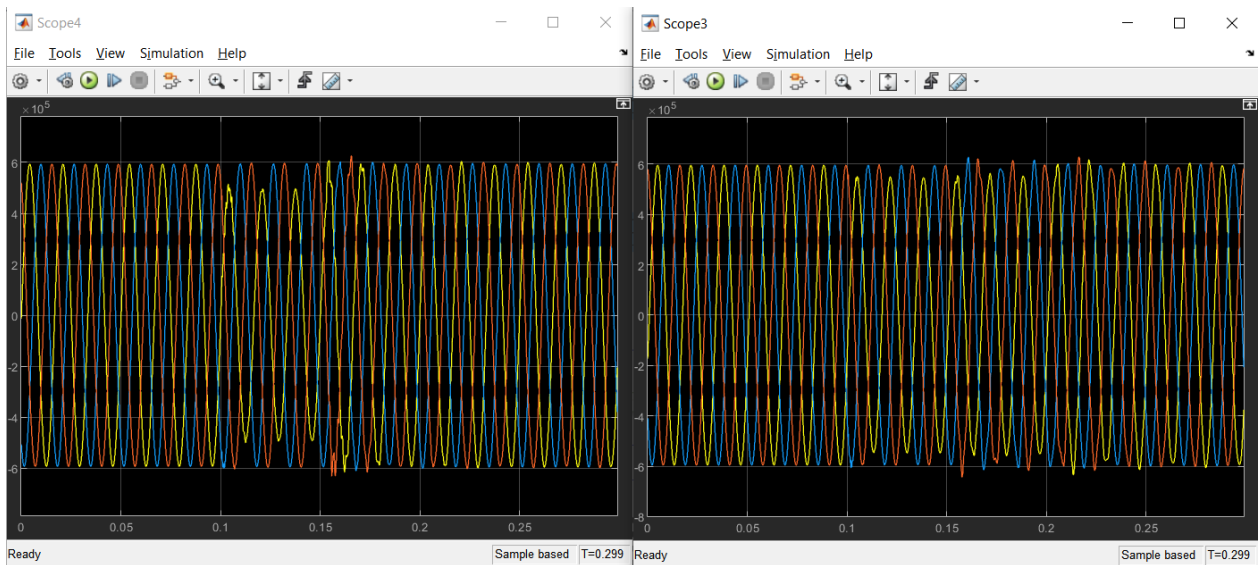


Εικόνα 5.14: Πεδίο “Stop Time” στην καρτέλα “Simulation” μέσω του οποίου ορίζεται η διάρκεια της προσομοίωσης.

Πρέπει να φροντίσουμε το Stop Time να είναι κατάλληλο ώστε να μπορούμε αφενός να παρατηρούμε το βραχυκύκλωμα σε ολόκληρη τη διάρκεια του και αφετέρου να φαίνονται με ακρίβεια οι μεταβατικές του καταστάσεις. Σε διάφορα σημεία του συστήματος έχουν τοποθετηθεί scores από την βιβλιοθήκη του Simulink ώστε να παρακολουθείται η συμπεριφορά των μεταβλητών που μας ενδιαφέρουν. Για παράδειγμα, αν θέλουμε να παρατηρήσουμε τις τάσεις των ζυγών B1 και B2 από την αρχή του χρόνου μέχρι και το Stop Time πατάμε διπλό κλικ πάνω στα scores που τους αντιστοιχούν.

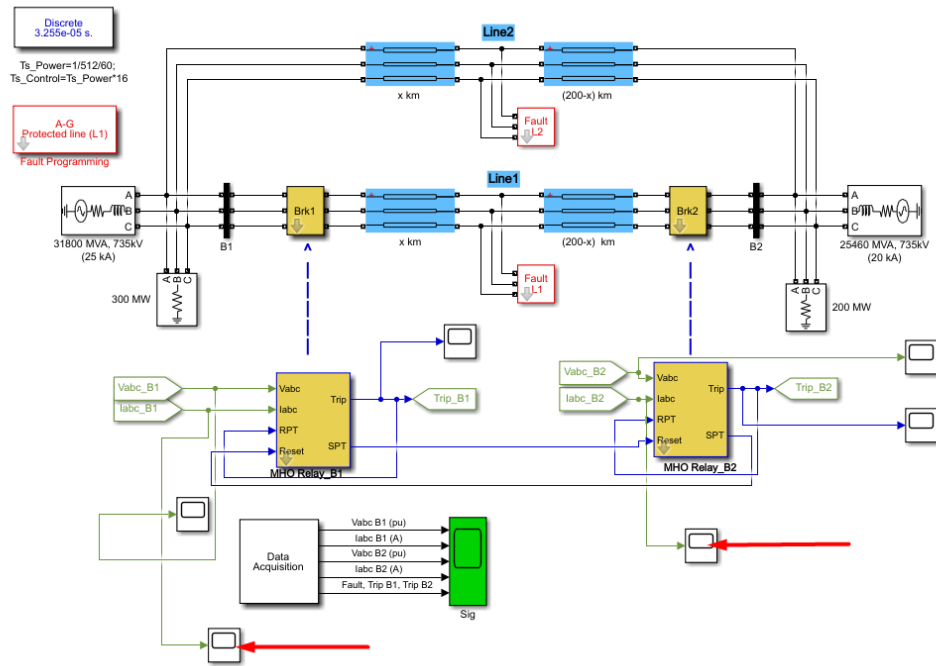


Εικόνα 5.15: “Scope” blocks για την εποπτεία των τάσεων “Vabc_B1” και “Vabc_B2”.

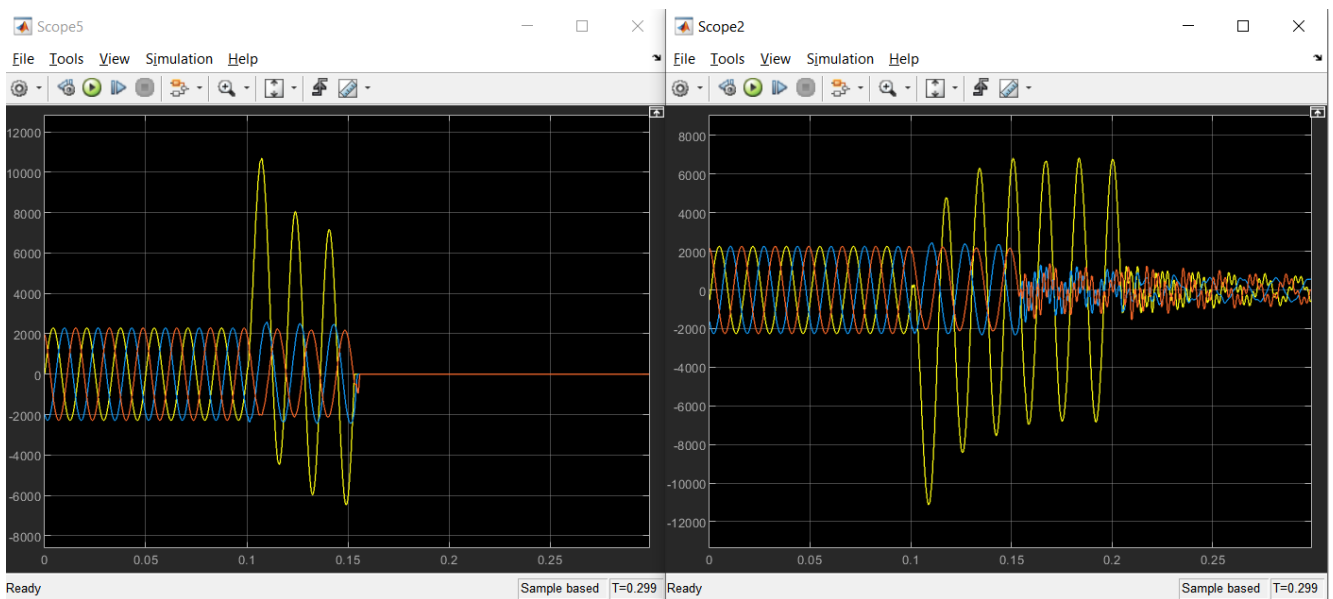


Εικόνα 5.16: Γραφική απεικόνιση των τάσεων “Vabc_B1” και “Vabc_B2” κατά το βραχυκύκλωμα.

Αμα θέλουμε να παρατηρήσουμε τα ρεύματα που διέρχονται από τους ζυγούς B1 και B2 ομοίως πατάμε διπλό κλικ πάνω στα scopes που τους αντιστοιχούν.

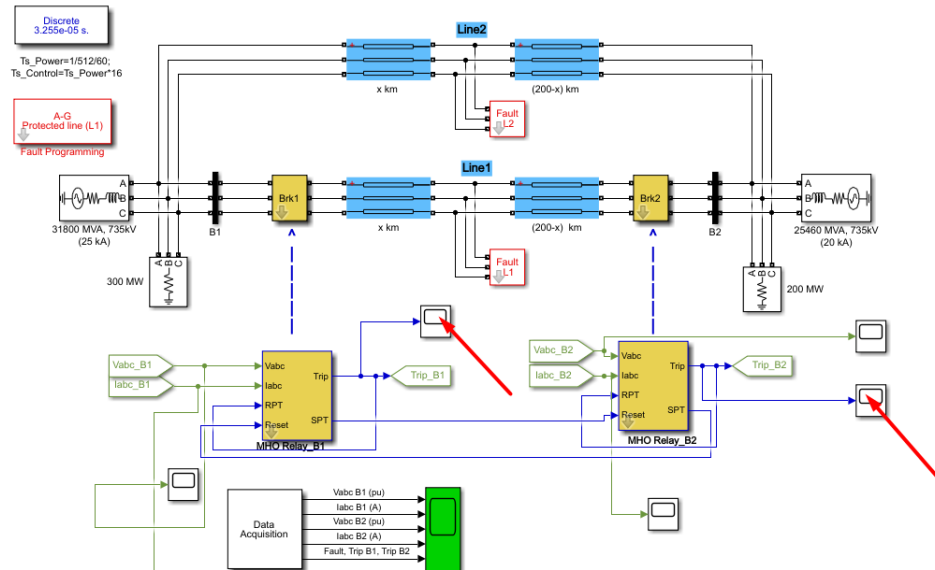


Εικόνα 5.17: “Scope” blocks για την εποπτεία των ρευμάτων “Iabc_B1” και “Iabc_B2”.

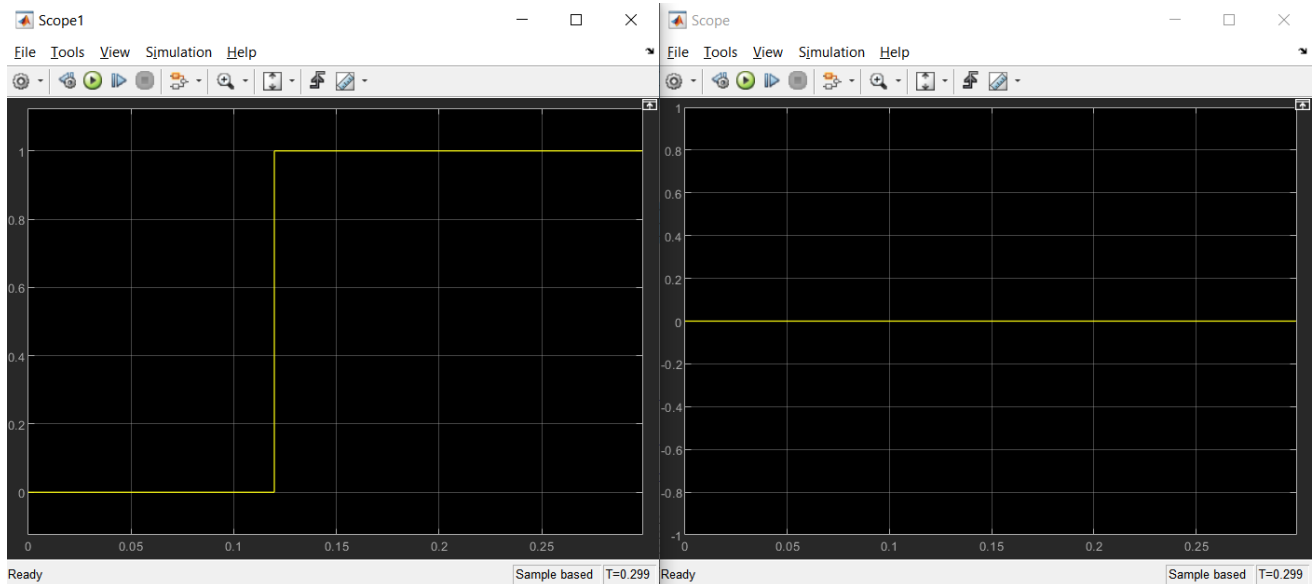


Εικόνα 5.18: Γραφική απεικόνιση των ρευμάτων “Iabc_B1” και “Iabc_B2” κατά το βραχυκύκλωμα.

Για να δούμε ποιος ηλεκτρονόμος πήρε παλμό έναυσης ώστε να ανοίξει τους διακόπτες με τους οποίους επικοινωνεί πατάμε διπλό κλικ στα εξής σημεία (“Scope” blocks).



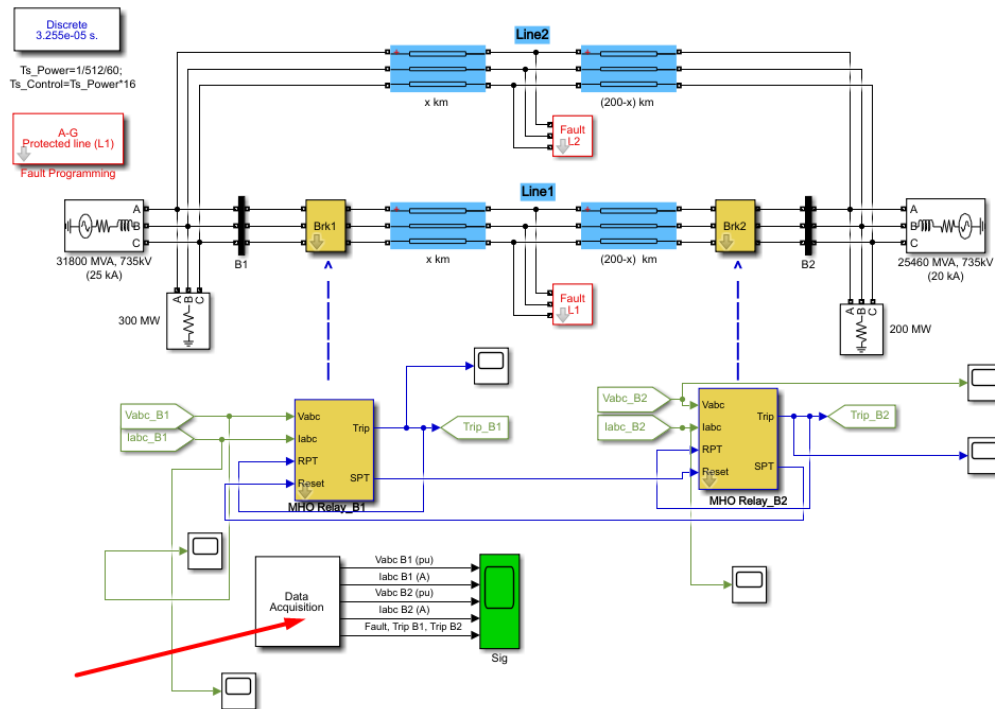
Εικόνα 5.19: “Scope” blocks για την εποπτεία των παλμών “Trip_B1” και “Trip_B2”.



Εικόνα 5.20: Γραφική απεικόνιση των παλμών “Trip_B1” και “Trip_B2” κατά το βραχυκύκλωμα.

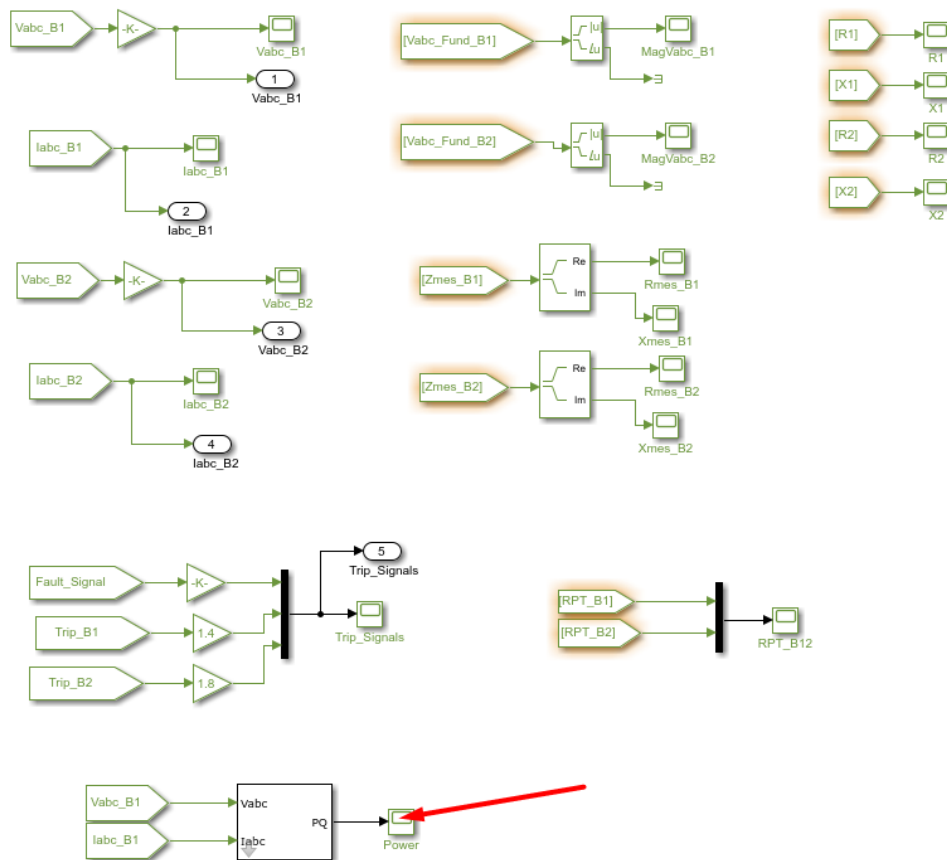
Τέλος, μπορούμε να παρατηρήσουμε τις ισχύς που διακινούνται μέσα από τον ζυγό B1 με τον εξής τρόπο:

1. Κάνουμε διπλό κλικ στο block “Data Acquisition” κάτω αριστερά στην οθόνη.



Εικόνα 5.21: “Data Acquisition” block.

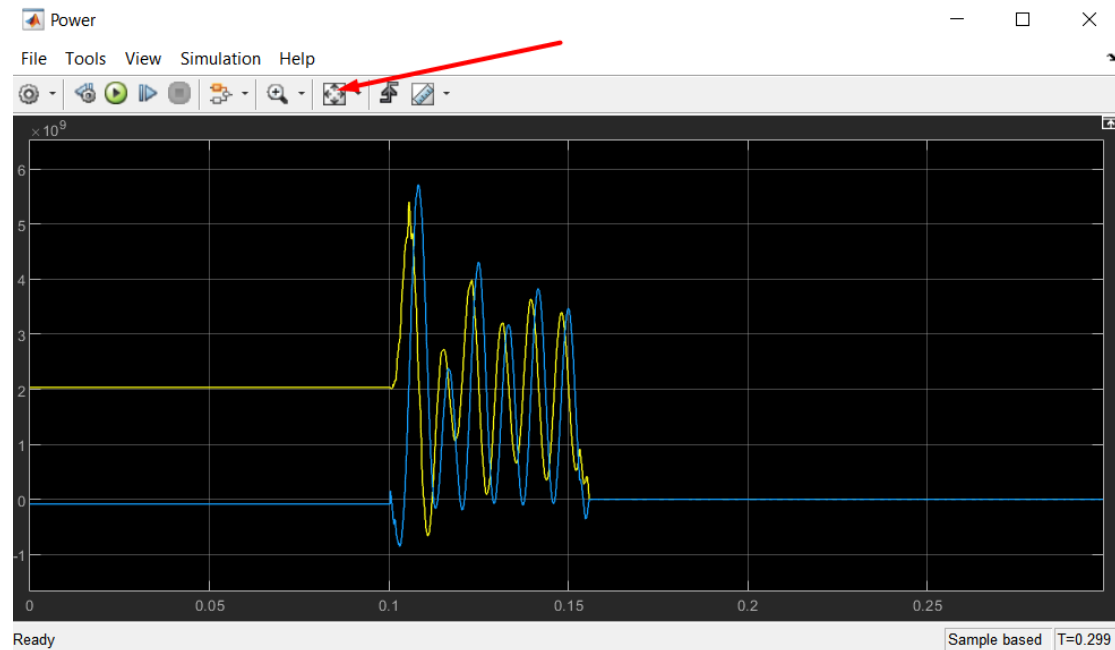
2. Στο υποσύστημα που ανοίχτηκε κάνουμε διπλό κλικ κάτω αριστερά στο scope “Power”.



Εικόνα 5.22: “Scope” block “Power” για την εποπτεία της ισχύος που διακινείται μέσω του ζυγού B1.

3. Είναι πολύ πιθανό όταν προβληθούν οι κυματομορφές να είναι εκτός κλίμακας, για να ορίσουμε σωστή κλίμακα, στο παράθυρο που έχει πλέον ανοίξει επιλέγουμε “Scale X & Y Axes Limits”.

4.



***Εικόνα 5.23:** Γραφική απεικόνιση της ισχύος που διακινείται μέσω του ζυγού B1.*

6^ο Κεφάλαιο

Σύγκριση αποτελεσμάτων Mathcad και Simulink

6.1 Γενικά

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η μέθοδος υπολογισμού των σύνθετων αντιστάσεων στη θέση του ηλεκτρονόμου κατά τη διάρκεια διαφόρων βραχυκυκλωμάτων σε γραμμή μεταφοράς μεσαίου μήκους κυκλώματος π. Σε παράρτημα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανωτέρω μεθόδου με τη χρήση του προγραμματιστικού εργαλείου Mathcad. Ταυτόχρονα, στο τέταρτο κεφάλαιο, κατασκευάστηκε εκτελέσιμο αρχείο στο Simulink που προσομοιώνει βραχυκυκλώματα όλων των ειδών και επομένως υπολογίζει και αυτό τις σύνθετες αντιστάσεις στη θέση του ηλεκτρονόμου κατά τη διάρκεια διαφόρων βραχυκυκλωμάτων σε ίδια γραμμή μεταφοράς.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί η σύγκριση των δυο παραπάνω μεθόδων υπολογισμού σύνθετων αντιστάσεων για βραχυκυκλώματα σε διάφορα σημεία της γραμμής, που δίνονται ως ποσοστά $m(\%)$ του συνολικού της μήκους. Πρέπει όμως πρώτα να γίνουν κάποιες παραδοχές. Το μονοφασικό βραχυκύκλωμα θεωρούμε πως συμβαίνει στη φάση a , επομένως η σύνθετη αντίσταση που θα λάβουμε υπόψιν θα είναι μόνο η Z_a . Το διφασικό βραχυκύκλωμα, είτε χωρίς γη είτε προς γη, θεωρούμε πως συμβαίνει στις φάσεις b και c , επομένως η σύνθετη αντίσταση που θα λάβουμε υπόψιν θα είναι η Z_{bc} . Το τριφασικό βραχυκύκλωμα συμβαίνει προφανώς σε όλες τις φάσεις a , b και c , επομένως θα λάβουμε υπόψιν όλες τις σύνθετες αντιστάσεις Z_a , Z_b , Z_c , Z_{ab} , Z_{bc} και Z_{ca} . Όταν το κάθε είδους βραχυκύκλωμα συμβαίνει στο πρώτο μισό τμήμα της γραμμής μεταφοράς, δηλαδή από το ζυγό B_1 έως και το μέσον της γραμμής, τότε ενεργοποιείται ο ηλεκτρονόμος που είναι τοποθετημένος στο ζυγό B_1 , αν και εφόσον ανιχνεύσει την σύνθετη αντίσταση κατά το βραχυκύκλωμα εντός του κύκλου mho του. Αντίστοιχα, όταν το κάθε είδους βραχυκύκλωμα συμβαίνει στο δεύτερο μισό τμήμα της γραμμής μεταφοράς, δηλαδή από το μέσον της γραμμής έως και το ζυγό B_2 , τότε ενεργοποιείται ο ηλεκτρονόμος που είναι τοποθετημένος στο ζυγό B_2 αν και εφόσον ανιχνεύσει την σύνθετη αντίσταση κατά το βραχυκύκλωμα εντός του κύκλου mho του. Η παρούσα ανάλυση δεν ασχολείται με την αντίσταση σφάλματος R_F και συνεπώς λαμβάνεται μηδενική.

6.2 Βραχυκύκλωμα στο 10% του μήκους της γραμμής μεταφοράς

Με τη χρήση του προγραμματιστικού εργαλείου Mathcad και σύμφωνα με τη μεθοδολογία του τρίτου κεφαλαίου, υπολογίζονται όλες οι απαιτούμενες σύνθετες αντιστάσεις στην θέση ηλεκτρονόμου του ζυγού B_1 για βραχυκύκλωμα στο 10% του μήκους της γραμμής μεταφοράς μετρώντας από το ζυγό B_1 . Παρατίθεται ο πίνακας αποτελεσμάτων:

m=0,1	Mathcad				
A-G	R	X	Z	Z	arg(Z)
Za	0,253	7,038	0,253+i7,038	7,042	87,939
BC	R	X	Z	Z	arg(Z)
Zbc	0,255	7,042	0,255+i7,042	7,047	87,928
BC-G	R	X	Z	Z	arg(Z)
Zbc	0,255	7,042	0,255+i7,042	7,047	87,928
ABC	R	X	Z	Z	arg(Z)
Za	0,255	7,042	0,255+i7,042	7,047	87,929
Zb	0,255	7,042	0,255+i7,042	7,047	87,929
Zc	0,255	7,043	0,255+i7,043	7,047	87,93
Zab	0,255	7,042	0,255+i7,042	7,047	87,928
Zbc	0,255	7,042	0,255+i7,042	7,047	87,928
Zca	0,255	7,042	0,255+i7,042	7,047	87,928

Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα σύνθετων αντιστάσεων στο Mathcad για βραχυκυκλώματα στο 10% του μήκους της γραμμής μεταφοράς.

Με τη χρήση του προγραμματιστικού εργαλείου Simulink και σύμφωνα με τη μέθοδο προσομοίωσης του τέταρτου κεφαλαίου, υπολογίζονται όλες οι απαιτούμενες σύνθετες αντιστάσεις στην θέση ηλεκτρονόμου του ζυγού B_1 για βραχυκύκλωμα στο 10% του μήκους της γραμμής μεταφοράς μετρώντας από το ζυγό B_1 . Παρατίθεται ο πίνακας αποτελεσμάτων:

m=0,1	Simulink				
A-G	R	X	Z	Z	arg(Z)
Za	1,506	7,104	1,506+i7,104	7,262	78,03
BC	R	X	Z	Z	arg(Z)
Zbc	0,4352	11,48	0,4352+i11,48	11,49	87,83
BC-G	R	X	Z	Z	arg(Z)
Zbc	0,4352	11,48	0,4352+i11,48	11,49	87,83
ABC	R	X	Z	Z	arg(Z)
Za	3,191	8,224	3,191+i8,224	8,822	68,8
Zb	0	9,436	0+i9,436	9,44	91,83
Zc	2,554	11,82	2,554+i11,82	12,1	77,81
Zab	1,115	7,812	1,115+i7,812	7,892	81,88
Zbc	0,4352	11,48	0,4352+i11,48	11,49	87,83
Zca	3,893	10,2	3,893+i10,2	10,91	69,1

Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα σύνθετων αντιστάσεων στο Simulink για βραχυκυκλώματα στο 10% του μήκους της γραμμής μεταφοράς.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των προγραμματιστικών εργαλείων Mathcad και Simulink θα πραγματοποιηθεί υπολογίζοντας το σχετικό ποσοστιαίο σφάλμα σύμφωνα με την σχέση:

$$\varepsilon(\%) = \frac{Z_{\text{Simulink}} - Z_{\text{Mathcad}}}{Z_{\text{Simulink}}} 100$$

όπου Z_{Simulink} είναι η υπολογιζόμενη σύνθετη αντίσταση στο περιβάλλον του Simulink, ενώ Z_{Mathcad} είναι η υπολογιζόμενη σύνθετη αντίσταση στο περιβάλλον του Mathcad.

m=0,1	Σφάλμα ε(%) μεταξύ Simulink και Mathcad	
A-G	Z	arg(Z)
Za	3,029468466	-12,69896194
BC	Z	arg(Z)
Zbc	38,66840731	-0,111579187
BC-G	Z	arg(Z)
Zbc	38,66840731	-0,111579187
ABC	Z	arg(Z)
Za	20,12015416	-27,80377907
Zb	25,34957627	4,24806708
Zc	41,76033058	-13,00604035
Zab	10,70704511	-7,38641915
Zbc	38,66840731	-0,111579187
Zca	35,40788268	-27,24746744

Πίνακας 6.3: Υπολογισμός σφαλμάτων των μέτρων και γωνιών των σύνθετων αντιστάσεων μεταξύ Simulink και Mathcad για βραχυκυκλώματα στο 10% του μήκους της γραμμής μεταφοράς.

Είναι φανερό ότι για βραχυκυκλώματα πολύ κοντά στον διακόπτη, ορισμένες (ή και όλες για τριφασικό βραχυκύκλωμα) από τις τάσεις τροφοδοτήσεως των ηλεκτρονόμων μηδενίζονται (σχεδόν), οπότε και οι υπολογιζόμενες σύνθετες αντιστάσεις είναι εσφαλμένες.

6.3 Βραχυκύκλωμα στο 20% του μήκους της γραμμής μεταφοράς

Με τη χρήση του προγραμματιστικού εργαλείου Mathcad και σύμφωνα με τη μεθοδολογία του τρίτου κεφαλαίου, υπολογίζονται όλες οι απαιτούμενες σύνθετες αντιστάσεις στην θέση ηλεκτρονόμου του ζυγού B_1 για βραχυκύκλωμα στο 20% του μήκους της γραμμής μεταφοράς μετρώντας από το ζυγό B_1 . Παρατίθεται ο πίνακας αποτελεσμάτων:

m=0,2	Mathcad				
A-G	R	X	Z	Z	arg(Z)
Za	0,504	14,08	0,504+i14,08	14,089	87,948
BC	R	X	Z	Z	arg(Z)
Zbc	0,511	14,099	0,211+i14,099	14,108	87,926
BC-G	R	X	Z	Z	arg(Z)
Zbc	0,511	14,099	0,511+i14,099	14,108	87,926
ABC	R	X	Z	Z	arg(Z)
Za	0,51	14,098	0,51+i14,098	14,107	87,927
Zb	0,511	14,099	0,511+i14,099	14,108	87,923
Zc	0,51	14,099	0,51+i14,099	14,109	87,928
Zab	0,511	14,099	0,511+i14,099	14,108	87,923
Zbc	0,511	14,099	0,511+i14,099	14,108	87,923
Zca	0,511	14,099	0,511+i14,099	14,108	87,923

Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα σύνθετων αντιστάσεων στο Mathcad για βραχυκυκλώματα στο 20% του μήκους της γραμμής μεταφοράς.

Με τη χρήση του προγραμματιστικού εργαλείου Simulink και σύμφωνα με τη μέθοδο προσομοίωσης του τέταρτου κεφαλαίου, υπολογίζονται όλες οι απαιτούμενες σύνθετες αντιστάσεις στην θέση ηλεκτρονόμου του ζυγού B_1 για βραχυκύκλωμα στο 20% του μήκους της γραμμής μεταφοράς μετρώντας από το ζυγό B_1 . Παρατίθεται ο πίνακας αποτελεσμάτων:

m=0,2	Simulink				
A-G	R	X	Z	Z	arg(Z)
Za	2,542	13,23	2,542+i13,23	13,47	79,12
BC	R	X	Z	Z	arg(Z)
Zbc	1,363	16,48	1,363+i16,48	16,53	85,27
BC-G	R	X	Z	Z	arg(Z)
Zbc	1,607	17,28	1,607+i17,28	17,35	84,68
ABC	R	X	Z	Z	arg(Z)
Za	3,095	14,62	3,095+i14,62	14,94	78,04
Zb	0,8944	16	0,8944+i16	16,02	86,8
Zc	3,136	17,33	3,136+i17,33	17,61	79,75
Zab	1,58	14,71	1,58+i14,71	14,8	83,87
Zbc	1,607	17,28	1,607+i17,28	17,35	84,68
Zca	3,945	15,96	3,945+i15,96	16,44	76,12

Πίνακας 6.5: Αποτελέσματα σύνθετων αντιστάσεων στο Simulink για βραχυκυκλώματα στο 20% του μήκους της γραμμής μεταφοράς.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των προγραμματιστικών εργαλείων Mathcad και Simulink θα πραγματοποιηθεί υπολογίζοντας το σχετικό ποσοστιαίο σφάλμα σύμφωνα με την σχέση:

$$\varepsilon(\%) = \frac{Z_{\text{Simulink}} - Z_{\text{Mathcad}}}{Z_{\text{Simulink}}} 100$$

όπου Z_{Simulink} είναι η υπολογιζόμενη σύνθετη αντίσταση στο περιβάλλον του Simulink, ενώ Z_{Mathcad} είναι η υπολογιζόμενη σύνθετη αντίσταση στο περιβάλλον του Mathcad.

m=0,2	Σφάλμα ε(%) μεταξύ Simulink και Mathcad	
A-G	Z	arg(Z)
Za	-4,595397179	-11,15773509
BC	Z	arg(Z)
Zbc	14,65214761	-3,114811774
BC-G	Z	arg(Z)
Zbc	18,68587896	-3,833254606
ABC	Z	arg(Z)
Za	5,575635877	-12,66914403
Zb	11,93508115	-1,293778802
Zc	19,88074957	-10,25454545
Zab	4,675675676	-4,832478836
Zbc	18,68587896	-3,829711856
Zca	14,18491484	-15,50578035

Πίνακας 6.6: Υπολογισμός σφαλμάτων των μέτρων και γωνιών των σύνθετων αντιστάσεων μεταξύ Simulink και Mathcad για βραχυκυκλώματα στο 20% του μήκους της γραμμής μεταφοράς.

6.4 Βραχυκύκλωμα στο 30% του μήκους της γραμμής μεταφοράς

Με τη χρήση του προγραμματιστικού εργαλείου Mathcad και σύμφωνα με τη μεθοδολογία του τρίτου κεφαλαίου, υπολογίζονται όλες οι απαιτούμενες σύνθετες αντιστάσεις στην θέση ηλεκτρονόμου του ζυγού B_1 για βραχυκύκλωμα στο 30% του μήκους της γραμμής μεταφοράς μετρώντας από το ζυγό B_1 . Παρατίθεται ο πίνακας αποτελεσμάτων:

m=0,3	Mathcad				
A-G	R	X	Z	Z	arg(Z)
Za	0,754	21,142	0,754+i21,142	21,155	87,956
BC	R	X	Z	Z	arg(Z)
Zbc	0,768	21,184	0,768+i21,184	21,198	87,922
BC-G	R	X	Z	Z	arg(Z)
Zbc	0,768	21,184	0,768+i21,184	21,198	87,922
ABC	R	X	Z	Z	arg(Z)
Za	0,768	21,183	0,768+i21,183	21,197	87,923
Zb	0,77	21,184	0,77+i21,184	21,198	87,92
Zc	0,768	21,185	0,768+i21,185	21,199	87,925
Zab	0,768	21,184	0,768+i21,184	21,198	87,922
Zbc	0,768	21,184	0,768+i21,184	21,198	87,922
Zca	0,768	21,184	0,768+i21,184	21,198	87,922

Πίνακας 6.7: Αποτελέσματα σύνθετων αντιστάσεων στο Mathcad για βραχυκυκλώματα στο 30% του μήκους της γραμμής μεταφοράς.

Με τη χρήση του προγραμματιστικού εργαλείου Simulink και σύμφωνα με τη μέθοδο προσομοίωσης του τέταρτου κεφαλαίου, υπολογίζονται όλες οι απαιτούμενες σύνθετες αντιστάσεις στην θέση ηλεκτρονόμου του ζυγού B_1 για βραχυκύκλωμα στο 30% του μήκους της γραμμής μεταφοράς μετρώντας από το ζυγό B_1 . Παρατίθεται ο πίνακας αποτελεσμάτων:

m=0,3	Simulink				
A-G	R	X	Z	Z	arg(Z)
Za	3,374	19,29	3,374+i19,29	19,58	80,08
BC	R	X	Z	Z	arg(Z)
Zbc	1,074	21,35	1,074+i21,35	21,37	87,12
BC-G	R	X	Z	Z	arg(Z)
Zbc	1,46	23,27	1,46+i23,27	23,32	86,41
ABC	R	X	Z	Z	arg(Z)
Za	3,547	21,46	3,547+i21,46	21,75	80,61
Zb	1,267	21,97	1,267+i21,97	22,01	86,7
Zc	2,751	23,82	2,751+i23,82	23,98	83,41
Zab	2,229	21,1	2,229+i21,1	21,22	83,97
Zbc	1,46	23,27	1,46+i23,27	23,32	86,41
Zca	3,888	22,88	3,888+i22,88	23,2	80,35

Πίνακας 6.8: Αποτελέσματα σύνθετων αντιστάσεων στο Simulink για βραχυκυκλώματα στο 30% του μήκους της γραμμής μεταφοράς.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των προγραμματιστικών εργαλείων Mathcad και Simulink θα πραγματοποιηθεί υπολογίζοντας το σχετικό ποσοστιαίο σφάλμα σύμφωνα με την σχέση:

$$\varepsilon(\%) = \frac{Z_{Simulink} - Z_{Mathcad}}{Z_{Simulink}} 100$$

όπου $Z_{Simulink}$ είναι η υπολογιζόμενη σύνθετη αντίσταση στο περιβάλλον του Simulink, ενώ $Z_{Mathcad}$ είναι η υπολογιζόμενη σύνθετη αντίσταση στο περιβάλλον του Mathcad.

m=0,3	Σφάλμα ε(%) μεταξύ Simulink και Mathcad	
A-G	Z	arg(Z)
Za	-8,04392237	-9,835164835
BC	Z	arg(Z)
Zbc	0,804866635	-0,92056933
BC-G	Z	arg(Z)
Zbc	9,09948542	-1,749797477
ABC	Z	arg(Z)
Za	2,542528736	-9,072075425
Zb	3,689232167	-1,407151096
Zc	11,5971643	-5,413020022
Zab	0,103675778	-4,706442777
Zbc	9,09948542	-1,749797477
Zca	8,629310345	-9,423771002

Πίνακας 6.9: Υπολογισμός σφαλμάτων των μέτρων και γωνιών των σύνθετων αντιστάσεων μεταξύ Simulink και Mathcad για βραχυκυκλώματα στο 30% του μήκους της γραμμής μεταφοράς.

6.5 Βραχυκύκλωμα στο 40% του μήκους της γραμμής μεταφοράς

Με τη χρήση του προγραμματιστικού εργαλείου Mathcad και σύμφωνα με τη μεθοδολογία του τρίτου κεφαλαίου, υπολογίζονται όλες οι απαιτούμενες σύνθετες αντιστάσεις στην θέση ηλεκτρονόμου του ζυγού B_1 για βραχυκύκλωμα στο 40% του μήκους της γραμμής μεταφοράς μετρώντας από το ζυγό B_1 . Παρατίθεται ο πίνακας αποτελεσμάτων:

m=0,4	Mathcad				
A-G	R	X	Z	Z	arg(Z)
Za	1,005	28,237	1,005+i28,237	28,255	87,962
BC	R	X	Z	Z	arg(Z)
Zbc	1,03	28,313	1,03+i28,313	28,331	87,918
BC-G	R	X	Z	Z	arg(Z)
Zbc	1,03	28,313	1,03+i28,313	28,331	87,918
ABC	R	X	Z	Z	arg(Z)
Za	1,029	28,311	1,029+i28,311	28,33	87,918
Zb	1,031	28,313	1,031+i28,313	28,332	87,915
Zc	1,028	28,314	1,028+i28,314	28,332	87,92
Zab	1,03	28,313	1,03+i28,313	28,331	87,918
Zbc	1,03	28,313	1,03+i28,313	28,331	87,918
Zca	1,03	28,313	1,03+i28,313	28,331	87,918

Πίνακας 6.10: Αποτελέσματα σύνθετων αντιστάσεων στο Mathcad για βραχυκυκλώματα στο 40% του μήκους της γραμμής μεταφοράς.

Με τη χρήση του προγραμματιστικού εργαλείου Simulink και σύμφωνα με τη μέθοδο προσομοίωσης του τέταρτου κεφαλαίου, υπολογίζονται όλες οι απαιτούμενες σύνθετες αντιστάσεις στην θέση ηλεκτρονόμου του ζυγού B_1 για βραχυκύκλωμα στο 40% του μήκους της γραμμής μεταφοράς μετρώντας από το ζυγό B_1 . Παρατίθεται ο πίνακας αποτελεσμάτων:

m=0,4	Simulink				
A-G	R	X	Z	Z	arg(Z)
Za	3,81	25,2	3,81+i25,2	25,49	81,4
BC	R	X	Z	Z	arg(Z)
Zbc	0,991	28,3	0,991+i28,3	28,32	87,99
BC-G	R	X	Z	Z	arg(Z)
Zbc	0,9677	28,24	0,9677+i28,24	28,25	88,04
ABC	R	X	Z	Z	arg(Z)
Za	3,665	27,76	3,665+i27,76	28	82,48
Zb	1,504	27,03	1,504+i27,03	27,07	86,82
Zc	1,807	29,39	1,807+i29,39	29,45	86,48
Zab	2,752	26,81	2,752+i26,81	26,95	84,14
Zbc	0,9677	28,24	0,9677+i28,24	28,25	88,04
Zca	3,274	29,13	3,274+i29,13	29,32	83,59

Πίνακας 6.11: Αποτελέσματα σύνθετων αντιστάσεων στο Simulink για βραχυκυκλώματα στο 40% του μήκους της γραμμής μεταφοράς.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των προγραμματιστικών εργαλείων Mathcad και Simulink θα πραγματοποιηθεί υπολογίζοντας το σχετικό ποσοστιαίο σφάλμα σύμφωνα με την σχέση:

$$\varepsilon(\%) = \frac{Z_{Simulink} - Z_{Mathcad}}{Z_{Simulink}} 100$$

όπου $Z_{Simulink}$ είναι η υπολογιζόμενη σύνθετη αντίσταση στο περιβάλλον του Simulink, ενώ $Z_{Mathcad}$ είναι η υπολογιζόμενη σύνθετη αντίσταση στο περιβάλλον του Mathcad.

m=0,4	Σφάλμα ε(%) μεταξύ Simulink και Mathcad	
A-G	Z	arg(Z)
Za	-10,84739113	-8,061425061
BC	Z	arg(Z)
Zbc	-0,038841808	0,08182748
BC-G	Z	arg(Z)
Zbc	-0,286725664	0,138573376
ABC	Z	arg(Z)
Za	-1,178571429	-6,593113482
Zb	-4,66198744	-1,261230131
Zc	3,796264856	-1,665124884
Zab	-5,124304267	-4,490135488
Zbc	-0,286725664	0,138573376
Zca	3,373124147	-5,177652829

Πίνακας 6.12: Υπολογισμός σφαλμάτων των μέτρων και γωνιών των σύνθετων αντιστάσεων μεταξύ Simulink και Mathcad για βραχυκυκλώματα στο 40% του μήκους της γραμμής μεταφοράς.

6.6 Βραχυκύκλωμα στο 50% του μήκους της γραμμής μεταφοράς

Με τη χρήση του προγραμματιστικού εργαλείου Mathcad και σύμφωνα με τη μεθοδολογία του τρίτου κεφαλαίου, υπολογίζονται όλες οι απαιτούμενες σύνθετες αντιστάσεις στην θέση ηλεκτρονόμου του ζυγού B_1 για βραχυκύκλωμα στο 50% του μήκους της γραμμής μεταφοράς μετρώντας από το ζυγό B_1 . Παρατίθεται ο πίνακας αποτελεσμάτων:

m=0,5	Mathcad				
A-G	R	X	Z	Z	arg(Z)
Za	1,256	35,381	1,256+i35,381	35,403	87,967
BC	R	X	Z	Z	arg(Z)
Zbc	1,295	35,499	1,295+i35,499	35,523	87,911
BC-G	R	X	Z	Z	arg(Z)
Zbc	1,295	35,499	1,295+i35,499	35,523	87,911
ABC	R	X	Z	Z	arg(Z)
Za	1,294	35,498	1,294+i35,498	35,521	87,912
Zb	1,297	35,5	1,297+i35,5	35,523	87,908
Zc	1,294	35,501	1,294+i35,501	35,524	87,913
Zab	1,295	35,499	1,295+i35,499	35,523	87,911
Zbc	1,295	35,499	1,295+i35,499	35,523	87,911
Zca	1,295	35,499	1,295+i35,499	35,523	87,911

Πίνακας 6.13: Αποτελέσματα σύνθετων αντιστάσεων στο Mathcad για βραχυκυκλώματα στο 50% του μήκους της γραμμής μεταφοράς.

Με τη χρήση του προγραμματιστικού εργαλείου Simulink και σύμφωνα με τη μέθοδο προσομοίωσης του τέταρτου κεφαλαίου, υπολογίζονται όλες οι απαιτούμενες σύνθετες αντιστάσεις στην θέση ηλεκτρονόμου του ζυγού B_1 για βραχυκύκλωμα στο 50% του μήκους της γραμμής μεταφοράς μετρώντας από το ζυγό B_1 . Παρατίθεται ο πίνακας αποτελεσμάτων:

m=0,5	Simulink				
A-G	R	X	Z	Z	arg(Z)
Za	2,927	30,72	2,927+i30,72	30,859	84,557
BC	R	X	Z	Z	arg(Z)
Zbc	1,049	35,4	1,049+i35,4	35,416	88,3
BC-G	R	X	Z	Z	arg(Z)
Zbc	1,181	35,1	1,181+i35,1	35,12	88,07
ABC	R	X	Z	Z	arg(Z)
Za	3,91	33,73	3,91+i33,73	33,95587	83,388
Zb	1,383	33,6	1,383+i33,6	33,62845	87,643
Zc	2,493	36,06	2,493+i36,06	36,14607	86,045
Zab	2,672	33	2,672+i33	33,108	85,37
Zbc	1,181	35,1	1,181+i35,1	35,11986	88,07
Zca	3,94	35,28	3,94+i35,28	35,49932	83,628

Πίνακας 6.14: Αποτελέσματα σύνθετων αντιστάσεων στο Simulink για βραχυκυκλώματα στο 50% του μήκους της γραμμής μεταφοράς.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των προγραμματιστικών εργαλείων Mathcad και Simulink θα πραγματοποιηθεί υπολογίζοντας το σχετικό ποσοστιαίο σφάλμα σύμφωνα με την σχέση:

$$\varepsilon(\%) = \frac{Z_{\text{Simulink}} - Z_{\text{Mathcad}}}{Z_{\text{Simulink}}} 100$$

όπου Z_{Simulink} είναι η υπολογιζόμενη σύνθετη αντίσταση στο περιβάλλον του Simulink, ενώ Z_{Mathcad} είναι η υπολογιζόμενη σύνθετη αντίσταση στο περιβάλλον του Mathcad.

m=0,5	Σφάλμα ε(%) μεταξύ Simulink και Mathcad	
A-G	Z	arg(Z)
Za	-14,7250397	-4,03278262
BC	Z	arg(Z)
Zbc	-0,302123334	0,440543601
BC-G	Z	arg(Z)
Zbc	-1,147494305	0,180538208
ABC	Z	arg(Z)
Za	-4,609311012	-5,425241042
Zb	-5,633769555	-0,302362995
Zc	1,720999559	-2,170957057
Zab	-7,294313448	-2,976455429
Zbc	-1,147889536	0,180538208
Zca	-0,066694405	-5,12149041

Πίνακας 6.15: Υπολογισμός σφαλμάτων των μέτρων και γωνιών των σύνθετων αντιστάσεων μεταξύ Simulink και Mathcad για βραχυκυκλώματα στο 50% του μήκους της γραμμής μεταφοράς.

Παρατηρούμε ότι όταν η απόσταση του σημείου βραχυκύκλωσης από την θέση του ηλεκτρονόμου είναι μικρή, εν προκειμένω 10% και 20% του μήκους της γραμμής μεταφοράς, το σφάλμα μεταξύ των τιμών των σύνθετων αντιστάσεων των μεθόδων προσομοίωσης Simulink και Mathcad είναι μεγάλο καθώς οι τάσεις τροφοδοτήσεως των ηλεκτρονόμων είναι πολύ μικρές, οπότε και οι υπολογιζόμενες σύνθετες αντιστάσεις είναι εσφαλμένες. Για μεγαλύτερες αποστάσεις, εν προκειμένω 30%, 40% και 50% του μήκους της γραμμής μεταφοράς, το σφάλμα είναι περιορισμένο.

Για βραχυκυκλώματα σε ποσοστά του μήκους της γραμμής μεταφοράς μεγαλύτερα από 50%, μετρώντας από το ζυγό B_1 , θα ενεργοποιείται ο ηλεκτρονόμος στο ζυγό B_2 αντί για τον ηλεκτρονόμο στο ζυγό B_1 . Οι τιμές των σύνθετων αντιστάσεων που θα υπολογίζει ο ηλεκτρονόμος του ζυγού B_2 θα είναι ίδιες με τις τιμές των σύνθετων αντιστάσεων που θα υπολογίζει ο ηλεκτρονόμος του ζυγού B_1 με μια κατάλληλη αντιστοίχιση των ποσοστών του μήκους της γραμμής. Η αντιστοίχιση είναι η ακόλουθη:

Αντιστοίχιση των ποσοστών του μήκους της γραμμής, μετρώντας από το ζυγό B_1 , που οδηγούν σε ίδιες τιμές σύνθετων αντιστάσεων.	
10%	90%
20%	80%
30%	70%
40%	60%
Ενεργοποίηση ηλεκτρονόμου του ζυγού B_1	Ενεργοποίηση ηλεκτρονόμου του ζυγού B_2

7^ο Κεφάλαιο

Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη προστασίας αποστάσεως γραμμής μεταφοράς μοντέλου μεσαίου μήκους, κυκλώματος π, σε περιβάλλον Mathcad και Simulink. Η ανάλυση περιλάμβανε τον υπολογισμό και την σύνδεση των παραμέτρων των κυκλωμάτων θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας, καθώς και την εύρεση των τιμών των σύνθετων αντιστάσεων στην θέση του ηλεκτρονόμου για τους διάφορους τύπους σφαλμάτων (μονοφασικό, διφασικό και τριφασικό). Επιπλέον, συντάχθηκε οδηγός δημιουργίας και χρήσης εκτελέσιμου αρχείου στο Simulink που αφενός προσομοιώνει βραχυκυκλώματα και ηλεκτρονόμους αποστάσεως σε ένα απλό δίκτυο δύο ζυγών και αφετέρου εποπτεύει τις τάσεις, τα ρεύματα και τη διακίνηση της ισχύος σε όλα τα μέρη του δικτύου.

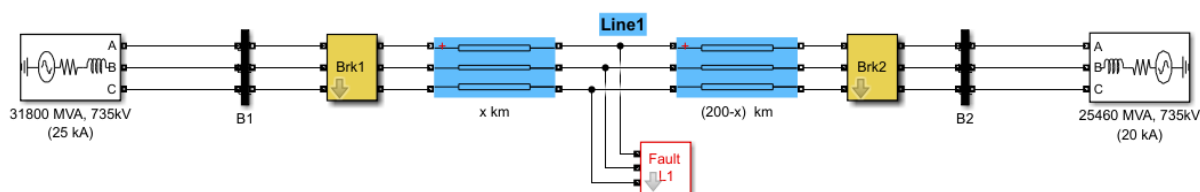
Μέσα από τις προσομοιώσεις, παρατηρήθηκε ότι η ακρίβεια και η αξιοπιστία των προστατευτικών συστημάτων εξαρτώνται σημαντικά από την ακριβή ρύθμιση των παραμέτρων του συστήματος, όπως και από τον τύπο του βραχυκυκλώματος και τη θέση του (σε βραχυκυκλώματα κοντά στους διακόπτες των ηλεκτρονόμων προέκυπταν εσφαλμένες μετρήσεις). Οι προσομοιώσεις στο περιβάλλον του Simulink έδειξαν ότι η χρήση προηγμένων τεχνικών ανάλυσης και σχεδιασμού μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την εποπτεία και συνεπώς την ασφάλεια των ηλεκτρικών δικτύων.

Συνοψίζοντας, η διπλωματική εργασία καταδεικνύει τη σημασία των σύγχρονων μέσων προσομοίωσης και μπορεί να βοηθήσει σπουδαστές και νέους ερευνητές στην εξοικείωση με την εκπόνηση μελετών βραχυκυκλωμάτων σε δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας τα προαναφερόμενα λογισμικά, μέσα από αναλυτικά παραδείγματα και πληθώρα οδηγιών.

Παράρτημα

Ανάλυση πειραματικού μέρους

Στο τρίτο κεφάλαιο έγινε παρουσίαση αναλυτικής μελέτης για τον υπολογισμό των σύνθετων αντιστάσεων στην θέση του ηλεκτρονόμου. Στο παρόν παράρτημα θα εφαρμοστούν οι ανωτέρω εξισώσεις για τα διάφορα είδη βραχυκυκλωμάτων σε ένα πειραματικό δίκτυο. Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Mathcad 15.0 της Mathsoft – PTC. Προτιμήθηκε το συγκεκριμένο εργαλείο έναντι άλλων, διότι δίδει τη δυνατότητα για πλήρη εποπτεία των αποτελεσμάτων σε κάθε στάδιο των πειραμάτων. Επιλέξαμε ένα απλό δίκτυο, αυτό της *Εικόνας Π.1*, στο οποίο υπάρχει μία γραμμή μεταφοράς και στο κάθε άκρο της, αναχώρησης και άφιξης αντίστοιχα, είναι διασυνδεδεμένη μία γεννήτρια με ορισμένη εσωτερική σύνθετη αντίσταση.



Εικόνα Π.1 : Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με το οποίο έγιναν οι δοκιμές.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής. Στην αρχή έγινε εισαγωγή των δεδομένων του συστήματος, δηλαδή των τάσεων των γεννητριών, των σύνθετων αντιστάσεων των γεννητριών, των παραμέτρων της γραμμής μεταφοράς, της απόστασης στην οποία θα συμβεί το βραχυκύκλωμα και τέλος της αντίστασης σφάλματος.

Για τη γεννήτρια στον ζυγό B1:

$$V_{G1} = 4.273 * 10^5 V \text{ (φασική τάση)}$$

$$Z_{G1_1} = Z_{G1_2} = 1.69882 + j16.988\Omega, Z_{G1_0} = 5.09646 + j50.9646\Omega$$

Για τις παραμέτρους της γραμμής:

$$Z_1 = Z_2 = 2.546 + j70.3993\Omega, Z_0 = 77.28 + j311.093\Omega$$

$$Y_1 = Y_2 = j9.6057 * 10^{-4} S, Y_0 = j5.8441 * 10^{-4} S$$

Για τη γεννήτρια στον ζυγό B2:

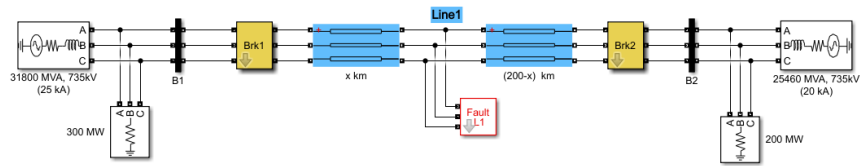
$$V_{G2} = 4.201 * 10^5 V \text{ (φασική τάση)}$$

$$Z_{G2_1} = Z_{G2_2} = 0.8929 + j6.2505\Omega, Z_{G2_0} = 2.6787 + j18.7515$$

Έπειτα, έχοντας εισαγάγει όλα τα δεδομένα γίνεται υπολογισμός του βραχυκυκλώματος με τη βοήθεια των κυκλωμάτων ακολουθίας, ώστε να βρεθούν οι τάσεις και τα ρεύματα στο σημείο του σφάλματος. Ακολουθώντας, μέσω κυκλωματικής θεωρίας στα κυκλώματα ακολουθίας βρίσκονται οι τάσεις και τα ρεύματα ακολουθίας στη θέση του ηλεκτρονόμου. Σε αυτό το σημείο, προχωράμε στον υπολογισμό των σύνθετων αντιστάσεων εφαρμόζοντας τους τύπους που αποδείχθηκαν στη θεωρία για το εκάστοτε βραχυκύκλωμα. Έτσι, για το πειραματικό μέρος, χρειάστηκε να δημιουργηθούν ξεχωριστά αρχεία, ένα για κάθε είδος βραχυκυκλώματος, με τη γραμμή μεταφοράς απεικονισμένη σε μοντέλο μεσαίου μήκους κυκλώματος π.

Μονοφασικό Βραχυκύκλωμα στο Μοντέλο Μεσαίου Μήκους

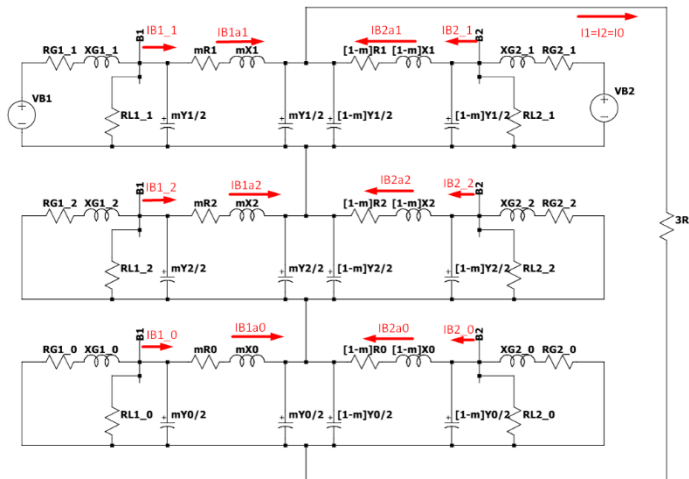
Το δίκτυο που μελετάμε είναι το παρακάτω:



$$a := -0.5 + 0.866i$$

$$A_1 := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -0.5 - 0.866i & -0.5 + 0.866i \\ 1 & -0.5 + 0.866i & -0.5 - 0.866i \end{pmatrix}$$

Η σύνδεση των κυκλωμάτων ακολουθείς με βάση το είδος του σφάλματος (μονοφασικό προς γη):



Τώρα θα ορίσουμε τις παραμέτρους του δικτύου που έχουμε:

Γεννήτρια στον ζυγό B1 (Φασική τάση):

$$V_{G1} := \frac{(740.152 \cdot 10^3)}{\sqrt{3}} \text{ V} = 4.273 \times 10^5 \text{ V}$$

$$R_{G1_1} := 1.69882 \text{ ohm} \quad X_{G1_1} := 16.988 \text{ ohm} \quad Z_{G1_1} := (1.69882 + 16.988i) \text{ ohm} \text{ θετικής ακολουθίας}$$

$$R_{G1_2} := 1.69882 \text{ ohm} \quad X_{G1_2} := 16.988 \text{ ohm} \quad Z_{G1_2} := (1.69882 + 16.988i) \text{ ohm} \text{ αρνητικής ακολουθίας}$$

$$R_{G1_0} := 5.09646 \text{ ohm} \quad X_{G1_0} := 50.9646 \text{ ohm} \quad Z_{G1_0} := (5.09646 + 50.9646i) \text{ ohm} \text{ μηδενικής ακολουθίας}$$

Φορτίο στον ζυγό B1:

Έχει τοποθετηθεί ωμικό φορτίο 300 MW υπό πολική τάση 735 kV, το οποίο όμως δεν συμπεριλαμβάνεται στα κυκλώματα ακολουθίας.

Γραμμή Μεταφοράς:

Η σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς υπολογίζεται ως $Z = R + jX = r + j2\pi f L$.

Τα στοιχεία r , L και L λαμβάνονται από τις παραμέτρους του εκτελέσιμου αρχείου στο Simulink.

$$R_1 := 2.546 \text{ ohm} \quad X_1 := 70.3993 \text{ ohm} \quad Z_1 := (2.546 + 70.3993i) \text{ ohm} \text{ θετικής ακολουθίας}$$

$$R_2 := 2.546 \text{ ohm} \quad X_2 := 70.3993 \text{ ohm} \quad Z_2 := (2.546 + 70.3993i) \text{ ohm} \quad \text{αρνητικής ακολουθίας}$$

$$R_0 := 77.28 \text{ ohm} \quad X_0 := 311.093 \text{ ohm} \quad Z_0 := (77.28 + 311.093i) \text{ ohm} \quad \text{μηδενικής ακολουθίας}$$

Η αγωγιμότητα της γραμμής μεταφοράς υπολογίζεται ως $Y = G + j(1/X_c) = g + j2\pi f C l$.
Τα στοιχεία g, l, f και C λαμβάνονται από τις παραμέτρους του εκτελέσιμου αρχείου στο Simulink.

$$Y_1 := 9.6057i \cdot 10^{-4} \text{ ohm}^{-1} \quad Y_2 := 9.6057i \cdot 10^{-4} \text{ ohm}^{-1} \quad Y_0 := 5.8441i \cdot 10^{-4} \text{ ohm}^{-1}$$

Γεννήτρια στον ζυγό B2 (Φασική τάση):

$$V_{G2} := \frac{(727.65 \cdot 10^3)}{\sqrt{3}} \text{ V} = 4.201 \times 10^5 \text{ V}$$

$$R_{G2_1} := 0.8929 \text{ ohm} \quad X_{G2_1} := 6.2505 \text{ ohm} \quad Z_{G2_1} := (0.8929 + 6.2505i) \text{ ohm} \quad \text{θετικής ακολουθίας}$$

$$R_{G2_2} := 0.8929 \text{ ohm} \quad X_{G2_2} := 6.2505 \text{ ohm} \quad Z_{G2_2} := (0.8929 + 6.2505i) \text{ ohm} \quad \text{αρνητικής ακολουθίας}$$

$$R_{G2_0} := 2.6787 \text{ ohm} \quad X_{G2_0} := 18.7515 \text{ ohm} \quad Z_{G2_0} := (2.6787 + 18.7515i) \text{ ohm} \quad \text{μηδενικής ακολουθίας}$$

Φορτίο στον ζυγό B2:

Έχει τοποθετηθεί ωμικό φορτίο 200 MW υπό πολική τάση 735 kV, το οποίο όμως δεν συμπεριλαμβάνεται στα κυκλώματα ακολουθίας.

Έπειτα, θα ορίσουμε τις παραμέτρους του βραχυκυκλώματος που θέλουμε να μελετήσουμε:

$$m := 0.5 \quad R_F := 0 \text{ ohm}$$

Τώρα είμαστε σε θέση να επιλύσουμε το βραχυκύκλωμα.

Αριστερά του σημείου βραχυκύκλωσης εφαρμόζουμε θεώρημα Thevenin για να εξάγουμε το ισοδύναμο κύκλωμα στα τρία ακολουθιακά κυκλώματα και λαμβάνουμε:

$$Z_{Th1_1} := \frac{\frac{2 \cdot (2 \cdot m \cdot Z_1 + m^2 \cdot Z_1 \cdot Y_1 \cdot Z_{G1_1} + 2 \cdot Z_{G1_1})}{(2 + m \cdot Y_1 \cdot Z_{G1_1}) \cdot m \cdot Y_1}}{\left(\frac{2}{m \cdot Y_1} \right) + \left(\frac{2 \cdot m \cdot Z_1 + m^2 \cdot Z_1 \cdot Y_1 \cdot Z_{G1_1} + 2 \cdot Z_{G1_1}}{2 + m \cdot Y_1 \cdot Z_{G1_1}} \right)}$$

$$Z_{Th1_1} = (3.062 + 52.918i) \Omega \quad |Z_{Th1_1}| = 53.007 \Omega \quad \arg(Z_{Th1_1}) = 86.688 \cdot \text{deg}$$

$$V_{Th1} := \left(\frac{2 \cdot V_{G1}}{8 \cdot m \cdot Y_1 \cdot Z_{G1_1} + 2m^3 \cdot Y_1^2 \cdot Z_1 \cdot Z_{G1_1} + 4 \cdot m^2 \cdot Y_1 \cdot Z_1 + 8} \right)$$

$$V_{Th1} = (1.086 \times 10^5 - 123.38i) \text{ V} \quad |V_{Th1}| = 1.086 \times 10^5 \text{ V} \quad \arg(V_{Th1}) = -0.065 \text{ deg}$$

Τα μεγέθη είναι φασικά.

$$Z_{Th2_1} := \frac{\frac{2 \cdot (2 \cdot m \cdot Z_2 + m^2 \cdot Z_2 \cdot Y_2 \cdot Z_{G1_2} + 2 \cdot Z_{G1_2})}{(2 + m \cdot Y_2 \cdot Z_{G1_2}) \cdot m \cdot Y_2}}{\left(\frac{2}{m \cdot Y_2} \right) + \left(\frac{2 \cdot m \cdot Z_2 + m^2 \cdot Z_2 \cdot Y_2 \cdot Z_{G1_2} + 2 \cdot Z_{G1_2}}{2 + m \cdot Y_2 \cdot Z_{G1_2}} \right)}$$

$$Z_{Th2_1} = (3.062 + 52.918i) \Omega \quad |Z_{Th2_1}| = 53.007 \Omega \quad \arg(Z_{Th2_1}) = 86.688 \text{ deg}$$

$$Z_{Th0_1} := \frac{\frac{2 \cdot (2 \cdot m \cdot Z_0 + m^2 \cdot Z_0 \cdot Y_0 \cdot Z_{G1_0} + 2 \cdot Z_{G1_0})}{(2 + m \cdot Y_0 \cdot Z_{G1_0}) \cdot m \cdot Y_0}}{\left(\frac{2}{m \cdot Y_0} \right) + \left(\frac{2 \cdot m \cdot Z_0 + m^2 \cdot Z_0 \cdot Y_0 \cdot Z_{G1_0} + 2 \cdot Z_{G1_0}}{2 + m \cdot Y_0 \cdot Z_{G1_0}} \right)}$$

$$Z_{Th0_1} = (46.585 + 213.031i) \Omega \quad |Z_{Th0_1}| = 218.065 \Omega \quad \arg(Z_{Th0_1}) = 77.665 \text{ deg}$$

Και αντίστοιχα δεξιά του σημείου βραχυκύκλωσης:

$$Z_{Th1_2} := \frac{\frac{2 \cdot [2 \cdot (1-m) \cdot Z_1 + (1-m)^2 \cdot Z_1 \cdot Y_1 \cdot Z_{G2_1} + 2 \cdot Z_{G2_1}]}{[2 + (1-m) \cdot Y_1 \cdot Z_{G2_1}] \cdot (1-m) \cdot Y_1}}{\left[\frac{2}{(1-m) \cdot Y_1} \right] + \left[\frac{2 \cdot (1-m) \cdot Z_1 + (1-m)^2 \cdot Z_1 \cdot Y_1 \cdot Z_{G2_1} + 2 \cdot Z_{G2_1}}{2 + (1-m) \cdot Y_1 \cdot Z_{G2_1}} \right]}$$

$$Z_{Th1_2} = (2.212 + 41.875i) \Omega \quad |Z_{Th1_2}| = 41.934 \Omega \quad \arg(Z_{Th1_2}) = 86.976 \text{ deg}$$

$$V_{Th2} := \left[\frac{2 \cdot V_{G2}}{8 \cdot (1-m) \cdot Y_1 \cdot Z_{G2_1} + 2(1-m)^3 \cdot Y_1^2 \cdot Z_1 \cdot Z_{G2_1} + 4 \cdot (1-m)^2 \cdot Y_1 \cdot Z_1 + 8} \right]$$

$$V_{Th2} = (1.062 \times 10^5 - 78.7i) V \quad |V_{Th2}| = 1.062 \times 10^5 V \quad \arg(V_{Th2}) = -0.042 \cdot \text{deg}$$

Τα μεγέθη είναι φασικά.

$$Z_{Th2_2} := \frac{\frac{2 \cdot [2 \cdot (1-m) \cdot Z_2 + (1-m)^2 \cdot Z_2 \cdot Y_2 \cdot Z_{G2_2} + 2 \cdot Z_{G2_2}]}{[2 + (1-m) \cdot Y_2 \cdot Z_{G2_2}] \cdot (1-m) \cdot Y_2}}{\left[\frac{2}{(1-m) \cdot Y_2} \right] + \left[\frac{2 \cdot (1-m) \cdot Z_2 + (1-m)^2 \cdot Z_2 \cdot Y_2 \cdot Z_{G2_2} + 2 \cdot Z_{G2_2}}{2 + (1-m) \cdot Y_2 \cdot Z_{G2_2}} \right]}$$

$$Z_{Th2_2} = (2.212 + 41.875i) \Omega \quad |Z_{Th2_2}| = 41.934 \Omega \quad \arg(Z_{Th2_2}) = 86.976 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{Th0_2} := \frac{\frac{2 \cdot [2 \cdot (1-m) \cdot Z_0 + (1-m)^2 \cdot Z_0 \cdot Y_0 \cdot Z_{G2_0} + 2 \cdot Z_{G2_0}]}{[2 + (1-m) \cdot Y_0 \cdot Z_{G2_0}] \cdot (1-m) \cdot Y_0}}{\left[\frac{2}{(1-m) \cdot Y_0} \right] + \left[\frac{2 \cdot (1-m) \cdot Z_0 + (1-m)^2 \cdot Z_0 \cdot Y_0 \cdot Z_{G2_0} + 2 \cdot Z_{G2_0}}{2 + (1-m) \cdot Y_0 \cdot Z_{G2_0}} \right]}$$

$$Z_{Th0_2} = (43.521 + 178.636i) \Omega \quad |Z_{Th0_2}| = 183.861 \Omega \quad \arg(Z_{Th0_2}) = 76.308 \cdot \text{deg}$$

Οπότε, τώρα οι ισοδύναμες αντιστάσεις των ακολουθιακών κυκλωμάτων καθώς και η ισοδύναμη τάση του κυκλώματος θετικής ακολουθίας υπολογίζονται από το θεώρημα Thevenin ως εξής:

$$(Z_{1.\text{final}}) := \frac{Z_{Th1_1} \cdot Z_{Th1_2}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} = (1.287 + 23.377i) \Omega$$

$$|Z_{1.\text{final}}| = 23.412 \Omega \quad \arg(Z_{1.\text{final}}) = 86.849 \cdot \text{deg}$$

Θα ξαναεφαρμόσουμε θεώρημα Thevenin.

Από την Αρχή της Υπέρθεσης, η τάση E1 του κυκλώματος θετικής ακολουθίας προκύπτει ως εξής:

$$E_1 := V_{Th1} \cdot \left(\frac{Z_{Th1_2}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} \right) + V_{Th2} \cdot \left(\frac{Z_{Th1_1}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} \right) = (1.073 \times 10^5 - 95.478i) \text{ V}$$

$$|E_1| = 1.073 \times 10^5 \text{ V} \quad \arg(E_1) = -0.051 \cdot \text{deg} \quad \text{Η τάση είναι φασική προφανώς.}$$

$$Z_{2.\text{final}} := \frac{Z_{Th1_1} \cdot Z_{Th1_2}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} = (1.287 + 23.377i) \Omega$$

$$|Z_{2.\text{final}}| = 23.412 \Omega \quad \arg(Z_{2.\text{final}}) = 86.849 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{0.\text{final}} := \frac{Z_{Th0_1} \cdot Z_{Th0_2}}{Z_{Th0_1} + Z_{Th0_2}} = (22.562 + 97.176i) \Omega$$

$$|Z_{0.\text{final}}| = 99.761 \Omega \quad \arg(Z_{0.\text{final}}) = 76.929 \cdot \text{deg}$$

Στο μονοφασικό βραχυκύκλωμα τα τρία ακολουθιακά κυκλώματα βρίσκονται σε σειρά. Επομένως, τα ακολουθιακά ρεύματα υπολογίζονται ως εξής:

$$I_1 := \frac{E_1}{Z_{1.\text{final}} + Z_{2.\text{final}} + Z_{0.\text{final}} + 3 \cdot R_F} = (125.698 - 723.539i) \text{ A}$$

$$|I_1| = 734.377 \text{ A} \quad \arg(I_1) = -80.145 \cdot \text{deg}$$

$$I_2 := I_1 = (125.698 - 723.539i) \text{ A}$$

$$I_0 := I_1 = (125.698 - 723.539i) \text{ A}$$

Οπότε στο τριφασικό σύστημα τα ρεύματα στο σημείο βραχυκύκλωσης υπολογίζονται ως:

$$I_{abcF} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 377.095 - 2.171i \times 10^3 \\ 5.531 \times 10^{-3} - 0.032i \\ 5.531 \times 10^{-3} - 0.032i \end{pmatrix} \text{ A}$$

Ενώ οι τάσεις:

$$V_1 := E_1 - I_1 \cdot Z_{1.\text{final}} = (9.022 \times 10^4 - 2.103i \times 10^3) \text{ V}$$

$$V_2 := -I_2 \cdot Z_{2,\text{final}} = (-1.708 \times 10^4 - 2.007i \times 10^3) \text{ V}$$

$$V_0 := -I_0 \cdot Z_{0,\text{final}} = (-7.315 \times 10^4 + 4.11i \times 10^3) \text{ V}$$

$$V_{abcF} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -7.276 \times 10^{-12} \\ -1.098 \times 10^5 - 8.676i \times 10^4 \\ -1.096 \times 10^5 + 9.909i \times 10^4 \end{pmatrix} \text{ V}$$

Τώρα θέλουμε να υπολογίσουμε τις τάσεις και τα ρεύματα στα σημεία αναχώρησης και άφιξης της γραμμής, δηλαδή στα σημεία που τοποθετούνται οι ηλεκτρονόμοι. Για να το πετύχουμε αυτό θα πρέπει να κάνουμε κυκλωματική ανάλυση εντός των ακολουθιακών κυκλωμάτων:

Από διαίρεση ρεύματος στο σημείο βραχυκύκλωσης έχουμε για τα τρία ακολουθιακά κυκλώματα αντίστοιχα:

$$I_{Th1_1} := I_1 \cdot \left(\frac{Z_{Th1_2}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} \right) + \frac{V_{Th1} - V_{Th2}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} = (57.342 - 344.576i) \text{ A}$$

Έχει εφαρμοστεί η Αρχή της Υπέρθεσης για το κυκλωμα χωρίς πηγές (πρώτος όρος) και παρουσία πηγών (δεύτερος όρος). Ομοίως για το υποκύκλωμα δεξιά του σφάλματος:

$$I_{Th1_2} := I_1 \cdot \left(\frac{Z_{Th1_1}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} \right) + \frac{V_{Th2} - V_{Th1}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} = (68.356 - 378.963i) \text{ A}$$

$$I_{Th2_1} := I_2 \cdot \left(\frac{Z_{Th2_2}}{Z_{Th2_1} + Z_{Th2_2}} \right) = (56.414 - 319.419i) \text{ A}$$

$$I_{Th2_2} := I_2 \cdot \left(\frac{Z_{Th2_1}}{Z_{Th2_1} + Z_{Th2_2}} \right) = (69.285 - 404.121i) \text{ A}$$

$$I_{Th0_1} := I_0 \cdot \left(\frac{Z_{Th0_2}}{Z_{Th0_1} + Z_{Th0_2}} \right) = (53.247 - 331.718i) \text{ A}$$

$$I_{Th0_2} := I_0 \cdot \left(\frac{Z_{Th0_1}}{Z_{Th0_1} + Z_{Th0_2}} \right) = (72.452 - 391.822i) \text{ A}$$

Από Νόμο Ρευμάτων Kirchhoff (όλα τα ρεύματα έχουν σημειωθεί στο αρχικό κύκλωμα):

$$I_{B1a1} := I_{Th1_1} + \frac{V_1 \cdot m \cdot Y_1}{2} = (57.847 - 322.91i) \text{ A}$$

$$I_{B1a2} := I_{Th2_1} + \frac{V_2 \cdot m \cdot Y_2}{2} = (56.896 - 323.519i) \text{ A}$$

$$I_{B1a0} := I_{Th0_1} + \frac{V_0 \cdot m \cdot Y_0}{2} = (52.646 - 342.405i) \text{ A}$$

$$I_{B2a1} := I_{Th1_2} + \frac{V_1 \cdot (1 - m) \cdot Y_1}{2} = (68.861 - 357.297i) \text{ A}$$

$$I_{B2a2} := I_{Th2_2} + \frac{V_2 \cdot (1 - m) \cdot Y_2}{2} = (69.767 - 408.221i) \text{ A}$$

$$I_{B2a0} := I_{Th0_2} + \frac{V_0 \cdot (1 - m) \cdot Y_0}{2} = (71.851 - 402.508i) \text{ A}$$

Από Νόμο Τάσεων Kirchhoff, οι τάσεις ακολουθίας στον ζυγό B1 είναι:

$$V_{B1_1} := V_1 + m \cdot Z_1 \cdot I_{B1a1} = (1.017 \times 10^5 - 477.563i) \text{ V}$$

$$|V_{B1_1}| = 1.017 \times 10^5 \text{ V} \quad \arg(V_{B1_1}) = -0.269 \cdot \text{deg}$$

$$V_{B1_2} := V_2 + m \cdot Z_2 \cdot I_{B1a2} = (-5.616 \times 10^3 - 416.35i) \text{ V}$$

$$|V_{B1_2}| = 5.631 \times 10^3 \text{ V} \quad \arg(V_{B1_2}) = -175.76 \cdot \text{deg}$$

$$V_{B1_0} := V_0 + m \cdot Z_0 \cdot I_{B1a0} = (-1.785 \times 10^4 - 931.683i) \text{ V}$$

$$|V_{B1_0}| = 1.788 \times 10^4 \text{ V} \quad \arg(V_{B1_0}) = -177.013 \cdot \text{deg}$$

Ενώ στον ζυγό B2 οι τάσεις ακολουθίας είναι:

$$V_{B2_1} := V_1 + (1 - m) \cdot Z_1 \cdot I_{B2a1} = (1.029 \times 10^5 - 133.648i) \text{ V}$$

$$|V_{B2_1}| = 1.029 \times 10^5 \text{ V} \quad \arg(V_{B2_1}) = -0.074 \cdot \text{deg}$$

$$V_{B2_2} := V_2 + (1 - m) \cdot Z_2 \cdot I_{B2a2} = (-2.618 \times 10^3 - 71.121i) \text{ V}$$

$$|V_{B1_2}| = 5.631 \times 10^3 \text{ V} \quad \arg(V_{B1_2}) = -175.76 \cdot \text{deg}$$

$$V_{B2_0} := V_0 + (1 - m) \cdot Z_0 \cdot I_{B1a0} = (-1.785 \times 10^4 - 931.683i) \text{ V}$$

$$|V_{B1_0}| = 1.788 \times 10^4 \text{ V} \quad \arg(V_{B1_0}) = -177.013 \cdot \text{deg}$$

Στον ζυγό B1 τα ακολουθιακά ρεύματα υπολογίζονται

$$I_{B1_1} := I_{B1a1} + \frac{m \cdot Y_1 \cdot V_{B1_1}}{2} = (57.962 - 298.496i) \text{ A}$$

$$|I_{B1_1}| = 304.072 \text{ A} \quad \arg(I_{B1_1}) = -79.011 \cdot \text{deg}$$

$$I_{B1_2} := I_{B1a2} + \frac{m \cdot Y_2 \cdot V_{B1_2}}{2} = (56.996 - 324.868i) \text{ A}$$

$$|I_{B1_2}| = 329.83 \text{ A} \quad \arg(I_{B1_2}) = -80.049 \cdot \text{deg}$$

$$I_{B1_0} := I_{B1a0} + \frac{m \cdot Y_0 \cdot V_{B1_0}}{2} = (52.782 - 345.013i) \text{ A}$$

$$|I_{B1_0}| = 349.027 \text{ A} \quad \arg(I_{B1_0}) = -81.302 \cdot \text{deg}$$

Στον ζυγό B2 τα ακολουθιακά ρεύματα υπολογίζονται

$$I_{B2_1} := I_{B2a1} + \frac{(1 - m) \cdot Y_1 \cdot V_{B2_1}}{2} = (68.893 - 332.59i) \text{ A}$$

$$|I_{B2_1}| = 339.65 \text{ A} \quad \arg(I_{B2_1}) = -78.297 \cdot \text{deg}$$

$$I_{B2_2} := I_{B2a2} + \frac{(1 - m) \cdot Y_2 \cdot V_{B2_2}}{2} = (69.784 - 408.85i) \text{ A}$$

$$|I_{B2_2}| = 414.763 \text{ A} \quad \arg(I_{B2_2}) = -80.314 \cdot \text{deg}$$

$$I_{B2_0} := I_{B2a0} + \frac{(1 - m) \cdot Y_0 \cdot V_{B2_0}}{2} = (71.987 - 405.117i) \text{ A}$$

$$|I_{B2_0}| = 411.463 \text{ A} \quad \arg(I_{B2_0}) = -79.924 \cdot \text{deg}$$

Επομένως συγκεντρωτικά οι φασικές τάσεις και ρεύματα του τριφασικού συστήματος στις θέσεις των ζυγών B1 και B2 υπολογίζονται:

Ζυγός B1:

$$\begin{pmatrix} V_{B1_a} \\ V_{B1_b} \\ V_{B1_c} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{B1_0} \\ V_{B1_1} \\ V_{B1_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7.819 \times 10^4 - 1.826i \times 10^3 \\ -6.592 \times 10^4 - 9.339i \times 10^4 \\ -6.582 \times 10^4 + 9.242i \times 10^4 \end{pmatrix} \text{ V}$$

$$\begin{pmatrix} |V_{B1_a}| \\ |V_{B1_b}| \\ |V_{B1_c}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7.822 \times 10^4 \\ 1.143 \times 10^5 \\ 1.135 \times 10^5 \end{pmatrix} \text{ V} \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{B1_a}) \\ \arg(V_{B1_b}) \\ \arg(V_{B1_c}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1.337 \\ -125.219 \\ 125.46 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$\begin{pmatrix} I_{B1_a} \\ I_{B1_b} \\ I_{B1_c} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{B1_0} \\ I_{B1_1} \\ I_{B1_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 167.74 - 968.377i \\ 18.144 - 34.181i \\ -27.532 - 32.509i \end{pmatrix} \text{ A}$$

$$\begin{pmatrix} |I_{B1_a}| \\ |I_{B1_b}| \\ |I_{B1_c}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 982.798 \\ 38.698 \\ 42.601 \end{pmatrix} \text{ A} \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{B1_a}) \\ \arg(I_{B1_b}) \\ \arg(I_{B1_c}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -80.173 \\ -62.039 \\ -130.262 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

Ζυγός B2:

$$\begin{pmatrix} V_{B2_a} \\ V_{B2_b} \\ V_{B2_c} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{B2_0} \\ V_{B2_1} \\ V_{B2_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 8.242 \times 10^4 - 1.136i \times 10^3 \\ -6.804 \times 10^4 - 9.22i \times 10^4 \\ -6.793 \times 10^4 + 9.054i \times 10^4 \end{pmatrix} \text{ V}$$

$$\begin{pmatrix} |V_{B2_a}| \\ |V_{B2_b}| \\ |V_{B2_c}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 8.242 \times 10^4 \\ 1.146 \times 10^5 \\ 1.132 \times 10^5 \end{pmatrix} \text{ V} \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{B2_a}) \\ \arg(V_{B2_b}) \\ \arg(V_{B2_c}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.79 \\ -126.426 \\ 126.882 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$\begin{pmatrix} I_{B2_a} \\ I_{B2_b} \\ I_{B2_c} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{B2_0} \\ I_{B2_1} \\ I_{B2_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 210.664 - 1.147i \times 10^3 \\ 68.693 - 33.64i \\ -63.389 - 35.186i \end{pmatrix} \text{ A}$$

$$\begin{pmatrix} |I_{B2_a}| \\ |I_{B2_b}| \\ |I_{B2_c}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.166 \times 10^3 \\ 76.488 \\ 72.5 \end{pmatrix} \text{ A} \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{B2_a}) \\ \arg(I_{B2_b}) \\ \arg(I_{B2_c}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -79.589 \\ -26.092 \\ -150.966 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

Εδώ τελείωσε η επίλυση του βραχυκυκλώματος, στην συνέχεια, θα υπολογίσουμε τις σύνθετες αντιστάσεις που υπολογίζει ο ηλεκτρονόμος.

Πολικές Σύνθετες Αντιστάσεις:

$$Z_{ab.B1} := \frac{V_{B1_a} - V_{B1_b}}{I_{B1_a} - I_{B1_b}} = (-71.475 + 165.716i) \Omega$$

$$|Z_{ab.B1}| = 180.473 \Omega \quad \arg(Z_{ab.B1}) = 113.331 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{bc.B1} := \frac{V_{B1_b} - V_{B1_c}}{I_{B1_b} - I_{B1_c}} = (146.506 - 4.063i \times 10^3) \Omega$$

$$|Z_{bc.B1}| = 4.065 \times 10^3 \Omega \quad \arg(Z_{bc.B1}) = -87.935 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{ca.B1} := \frac{V_{B1_c} - V_{B1_a}}{I_{B1_c} - I_{B1_a}} = (127.27 + 127.331i) \Omega$$

$$|Z_{ca.B1}| = 180.03 \Omega \quad \arg(Z_{ca.B1}) = 45.014 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{ab.B2} := \frac{V_{B2_a} - V_{B2_b}}{I_{B2_a} - I_{B2_b}} = (-63.541 + 143.294i) \Omega$$

$$Z_{bc.B2} := \frac{V_{B2_b} - V_{B2_c}}{I_{B2_b} - I_{B2_c}} = (-16.973 - 1.383i \times 10^3) \Omega$$

$$|Z_{bc.B2}| = 1.383 \times 10^3 \text{ ; } \arg(Z_{bc.B2}) = -90.703 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{ca.B2} := \frac{V_{B2_c} - V_{B2_a}}{I_{B2_c} - I_{B2_a}} = (109.207 + 108.354i) \Omega$$

$$|Z_{ca.B2}| = 153.84 \Omega \quad \arg(Z_{ca.B2}) = 44.775 \cdot \text{deg}$$

Φασικές Σύνθετες Αντιστάσεις:

Θα χρειαστεί να οριστεί ο λεγόμενος Compensation Factor k.

$$k := \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \quad \text{Έτσι:}$$

$$Z_{a.B1} := \frac{V_{B1_a}}{I_{B1_a} + k(I_{B1_a} + I_{B1_b} + I_{B1_c})} = (1.256 + 35.381i) \Omega$$

$$|Z_{a.B1}| = 35.403 \Omega \quad \arg(Z_{a.B1}) = 87.967 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{b.B1} := \frac{V_{B1_b}}{I_{B1_b} + k(I_{B1_a} + I_{B1_b} + I_{B1_c})} = (77.51 - 44.243i) \Omega$$

$$|Z_{b.B1}| = 89.248 \Omega \quad \arg(Z_{b.B1}) = -29.718 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{c.B1} := \frac{V_{B1_c}}{I_{B1_c} + k(I_{B1_a} + I_{B1_b} + I_{B1_c})} = (-64.613 - 60.245i) \Omega$$

$$|Z_{c.B1}| = 88.342 \Omega \quad \arg(Z_{c.B1}) = -137.004 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{a.B2} := \frac{V_{B2_a}}{I_{B2_a} + k(I_{B2_a} + I_{B2_b} + I_{B2_c})} = (1.396 + 31.5i) \Omega$$

$$|Z_{a.B2}| = 31.531 \Omega \quad \arg(Z_{a.B2}) = 87.462 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{b.B2} := \frac{V_{B2_b}}{I_{B2_b} + k(I_{B2_a} + I_{B2_b} + I_{B2_c})} = (63.24 - 42.737i) \Omega$$

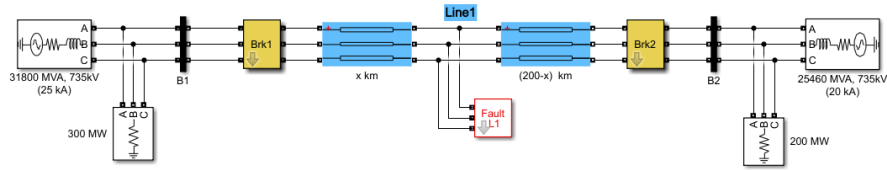
$$|Z_{b.B2}| = 76.327 \Omega \quad \arg(Z_{b.B2}) = -34.05 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{c.B2} := \frac{V_{B2_c}}{I_{B2_c} + k(I_{B2_a} + I_{B2_b} + I_{B2_c})} = (-53.548 - 52.174i) \Omega$$

$$|Z_{c.B2}| = 74.763 \Omega \quad \arg(Z_{c.B2}) = -135.744 \cdot \text{deg}$$

Διφασικό Βραχυκύκλωμα χωρίς Γη στο Μοντέλο Μεσαίου Μήκους

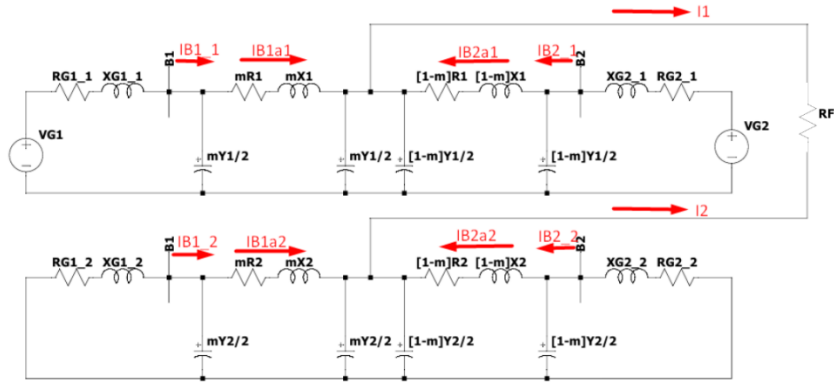
Το δίκτυο που μελετάμε είναι το παρακάτω:



$$a := -0.5 + 0.866i$$

$$A_1 := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -0.5 - 0.866i & -0.5 + 0.866i \\ 1 & -0.5 + 0.866i & -0.5 - 0.866i \end{pmatrix}$$

Η σύνδεση των κυκλωμάτων ακολουθεί με βάση το είδος του σφάλματος (διφασικό χωρίς γη):



Τώρα θα ορίσουμε τις παραμέτρους του δικτύου που έχουμε:

Γεννήτρια στον ζυγό B1 (Φασική τάση):

$$V_{G1} := \frac{(740.152 \cdot 10^3)}{\sqrt{3}} \text{ V} = 4.273 \times 10^5 \text{ V}$$

$$R_{G1_1} := 1.69882 \text{ ohm} \quad X_{G1_1} := 16.988 \text{ ohm} \quad Z_{G1_1} := (1.69882 + 16.988i) \text{ ohm} \text{ θετικής ακολουθίας}$$

$$R_{G1_2} := 1.69882 \text{ ohm} \quad X_{G1_2} := 16.988 \text{ ohm} \quad Z_{G1_2} := (1.69882 + 16.988i) \text{ ohm} \text{ αρνητικής ακολουθίας}$$

$$R_{G1_0} := 5.09646 \text{ ohm} \quad X_{G1_0} := 50.9646 \text{ ohm} \quad Z_{G1_0} := (5.09646 + 50.9646i) \text{ ohm} \text{ μηδενικής ακολουθίας}$$

Φορτίο στον ζυγό B1:

Έχει τοποθετηθεί ωμικό φορτίο 300 MW υπό πολική τάση 735 kV, το οποίο όμως δεν συμπεριλαμβάνεται στα κυκλώματα ακολουθίας.

Γραμμή Μεταφοράς:

Η σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς υπολογίζεται ως $Z = R + jX = r + j2\pi f L$. Τα στοιχεία r, f και L λαμβάνονται από τις παραμέτρους του εκτελέσιμου αρχείου.

$$R_1 := 2.546 \text{ ohm} \quad X_1 := 70.3993 \text{ ohm} \quad Z_1 := (2.546 + 70.3993i) \text{ ohm} \text{ θετικής ακολουθίας}$$

$$R_2 := 2.546 \text{ ohm} \quad X_2 := 70.3993 \text{ ohm} \quad Z_2 := (2.546 + 70.3993i) \text{ ohm} \quad \text{αρνητικής ακολουθίας}$$

$$R_0 := 77.28 \text{ ohm} \quad X_0 := 311.093 \text{ ohm} \quad Z_0 := (77.28 + 311.093i) \text{ ohm} \quad \text{μηδενικής ακολουθίας}$$

Η αγωγιμότητα της γραμμής μεταφοράς υπολογίζεται ως $Y = G + j(1/X_c) = g + j2\pi f C l$.
Τα στοιχεία g, l, f και C λαμβάνονται από τις παραμέτρους του εκτελέσιμου αρχείου.

$$Y_1 := 9.6057i \cdot 10^{-4} \text{ ohm}^{-1} \quad Y_2 := 9.6057i \cdot 10^{-4} \text{ ohm}^{-1} \quad Y_0 := 5.8441i \cdot 10^{-4} \text{ ohm}^{-1}$$

Γεννήτρια στον ζυγό B2 (Φασική τάση):

$$V_{G2} := \frac{(727.65 \cdot 10^3)}{\sqrt{3}} \text{ V} = 4.201 \times 10^5 \text{ V}$$

$$R_{G2_1} := 0.8929 \text{ ohm} \quad X_{G2_1} := 6.2505 \text{ ohm} \quad Z_{G2_1} := (0.8929 + 6.2505i) \text{ ohm} \quad \text{θετικής ακολουθίας}$$

$$R_{G2_2} := 0.8929 \text{ ohm} \quad X_{G2_2} := 6.2505 \text{ ohm} \quad Z_{G2_2} := (0.8929 + 6.2505i) \text{ ohm} \quad \text{αρνητικής ακολουθίας}$$

$$R_{G2_0} := 2.6787 \text{ ohm} \quad X_{G2_0} := 18.7515 \text{ ohm} \quad Z_{G2_0} := (2.6787 + 18.7515i) \text{ ohm} \quad \text{μηδενικής ακολουθίας}$$

Φορτίο στον ζυγό B2:

Έχει τοποθετηθεί ωμικό φορτίο 200 MW υπό πολική τάση 735 kV, το οποίο όμως δεν συμπεριλαμβάνεται στα κυκλώματα ακολουθίας.

Έπειτα, θα ορίσουμε τις παραμέτρους του βραχυκυκλώματος που θέλουμε να μελετήσουμε:

$$m := 0.5 \quad R_F := 0 \text{ ohm}$$

Τώρα είμαστε σε θέση να επιλύσουμε το βραχυκύκλωμα.

Αριστερά του σημείου βραχυκύκλωσης εφαρμόζουμε θεώρημα Thevenin για να εξάγουμε το ισοδύναμο κύκλωμα στα τρία ακολουθιακά κυκλώματα και λαμβάνουμε:

$$Z_{Th1_1} := \frac{\frac{2 \cdot (2 \cdot m \cdot Z_1 + m^2 \cdot Z_1 \cdot Y_1 \cdot Z_{G1_1} + 2 \cdot Z_{G1_1})}{(2 + m \cdot Y_1 \cdot Z_{G1_1}) \cdot m \cdot Y_1}}{\left(\frac{2}{m \cdot Y_1} \right) + \left(\frac{2 \cdot m \cdot Z_1 + m^2 \cdot Z_1 \cdot Y_1 \cdot Z_{G1_1} + 2 \cdot Z_{G1_1}}{2 + m \cdot Y_1 \cdot Z_{G1_1}} \right)}$$

$$Z_{Th1_1} = (3.062 + 52.918i) \Omega \quad |Z_{Th1_1}| = 53.007 \Omega \quad \arg(Z_{Th1_1}) = 86.688 \cdot \text{deg}$$

$$V_{Th1} := \left(\frac{2 \cdot V_{G1}}{8 \cdot m \cdot Y_1 \cdot Z_{G1_1} + 2m^3 \cdot Y_1^2 \cdot Z_1 \cdot Z_{G1_1} + 4 \cdot m^2 \cdot Y_1 \cdot Z_1 + 8} \right)$$

$$V_{Th1} = (1.086 \times 10^5 - 123.38i) V \quad |V_{Th1}| = 1.086 \times 10^5 V \quad \arg(V_{Th1}) = -0.065 \cdot \text{deg}$$

Τα μεγέθη είναι φασικά.

$$Z_{Th2_1} := \frac{\frac{2 \cdot (2 \cdot m \cdot Z_2 + m^2 \cdot Z_2 \cdot Y_2 \cdot Z_{G1_2} + 2 \cdot Z_{G1_2})}{(2 + m \cdot Y_2 \cdot Z_{G1_2}) \cdot m \cdot Y_2}}{\left(\frac{2}{m \cdot Y_2} \right) + \left(\frac{2 \cdot m \cdot Z_2 + m^2 \cdot Z_2 \cdot Y_2 \cdot Z_{G1_2} + 2 \cdot Z_{G1_2}}{2 + m \cdot Y_2 \cdot Z_{G1_2}} \right)}$$

$$Z_{Th2_1} = (3.062 + 52.918i) \Omega \quad |Z_{Th2_1}| = 53.007 \Omega \quad \arg(Z_{Th2_1}) = 86.688 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{Th0_1} := \frac{\frac{2 \cdot (2 \cdot m \cdot Z_0 + m^2 \cdot Z_0 \cdot Y_0 \cdot Z_{G1_0} + 2 \cdot Z_{G1_0})}{(2 + m \cdot Y_0 \cdot Z_{G1_0}) \cdot m \cdot Y_0}}{\left(\frac{2}{m \cdot Y_0} \right) + \left(\frac{2 \cdot m \cdot Z_0 + m^2 \cdot Z_0 \cdot Y_0 \cdot Z_{G1_0} + 2 \cdot Z_{G1_0}}{2 + m \cdot Y_0 \cdot Z_{G1_0}} \right)}$$

$$Z_{Th0_1} = (46.585 + 213.031i) \Omega \quad |Z_{Th0_1}| = 218.065 \Omega \quad \arg(Z_{Th0_1}) = 77.665 \cdot \text{deg}$$

Και αντίστοιχα δεξιά του σημείου βραχυκύκλωσης:

$$Z_{Th1_2} := \frac{\frac{2 \cdot [2 \cdot (1-m) \cdot Z_1 + (1-m)^2 \cdot Z_1 \cdot Y_1 \cdot Z_{G2_1} + 2 \cdot Z_{G2_1}]}{[2 + (1-m) \cdot Y_1 \cdot Z_{G2_1}] \cdot (1-m) \cdot Y_1}}{\left[\frac{2}{(1-m) \cdot Y_1} \right] + \left[\frac{2 \cdot (1-m) \cdot Z_1 + (1-m)^2 \cdot Z_1 \cdot Y_1 \cdot Z_{G2_1} + 2 \cdot Z_{G2_1}}{2 + (1-m) \cdot Y_1 \cdot Z_{G2_1}} \right]}$$

$$Z_{Th1_2} = (2.212 + 41.875i) \Omega \quad |Z_{Th1_2}| = 41.934 \Omega \quad \arg(Z_{Th1_2}) = 86.976 \cdot \text{deg}$$

$$V_{Th2} := \left[\frac{2 \cdot V_{G2}}{8 \cdot (1-m) \cdot Y_1 \cdot Z_{G2_1} + 2(1-m)^3 \cdot Y_1^2 \cdot Z_1 \cdot Z_{G2_1} + 4 \cdot (1-m)^2 \cdot Y_1 \cdot Z_1 + 8} \right]$$

$$V_{Th2} = (1.062 \times 10^5 - 78.7i) \text{ V} \quad |V_{Th2}| = 1.062 \times 10^5 \text{ V} \quad \arg(V_{Th2}) = -0.042 \cdot \text{deg}$$

Τα μεγέθη είναι φασικά.

$$Z_{Th2_2} := \frac{\frac{2 \cdot [2 \cdot (1-m) \cdot Z_2 + (1-m)^2 \cdot Z_2 \cdot Y_2 \cdot Z_{G2_2} + 2 \cdot Z_{G2_2}]}{[2 + (1-m) \cdot Y_2 \cdot Z_{G2_2}] \cdot (1-m) \cdot Y_2}}{\left[\frac{2}{(1-m) \cdot Y_2} \right] + \left[\frac{2 \cdot (1-m) \cdot Z_2 + (1-m)^2 \cdot Z_2 \cdot Y_2 \cdot Z_{G2_2} + 2 \cdot Z_{G2_2}}{2 + (1-m) \cdot Y_2 \cdot Z_{G2_2}} \right]}$$

$$Z_{Th2_2} = (2.212 + 41.875i) \Omega \quad |Z_{Th2_2}| = 41.934 \Omega \quad \arg(Z_{Th2_2}) = 86.976 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{Th0_2} := \frac{\frac{2 \cdot [2 \cdot (1-m) \cdot Z_0 + (1-m)^2 \cdot Z_0 \cdot Y_0 \cdot Z_{G2_0} + 2 \cdot Z_{G2_0}]}{[2 + (1-m) \cdot Y_0 \cdot Z_{G2_0}] \cdot (1-m) \cdot Y_0}}{\left[\frac{2}{(1-m) \cdot Y_0} \right] + \left[\frac{2 \cdot (1-m) \cdot Z_0 + (1-m)^2 \cdot Z_0 \cdot Y_0 \cdot Z_{G2_0} + 2 \cdot Z_{G2_0}}{2 + (1-m) \cdot Y_0 \cdot Z_{G2_0}} \right]}$$

$$Z_{Th0_2} = (43.521 + 178.636i) \Omega \quad |Z_{Th0_2}| = 183.861 \Omega \quad \arg(Z_{Th0_2}) = 76.308 \cdot \text{deg}$$

Οπότε, τώρα οι ισοδύναμες αντιστάσεις των ακολουθιακών κυκλωμάτων καθώς και η ισοδύναμη τάση του κυκλώματος θετικής ακολουθίας υπολογίζονται από το θεώρημα Thevenin ως εξής:

$$(Z_{1.\text{final}}) := \frac{Z_{Th1_1} \cdot Z_{Th1_2}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} = (1.287 + 23.377i) \Omega$$

$$|Z_{1.\text{final}}| = 23.412 \Omega \quad \arg(Z_{1.\text{final}}) = 86.849 \cdot \text{deg}$$

Θα ξαναεφαρμόσουμε θεώρημα Thevenin.

Από την Αρχή της Υπέρθεσης, η τάση E1 του κυκλώματος θετικής ακολουθίας προκύπτει ως εξής:

$$E_1 := V_{Th1} \cdot \left(\frac{Z_{Th1_2}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} \right) + V_{Th2} \cdot \left(\frac{Z_{Th1_1}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} \right) = (1.073 \times 10^5 - 95.478i) \text{ V}$$

$$|E_1| = 1.073 \times 10^5 \text{ V} \quad \arg(E_1) = -0.051 \cdot \text{deg} \quad \text{Η τάση είναι φασική.}$$

$$Z_{2.\text{final}} := \frac{Z_{\text{Th1}_1} \cdot Z_{\text{Th1}_2}}{Z_{\text{Th1}_1} + Z_{\text{Th1}_2}} = (1.287 + 23.377i) \Omega$$

$$|Z_{2.\text{final}}| = 23.412 \Omega \quad \arg(Z_{2.\text{final}}) = 86.849 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{0.\text{final}} := \frac{Z_{\text{Th0}_1} \cdot Z_{\text{Th0}_2}}{Z_{\text{Th0}_1} + Z_{\text{Th0}_2}} = (22.562 + 97.176i) \Omega$$

$$|Z_{0.\text{final}}| = 99.761 \Omega \quad \arg(Z_{0.\text{final}}) = 76.929 \cdot \text{deg}$$

Στο διφασικό βραχυκύκλωμα, με βάση την σύνδεση των τριών ακολουθιακών κυκλωμάτων, τα ακολουθιακά ρεύματα υπολογίζονται ως εξής:

$$I_1 := \frac{E_1}{Z_{1.\text{final}} + Z_{2.\text{final}} + R_F} = (123.933 - 2.288i \times 10^3) \text{ A}$$

$$|I_1| = 2.291 \times 10^3 \text{ A} \quad \arg(I_1) = -86.9 \cdot \text{deg}$$

$$I_2 := -I_1 = (-123.933 + 2.288i \times 10^3) \text{ A}$$

$$|I_2| = 2.291 \times 10^3 \text{ A} \quad \arg(I_2) = 93.1 \cdot \text{deg}$$

$$I_0 := 0 \text{ A}$$

Οπότε στο τριφασικό σύστημα τα ρεύματα στο σημείο βραχυκύκλωσης υπολογίζονται ως:

$$I_{\text{abcF}} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -3.963 \times 10^3 - 214.753i \\ 3.963 \times 10^3 + 214.753i \end{pmatrix} \text{ A}$$

Ενώ οι τάσεις:

$$V_1 := E_1 - I_1 \cdot Z_{1,\text{final}} = (5.365 \times 10^4 - 47.739i) \text{ V}$$

$$V_2 := -I_2 \cdot Z_{2,\text{final}} = (5.365 \times 10^4 - 47.739i) \text{ V}$$

$$V_0 := -I_0 \cdot Z_{0,\text{final}} = 0$$

$$V_{abcF} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.073 \times 10^5 - 95.478i \\ -5.365 \times 10^4 + 47.737i \\ -5.365 \times 10^4 + 47.737i \end{pmatrix} \text{ V}$$

Τώρα θέλουμε να υπολογίσουμε τις τάσεις και τα ρεύματα στα σημεία αναχώρησης και άφιξης της γραμμής, δηλαδή στα σημεία που τοποθετούνται οι ηλεκτρονόμοι. Για να το πετύχουμε αυτό θα πρέπει να κάνουμε κυκλωματική ανάλυση εντός των ακολουθιακών κυκλωμάτων:

Από διαίρεση ρεύματος στο σημείο βραχυκύκλωσης έχουμε για τα τρία ακολουθιακά κυκλώματα αντίστοιχα:

$$I_{Th1_1} := I_1 \cdot \left(\frac{Z_{Th1_2}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} \right) + \frac{V_{Th1} - V_{Th2}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} = (58.498 - 1.036i \times 10^3) \text{ A}$$

Έχει εφαρμοστεί η Αρχή της Υπέρθεσης για το κυκλωμα χωρίς πηγές (πρώτος όρος) και παρουσία πηγών (δεύτερος όρος). Ομοίως για το υποκύκλωμα δεξιά του σφάλματος:

$$I_{Th1_2} := I_1 \cdot \left(\frac{Z_{Th1_1}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} \right) + \frac{V_{Th2} - V_{Th1}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} = (65.435 - 1.253i \times 10^3) \text{ A}$$

$$I_{Th2_1} := I_2 \cdot \left(\frac{Z_{Th2_2}}{Z_{Th2_1} + Z_{Th2_2}} \right) = (-57.569 + 1.01i \times 10^3) \text{ A}$$

$$I_{Th2_2} := I_2 \cdot \left(\frac{Z_{Th2_1}}{Z_{Th2_1} + Z_{Th2_2}} \right) = (-66.364 + 1.278i \times 10^3) \text{ A}$$

$$I_{Th0_1} := I_0 \cdot \left(\frac{Z_{Th0_2}}{Z_{Th0_1} + Z_{Th0_2}} \right) = 0$$

$$I_{Th0_2} := I_0 \cdot \left(\frac{Z_{Th0_1}}{Z_{Th0_1} + Z_{Th0_2}} \right) = 0$$

Από Νόμο Ρευμάτων Kirchhoff, τα ρεύματα που διαρρέουν τις $mZ1$, $mZ2$, $mZ0$ και τις $(1-m)Z1$, $(1-m)Z2$, $(1-m)Z0$:

$$I_{B1a1} := I_{Th1_1} + \frac{V_1 \cdot m \cdot Y_1}{2} = (58.509 - 1.023i \times 10^3) A$$

$$I_{B1a2} := I_{Th2_1} + \frac{V_2 \cdot m \cdot Y_2}{2} = (-57.558 + 1.023i \times 10^3) A$$

$$I_{B1a0} := I_{Th0_1} + \frac{V_0 \cdot m \cdot Y_0}{2} = 0$$

$$I_{B2a1} := I_{Th1_2} + \frac{V_1 \cdot (1-m) \cdot Y_1}{2} = (65.447 - 1.24i \times 10^3) A$$

$$I_{B2a2} := I_{Th2_2} + \frac{V_2 \cdot (1-m) \cdot Y_2}{2} = (-66.352 + 1.291i \times 10^3) A$$

$$I_{B2a0} := I_{Th0_2} + \frac{V_0 \cdot (1-m) \cdot Y_0}{2} = 0$$

Από Νόμο Τάσεων Kirchhoff, οι τάσεις ακολουθίας στον ζυγό B1 είναι :

$$V_{B1_1} := V_1 + m \cdot Z_1 \cdot I_{B1a1} = (8.972 \times 10^4 + 709.806i) V$$

$$|V_{B1_1}| = 8.973 \times 10^4 V \quad \arg(V_{B1_1}) = 0.453 \cdot \text{deg}$$

$$V_{B1_2} := V_2 + m \cdot Z_2 \cdot I_{B1a2} = (1.755 \times 10^4 - 771.019i) V$$

$$|V_{B1_2}| = 1.757 \times 10^4 V \quad \arg(V_{B1_2}) = -2.515 \cdot \text{deg}$$

$$V_{B1_0} := V_0 + m \cdot Z_0 \cdot I_{B1a0} = 0$$

Ενώ στον ζυγό B2 οι τάσεις ακολουθίας είναι:

$$V_{B2_1} := V_1 + (1-m) \cdot Z_1 \cdot I_{B2a1} = (9.737 \times 10^4 + 677.925i) V$$

$$|V_{B2_1}| = 9.737 \times 10^4 V \quad \arg(V_{B2_1}) = 0.399 \cdot \text{deg}$$

$$V_{B2_2} := V_2 + (1 - m) \cdot Z_2 \cdot I_{B2a2} = (8.138 \times 10^3 - 740.451i) \text{ V}$$

$$|V_{B1_2}| = 1.757 \times 10^4 \text{ V} \quad \arg(V_{B1_2}) = -2.515 \cdot \text{deg}$$

$$V_{B2_0} := V_0 + (1 - m) \cdot Z_0 \cdot I_{B1a0} = 0$$

Στον ζυγό B1 τα ακολουθιακά ρεύματα υπολογίζονται

$$I_{B1_1} := I_{B1a1} + \frac{m \cdot Y_1 \cdot V_{B1_1}}{2} = (58.339 - 1.001i \times 10^3) \text{ A}$$

$$|I_{B1_1}| = 1.003 \times 10^3 \text{ A} \quad \arg(I_{B1_1}) = -86.665 \cdot \text{deg}$$

$$I_{B1_2} := I_{B1a2} + \frac{m \cdot Y_2 \cdot V_{B1_2}}{2} = (-57.373 + 1.028i \times 10^3) \text{ A}$$

$$|I_{B1_2}| = 1.029 \times 10^3 \text{ A} \quad \arg(I_{B1_2}) = 93.196 \cdot \text{deg}$$

$$I_{B1_0} := I_{B1a0} + \frac{m \cdot Y_0 \cdot V_{B1_0}}{2} = 0$$

Στον ζυγό B2 τα ακολουθιακά ρεύματα υπολογίζονται

$$I_{B2_1} := I_{B2a1} + \frac{(1 - m) \cdot Y_1 \cdot V_{B2_1}}{2} = (65.284 - 1.216i \times 10^3) \text{ A}$$

$$|I_{B2_1}| = 1.218 \times 10^3 \text{ A} \quad \arg(I_{B2_1}) = -86.927 \cdot \text{deg}$$

$$I_{B2_2} := I_{B2a2} + \frac{(1 - m) \cdot Y_2 \cdot V_{B2_2}}{2} = (-66.175 + 1.293i \times 10^3) \text{ A}$$

$$|I_{B2_2}| = 1.294 \times 10^3 \text{ A} \quad \arg(I_{B2_2}) = 92.931 \cdot \text{deg}$$

$$I_{B2_0} := I_{B2a0} + \frac{(1 - m) \cdot Y_0 \cdot V_{B2_0}}{2} = 0$$

Επομένως συγκεντρωτικά αι φασικές τάσεις και ρεύματα του τριφασικού συστήματος στις θέσεις

των ζυγών B1 και B2 υπολογίζονται:

Ζυγός B1:

$$\begin{pmatrix} V_{B1_a} \\ V_{B1_b} \\ V_{B1_c} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{B1_0} \\ V_{B1_1} \\ V_{B1_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.073 \times 10^5 - 61.213i \\ -5.235 \times 10^4 - 6.247i \times 10^4 \\ -5.492 \times 10^4 + 6.253i \times 10^4 \end{pmatrix} V$$

$$\begin{pmatrix} |V_{B1_a}| \\ |V_{B1_b}| \\ |V_{B1_c}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.073 \times 10^5 \\ 8.151 \times 10^4 \\ 8.322 \times 10^4 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{B1_a}) \\ \arg(V_{B1_b}) \\ \arg(V_{B1_c}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.033 \\ -129.965 \\ 131.293 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$\begin{pmatrix} I_{B1_a} \\ I_{B1_b} \\ I_{B1_c} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{B1_0} \\ I_{B1_1} \\ I_{B1_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.966 + 26.372i \\ -1.757 \times 10^3 - 113.436i \\ 1.756 \times 10^3 + 87.066i \end{pmatrix} A$$

$$\begin{pmatrix} |I_{B1_a}| \\ |I_{B1_b}| \\ |I_{B1_c}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 26.389 \\ 1.761 \times 10^3 \\ 1.759 \times 10^3 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{B1_a}) \\ \arg(I_{B1_b}) \\ \arg(I_{B1_c}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 87.902 \\ -176.307 \\ 2.838 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

Ζυγός B2:

$$\begin{pmatrix} V_{B2_a} \\ V_{B2_b} \\ V_{B2_c} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{B2_0} \\ V_{B2_1} \\ V_{B2_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.055 \times 10^5 - 62.527i \\ -5.152 \times 10^4 - 7.724i \times 10^4 \\ -5.398 \times 10^4 + 7.73i \times 10^4 \end{pmatrix} V$$

$$\begin{pmatrix} |V_{B2_a}| \\ |V_{B2_b}| \\ |V_{B2_c}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.055 \times 10^5 \\ 9.285 \times 10^4 \\ 9.429 \times 10^4 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{B2_a}) \\ \arg(V_{B2_b}) \\ \arg(V_{B2_c}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.034 \\ -123.703 \\ 124.926 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$\begin{pmatrix} I_{B2_a} \\ I_{B2_b} \\ I_{B2_c} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{B2_0} \\ I_{B2_1} \\ I_{B2_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.891 + 76.26i \\ -2.172 \times 10^3 - 152.027i \\ 2.173 \times 10^3 + 75.77i \end{pmatrix} A$$

$$\begin{pmatrix} |I_{B2_a}| \\ |I_{B2_b}| \\ |I_{B2_c}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 76.265 \\ 2.177 \times 10^3 \\ 2.174 \times 10^3 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{B2_a}) \\ \arg(I_{B2_b}) \\ \arg(I_{B2_c}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 90.669 \\ -175.996 \\ 1.997 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

Εδώ τελείωσε η επίλυση του βραχυκυκλώματος, στην συνέχεια, θα υπολογίσουμε τις σύνθετες αντιστάσεις που υπολογίζει ο ηλεκτρονόμος.

Πολικές Σύνθετες Αντιστάσεις:

$$Z_{ab.B1} := \frac{V_{B1_a} - V_{B1_b}}{I_{B1_a} - I_{B1_b}} = (93.017 + 28.096i) \Omega$$

$$|Z_{ab.B1}| = 97.168 \Omega \quad \arg(Z_{ab.B1}) = 16.807 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{bc.B1} := \frac{V_{B1_b} - V_{B1_c}}{I_{B1_b} - I_{B1_c}} = (1.295 + 35.499i) \Omega$$

$$|Z_{bc.B1}| = 35.523 \Omega \quad \arg(Z_{bc.B1}) = 87.911 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{ca.B1} := \frac{V_{B1_c} - V_{B1_a}}{I_{B1_c} - I_{B1_a}} = (-91.054 + 38.803i) \Omega$$

$$|Z_{ca.B1}| = 98.978 \Omega \quad \arg(Z_{ca.B1}) = 156.919 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{ab.B2} := \frac{V_{B2_a} - V_{B2_b}}{I_{B2_a} - I_{B2_b}} = (75.226 + 27.637i) \Omega$$

$$|Z_{ab.B2}| = 80.142 \Omega \quad \arg(Z_{ab.B2}) = 20.172 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{bc.B2} := \frac{V_{B2_b} - V_{B2_c}}{I_{B2_b} - I_{B2_c}} = (1.295 + 35.499i) \Omega$$

$$|Z_{bc.B2}| = 35.523 \Omega \quad \arg(Z_{bc.B2}) = 87.911 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{ca.B2} := \frac{V_{B2_c} - V_{B2_a}}{I_{B2_c} - I_{B2_a}} = (-73.371 + 35.572i) \Omega$$

$$|Z_{ca.B2}| = 81.54 \Omega \quad \arg(Z_{ca.B2}) = 154.135 \cdot \text{deg}$$

Φασικές Σύνθετες Αντιστάσεις:

Θα χρειαστεί να οριστεί ο λεγόμενος Compensation Factor k.

$$k := \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \quad \text{Έτσι:}$$

$$Z_{a.B1} := \frac{V_{B1_a}}{I_{B1_a} + k(I_{B1_a} + I_{B1_b} + I_{B1_c})} = (146.554 - 4.062i \times 10^3) \Omega$$

$$|Z_{a.B1}| = 4.065 \times 10^3 \Omega \quad \arg(Z_{a.B1}) = -87.934 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{b.B1} := \frac{V_{B1_b}}{I_{B1_b} + k(I_{B1_a} + I_{B1_b} + I_{B1_c})} = (31.951 + 33.484i) \Omega$$

$$|Z_{b.B1}| = 46.282 \Omega \quad \arg(Z_{b.B1}) = 46.342 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{c.B1} := \frac{V_{B1_c}}{I_{B1_c} + k(I_{B1_a} + I_{B1_b} + I_{B1_c})} = (-29.431 + 37.059i) \Omega$$

$$|Z_{c.B1}| = 47.324 \Omega \quad \arg(Z_{c.B1}) = 128.455 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{a.B2} := \frac{V_{B2_a}}{I_{B2_a} + k(I_{B2_a} + I_{B2_b} + I_{B2_c})} = (-16.953 - 1.383i \times 10^3) \Omega$$

$$|Z_{a.B2}| = 1.383 \times 10^3 \Omega \quad \arg(Z_{a.B2}) = -90.702 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{b.B2} := \frac{V_{B2_b}}{I_{B2_b} + k(I_{B2_a} + I_{B2_b} + I_{B2_c})} = (26.08 + 33.735i) \Omega$$

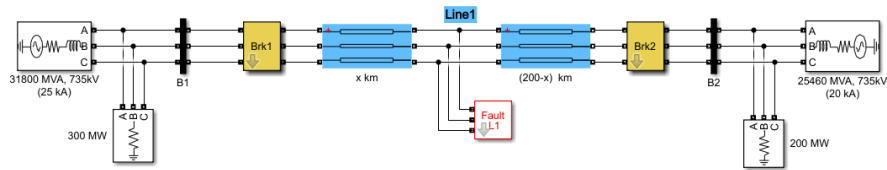
$$|Z_{b.B2}| = 42.64 \Omega \quad \arg(Z_{b.B2}) = 52.293 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{c.B2} := \frac{V_{B2_c}}{I_{B2_c} + k(I_{B2_a} + I_{B2_b} + I_{B2_c})} = (-23.572 + 36.396i) \Omega$$

$$|Z_{c.B2}| = 43.363 \Omega \quad \arg(Z_{c.B2}) = 122.929 \cdot \text{deg}$$

Διφασικό Βραχυκύκλωμα προς Γη στο Μοντέλο Μεσαίου Μήκους

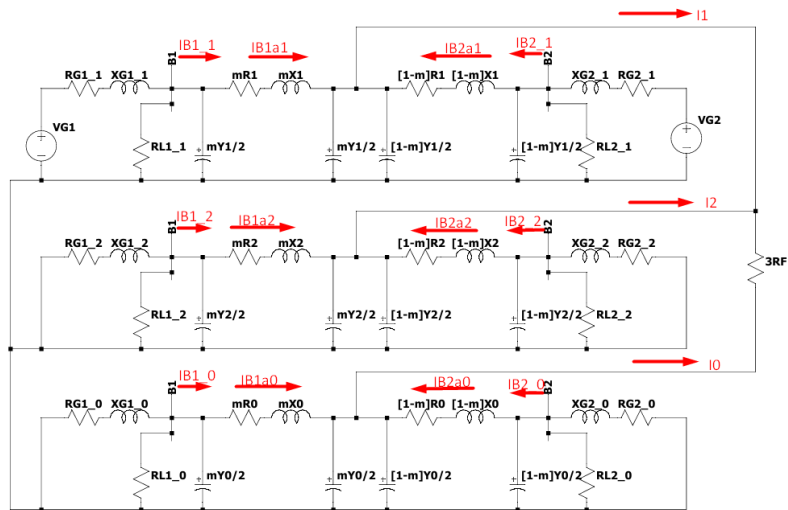
Το δίκτυο που μελετάμε είναι το παρακάτω:



$$a := -0.5 + 0.866i$$

$$A_1 := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -0.5 - 0.866i & -0.5 + 0.866i \\ 1 & -0.5 + 0.866i & -0.5 - 0.866i \end{pmatrix}$$

Η σύνδεση των κυκλωμάτων ακολουθεί με βάση το είδος του σφάλματος (διφασικό προς γη):



Τώρα θα ορίσουμε τις παραμέτρους του δικτύου που έχουμε:

Γεννήτρια στον ζυγό B1 (Φασική τάση):

$$V_{G1} := \frac{(740.152 \cdot 10^3)}{\sqrt{3}} \text{ V} = 4.273 \times 10^5 \text{ V}$$

$$R_{G1_1} := 1.69882 \text{ ohm} \quad X_{G1_1} := 16.988 \text{ ohm} \quad Z_{G1_1} := (1.69882 + 16.988i) \text{ ohm} \text{ θετικής ακολουθίας}$$

$$R_{G1_2} := 1.69882 \text{ ohm} \quad X_{G1_2} := 16.988 \text{ ohm} \quad Z_{G1_2} := (1.69882 + 16.988i) \text{ ohm} \text{ αρνητικής ακολουθίας}$$

$$R_{G1_0} := 5.09646 \text{ ohm} \quad X_{G1_0} := 50.9646 \text{ ohm} \quad Z_{G1_0} := (5.09646 + 50.9646i) \text{ ohm} \text{ μηδενικής ακολουθίας}$$

Φορτίο στον ζυγό B1:

Έχει τοποθετηθεί ωμικό φορτίο 300 MW υπό πολική τάση 735 kV, το οποίο όμως δεν συμπεριλαμβάνεται στα κυκλώματα ακολουθίας.

Γραμμή Μεταφοράς:

Η σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς υπολογίζεται ως $Z = R + jX = r + j2\pi f L$.

Τα στοιχεία r, L και L λαμβάνονται από τις παραμέτρους του εκτελέσιμου αρχείου.

$$R_1 := 2.546 \text{ ohm} \quad X_1 := 70.3993 \text{ ohm} \quad Z_1 := (2.546 + 70.3993i) \text{ ohm} \text{ θετικής ακολουθίας}$$

$$R_2 := 2.546\text{ohm} \quad X_2 := 70.3993\text{ohm} \quad Z_2 := (2.546 + 70.3993i)\text{ohm} \quad \text{αρνητικής ακολουθίας}$$

$$R_0 := 77.28\text{ohm} \quad X_0 := 311.093\text{ohm} \quad Z_0 := (77.28 + 311.093i)\text{ohm} \quad \text{μηδενικής ακολουθίας}$$

Η αγωγιμότητα της γραμμής μεταφοράς υπολογίζεται ως $Y=G+j(1/X_c)=gI+j2\pi fCl$.
Τα στοιχεία g,l,f και C λαμβάνονται από τις παραμέτρους του εκτελέσιμου αρχείου.

$$Y_1 := 9.6057i \cdot 10^{-4} \text{ohm}^{-1} \quad Y_2 := 9.6057i \cdot 10^{-4} \text{ohm}^{-1} \quad Y_0 := 5.8441i \cdot 10^{-4} \text{ohm}^{-1}$$

Γεννήτρια στον ζυγό B2 (Φασική τάση):

$$V_{G2} := \frac{(727.65 \cdot 10^3)}{\sqrt{3}} \text{V} = 4.201 \times 10^5 \text{V}$$

$$R_{G2_1} := 0.8929\text{ohm} \quad X_{G2_1} := 6.2505\text{ohm} \quad Z_{G2_1} := (0.8929 + 6.2505i)\text{ohm} \quad \text{θετικής ακολουθίας}$$

$$R_{G2_2} := 0.8929\text{ohm} \quad X_{G2_2} := 6.2505\text{ohm} \quad Z_{G2_2} := (0.8929 + 6.2505i)\text{ohm} \quad \text{αρνητικής ακολουθίας}$$

$$R_{G2_0} := 2.6787\text{ohm} \quad X_{G2_0} := 18.7515\text{ohm} \quad Z_{G2_0} := (2.6787 + 18.7515i)\text{ohm} \quad \text{μηδενικής ακολουθίας}$$

Φορτίο στον ζυγό B2:

Έχει τοποθετηθεί ωμικό φορτίο 200 MW υπό πολική τάση 735 kV, το οποίο όμως δεν συμπεριλαμβάνεται στα κυκλώματα ακολουθίας.

Έπειτα, θα ορίσουμε τις παραμέτρους του βραχυκυκλώματος που θέλουμε να μελετήσουμε :

$$m := 0.5 \quad R_F := 0\text{ohm}$$

Τώρα είμαστε σε θέση να επιλύσουμε το βραχυκύκλωμα.

Αριστερά του σημείου βραχυκύκλωσης εφαρμόζουμε θεώρημα Thevenin για να εξάγουμε το ισοδύναμο κύκλωμα στα τρία ακολουθιακά κυκλώματα και λαμβάνουμε:

$$Z_{Th1_1} := \frac{\frac{2 \cdot (2 \cdot m \cdot Z_1 + m^2 \cdot Z_1 \cdot Y_1 \cdot Z_{G1_1} + 2 \cdot Z_{G1_1})}{(2 + m \cdot Y_1 \cdot Z_{G1_1}) \cdot m \cdot Y_1}}{\left(\frac{2}{m \cdot Y_1} \right) + \left(\frac{2 \cdot m \cdot Z_1 + m^2 \cdot Z_1 \cdot Y_1 \cdot Z_{G1_1} + 2 \cdot Z_{G1_1}}{2 + m \cdot Y_1 \cdot Z_{G1_1}} \right)}$$

$$Z_{Th1_1} = (3.062 + 52.918i) \Omega \quad |Z_{Th1_1}| = 53.007 \Omega \quad \arg(Z_{Th1_1}) = 86.688 \cdot \text{deg}$$

$$V_{Th1} := \left(\frac{2 \cdot V_{G1}}{8 \cdot m \cdot Y_1 \cdot Z_{G1_1} + 2m^3 \cdot Y_1^2 \cdot Z_1 \cdot Z_{G1_1} + 4 \cdot m^2 \cdot Y_1 \cdot Z_1 + 8} \right)$$

$$V_{Th1} = (1.086 \times 10^5 - 123.38i) \text{ V} \quad |V_{Th1}| = 1.086 \times 10^5 \text{ V} \quad \arg(V_{Th1}) = -0.065 \cdot \text{deg}$$

Τα μεγέθη είναι φασικά.

$$Z_{Th2_1} := \frac{\frac{2 \cdot (2 \cdot m \cdot Z_2 + m^2 \cdot Z_2 \cdot Y_2 \cdot Z_{G1_2} + 2 \cdot Z_{G1_2})}{(2 + m \cdot Y_2 \cdot Z_{G1_2}) \cdot m \cdot Y_2}}{\left(\frac{2}{m \cdot Y_2} \right) + \left(\frac{2 \cdot m \cdot Z_2 + m^2 \cdot Z_2 \cdot Y_2 \cdot Z_{G1_2} + 2 \cdot Z_{G1_2}}{2 + m \cdot Y_2 \cdot Z_{G1_2}} \right)}$$

$$Z_{Th2_1} = (3.062 + 52.918i) \Omega \quad |Z_{Th2_1}| = 53.007 \Omega \quad \arg(Z_{Th2_1}) = 86.688 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{Th0_1} := \frac{\frac{2 \cdot (2 \cdot m \cdot Z_0 + m^2 \cdot Z_0 \cdot Y_0 \cdot Z_{G1_0} + 2 \cdot Z_{G1_0})}{(2 + m \cdot Y_0 \cdot Z_{G1_0}) \cdot m \cdot Y_0}}{\left(\frac{2}{m \cdot Y_0} \right) + \left(\frac{2 \cdot m \cdot Z_0 + m^2 \cdot Z_0 \cdot Y_0 \cdot Z_{G1_0} + 2 \cdot Z_{G1_0}}{2 + m \cdot Y_0 \cdot Z_{G1_0}} \right)}$$

$$Z_{Th0_1} = (46.585 + 213.031i) \Omega \quad |Z_{Th0_1}| = 218.065 \Omega \quad \arg(Z_{Th0_1}) = 77.665 \cdot \text{deg}$$

Και αντίστοιχα δεξιά του σημείου βραχυκύκλωσης:

$$Z_{Th1_2} := \frac{\frac{2 \cdot [2 \cdot (1-m) \cdot Z_1 + (1-m)^2 \cdot Z_1 \cdot Y_1 \cdot Z_{G2_1} + 2 \cdot Z_{G2_1}]}{[2 + (1-m) \cdot Y_1 \cdot Z_{G2_1}] \cdot (1-m) \cdot Y_1}}{\left[\frac{2}{(1-m) \cdot Y_1} \right] + \left[\frac{2 \cdot (1-m) \cdot Z_1 + (1-m)^2 \cdot Z_1 \cdot Y_1 \cdot Z_{G2_1} + 2 \cdot Z_{G2_1}}{2 + (1-m) \cdot Y_1 \cdot Z_{G2_1}} \right]}$$

$$Z_{Th1_2} = (2.212 + 41.875i) \Omega \quad |Z_{Th1_2}| = 41.934 \Omega \quad \arg(Z_{Th1_2}) = 86.976 \cdot \text{deg}$$

$$V_{Th2} := \left[\frac{2 \cdot V_{G2}}{8 \cdot (1-m) \cdot Y_1 \cdot Z_{G2_1} + 2(1-m)^3 \cdot Y_1^2 \cdot Z_1 \cdot Z_{G2_1} + 4 \cdot (1-m)^2 \cdot Y_1 \cdot Z_1 + 8} \right]$$

$$V_{Th2} = (1.062 \times 10^5 - 78.7i) \text{ V} \quad |V_{Th2}| = 1.062 \times 10^5 \text{ V} \quad \arg(V_{Th2}) = -0.042 \cdot \text{deg}$$

Τα μεγέθη είναι φασικά.

$$Z_{Th2_2} := \frac{\frac{2 \cdot [2 \cdot (1-m) \cdot Z_2 + (1-m)^2 \cdot Z_2 \cdot Y_2 \cdot Z_{G2_2} + 2 \cdot Z_{G2_2}]}{[2 + (1-m) \cdot Y_2 \cdot Z_{G2_2}] \cdot (1-m) \cdot Y_2}}{\left[\frac{2}{(1-m) \cdot Y_2} \right] + \left[\frac{2 \cdot (1-m) \cdot Z_2 + (1-m)^2 \cdot Z_2 \cdot Y_2 \cdot Z_{G2_2} + 2 \cdot Z_{G2_2}}{2 + (1-m) \cdot Y_2 \cdot Z_{G2_2}} \right]}$$

$$Z_{Th2_2} = (2.212 + 41.875i) \Omega \quad |Z_{Th2_2}| = 41.934 \Omega \quad \arg(Z_{Th2_2}) = 86.976 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{Th0_2} := \frac{\frac{2 \cdot [2 \cdot (1-m) \cdot Z_0 + (1-m)^2 \cdot Z_0 \cdot Y_0 \cdot Z_{G2_0} + 2 \cdot Z_{G2_0}]}{[2 + (1-m) \cdot Y_0 \cdot Z_{G2_0}] \cdot (1-m) \cdot Y_0}}{\left[\frac{2}{(1-m) \cdot Y_0} \right] + \left[\frac{2 \cdot (1-m) \cdot Z_0 + (1-m)^2 \cdot Z_0 \cdot Y_0 \cdot Z_{G2_0} + 2 \cdot Z_{G2_0}}{2 + (1-m) \cdot Y_0 \cdot Z_{G2_0}} \right]}$$

$$Z_{Th0_2} = (43.521 + 178.636i) \Omega \quad |Z_{Th0_2}| = 183.861 \Omega \quad \arg(Z_{Th0_2}) = 76.308 \cdot \text{deg}$$

Οπότε, τώρα οι ισοδύναμες αντιστάσεις των ακολουθιακών κυκλωμάτων καθώς και η ισοδύναμη τάση του κυκλώματος θετικής ακολουθίας υπολογίζονται από το θεώρημα Thevenin ως εξής:

$$(Z_{1.\text{final}}) := \frac{Z_{Th1_1} \cdot Z_{Th1_2}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} = (1.287 + 23.377i) \Omega$$

$$|Z_{1.\text{final}}| = 23.412 \Omega \quad \arg(Z_{1.\text{final}}) = 86.849 \cdot \text{deg}$$

Θα ξαναεφαρμόσουμε θεώρημα Thevenin.

Από την Αρχή της Υπέρθεσης, η τάση E_1 του κυκλώματος θετικής ακολουθίας προκύπτει ως εξής:

$$E_1 := V_{Th1} \cdot \left(\frac{Z_{Th1_2}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} \right) + V_{Th2} \cdot \left(\frac{Z_{Th1_1}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} \right) = (1.073 \times 10^5 - 95.478i) \text{ V}$$

$$|E_1| = 1.073 \times 10^5 \text{ V} \quad \arg(E_1) = -0.051 \cdot \text{deg} \quad \text{Η τάση είναι φασική προφανώς.}$$

$$Z_{2.\text{final}} := \frac{Z_{\text{Th1}_1} \cdot Z_{\text{Th1}_2}}{Z_{\text{Th1}_1} + Z_{\text{Th1}_2}} = (1.287 + 23.377i) \Omega$$

$$|Z_{2.\text{final}}| = 23.412 \Omega \quad \arg(Z_{2.\text{final}}) = 86.849 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{0.\text{final}} := \frac{Z_{\text{Th0}_1} \cdot Z_{\text{Th0}_2}}{Z_{\text{Th0}_1} + Z_{\text{Th0}_2}} = (22.562 + 97.176i) \Omega$$

$$|Z_{0.\text{final}}| = 99.761 \Omega \quad \arg(Z_{0.\text{final}}) = 76.929 \cdot \text{deg}$$

Στο δικρασικό βραχυκύκλωμα, με βάση την σύνδεση των τριών ακολουθιακών κυκλωμάτων, τα ακολουθιακά ρεύματα υπολογίζονται ως εξής:

$$I_1 := \frac{E_1}{Z_{1.\text{final}} + \frac{Z_{2.\text{final}} \cdot (Z_{0.\text{final}} + 3 \cdot R_F)}{Z_{2.\text{final}} + Z_{0.\text{final}} + 3 \cdot R_F}} = (173.965 - 2.524i \times 10^3) \text{ A}$$

$$|I_1| = 2.53 \times 10^3 \text{ A} \quad \arg(I_1) = -86.057 \cdot \text{deg}$$

$$I_2 := -I_1 \cdot \frac{(Z_{0.\text{final}} + 3 \cdot R_F)}{(Z_{0.\text{final}} + Z_{1.\text{final}} + 3 \cdot R_F)} = (-73.902 + 2.052i \times 10^3) \text{ A}$$

$$|I_2| = 2.054 \times 10^3 \text{ A} \quad \arg(I_2) = 92.062 \cdot \text{deg}$$

$$I_0 := -I_1 \cdot \frac{Z_{2.\text{final}}}{(Z_{0.\text{final}} + Z_{1.\text{final}} + 3 \cdot R_F)} = (-100.063 + 471.478i) \text{ A}$$

$$|I_0| = 481.98 \text{ A} \quad \arg(I_0) = 101.982 \cdot \text{deg}$$

Οπότε στο τριφασικό σύστημα τα ρεύματα στο σημείο βραχυκύκλωσης υπολογίζονται ως:

$$I_{abcF} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -7.105 \times 10^{-14} \\ -4.113 \times 10^3 + 492.454i \\ 3.813 \times 10^3 + 921.96i \end{pmatrix} A$$

Ενώ οι τάσεις:

$$V_1 := E_1 - I_1 \cdot Z_{1,final} = (4.807 \times 10^4 - 913.92i) V$$

$$V_2 := -I_2 \cdot Z_{2,final} = (4.807 \times 10^4 - 913.92i) V$$

$$V_0 := -I_0 \cdot Z_{0,final} = (4.807 \times 10^4 - 913.92i) V$$

$$V_{abcF} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.442 \times 10^5 - 2.742i \times 10^3 \\ 2.115 - 0.04i \\ 2.115 - 0.04i \end{pmatrix} V$$

Τώρα θέλουμε να υπολογίσουμε τις τάσεις και τα ρεύματα στα σημεία αναχώρησης και άφιξης της γραμμής, δηλαδή στα σημεία που τοποθετούνται οι ηλεκτρονόμοι. Για να το πετύχουμε αυτό θα πρέπει να κάνουμε κυκλωματική ανάλυση εντός των ακολουθιακών κυκλωμάτων:

Από διαίρεση ρεύματος στο σημείο βραχυκύκλωσης έχουμε για τα τρία ακολουθιακά κυκλώματα αντίστοιχα:

$$I_{Th1_1} := I_1 \cdot \left(\frac{Z_{Th1_2}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} \right) + \frac{V_{Th1} - V_{Th2}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} = (80.888 - 1.14i \times 10^3) A$$

Έχει εφαρμοστεί η Αρχή της Υπέρθεσης για το κυκλώμα χωρίς πηγές (πρώτος όρος) και παρουσία πηγών (δεύτερος όρος). Ομοίως για το υποκύκλωμα δεξιά του σφάλματος:

$$I_{Th1_2} := I_1 \cdot \left(\frac{Z_{Th1_1}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} \right) + \frac{V_{Th2} - V_{Th1}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} = (93.077 - 1.384i \times 10^3) A$$

$$I_{Th2_1} := I_2 \cdot \left(\frac{Z_{Th2_2}}{Z_{Th2_1} + Z_{Th2_2}} \right) = (-35.18 + 906.418i) A$$

$$I_{Th2_2} := I_2 \cdot \left(\frac{Z_{Th2_1}}{Z_{Th2_1} + Z_{Th2_2}} \right) = (-38.722 + 1.146i \times 10^3) A$$

$$I_{Th0_1} := I_0 \cdot \left(\frac{Z_{Th0_2}}{Z_{Th0_1} + Z_{Th0_2}} \right) = (-43.002 + 216.263i) A$$

$$I_{Th0_2} := I_0 \cdot \left(\frac{Z_{Th0_1}}{Z_{Th0_1} + Z_{Th0_2}} \right) = (-57.062 + 255.215i) A$$

Από Νόμο Ρευμάτων Kirchhoff, τα ρεύματα που διαρρέουν τις mZ1, mZ2, mZ0 και τις (1-m)Z1, (1-m)Z2, (1-m)Z0:

$$I_{B1a1} := I_{Th1_1} + \frac{V_1 \cdot m \cdot Y_1}{2} = (81.107 - 1.128i \times 10^3) A$$

$$I_{B1a2} := I_{Th2_1} + \frac{V_2 \cdot m \cdot Y_2}{2} = (-34.96 + 917.963i) A$$

$$I_{B1a0} := I_{Th0_1} + \frac{V_0 \cdot m \cdot Y_0}{2} = (-42.868 + 223.287i) A$$

$$I_{B2a1} := I_{Th1_2} + \frac{V_1 \cdot (1 - m) \cdot Y_1}{2} = (93.297 - 1.373i \times 10^3) A$$

$$I_{B2a2} := I_{Th2_2} + \frac{V_2 \cdot (1 - m) \cdot Y_2}{2} = (-38.502 + 1.158i \times 10^3) A$$

$$I_{B2a0} := I_{Th0_2} + \frac{V_0 \cdot (1 - m) \cdot Y_0}{2} = (-56.928 + 262.239i) A$$

Από Νόμο Τάσεων Kirchhoff, οι τάσεις ακολουθίας στον ζυγό B1 είναι:

$$V_{B1_1} := V_1 + m \cdot Z_1 \cdot I_{B1a1} = (8.789 \times 10^4 + 504.883i) V$$

$$|V_{B1_1}| = 8.789 \times 10^4 V \quad \arg(V_{B1_1}) = 0.329 \cdot \text{deg}$$

$$V_{B1_2} := V_2 + m \cdot Z_2 \cdot I_{B1a2} = (1.572 \times 10^4 - 975.942i) V$$

$$|V_{B1_2}| = 1.575 \times 10^4 V \quad \arg(V_{B1_2}) = -3.553 \cdot \text{deg}$$

$$V_{B1_0} := V_0 + m \cdot Z_0 \cdot I_{B1a0} = (1.169 \times 10^4 + 1.046i \times 10^3) V$$

$$|V_{B1_0}| = 1.173 \times 10^4 \text{ V} \quad \arg(V_{B1_0}) = 5.114 \cdot \text{deg}$$

Ενώ στον ζυγό B2 οι τάσεις ακολουθίας είναι:

$$V_{B2_1} := V_1 + (1 - m) \cdot Z_1 \cdot I_{B2a1} = (9.651 \times 10^4 + 622.721i) \text{ V}$$

$$|V_{B2_1}| = 9.651 \times 10^4 \text{ V} \quad \arg(V_{B2_1}) = 0.37 \cdot \text{deg}$$

$$V_{B2_2} := V_2 + (1 - m) \cdot Z_2 \cdot I_{B2a2} = (7.28 \times 10^3 - 795.655i) \text{ V}$$

$$|V_{B1_2}| = 1.575 \times 10^4 \text{ V} \quad \arg(V_{B1_2}) = -3.553 \cdot \text{deg}$$

$$V_{B2_0} := V_0 + (1 - m) \cdot Z_0 \cdot I_{B1a0} = (1.169 \times 10^4 + 1.046i \times 10^3) \text{ V}$$

$$|V_{B1_0}| = 1.173 \times 10^4 \text{ V} \quad \arg(V_{B1_0}) = 5.114 \cdot \text{deg}$$

Στον ζυγό B1 τα ακολουθιακά ρεύματα υπολογίζονται

$$I_{B1_1} := I_{B1a1} + \frac{m \cdot Y_1 \cdot V_{B1_1}}{2} = (80.986 - 1.107i \times 10^3) \text{ A}$$

$$|I_{B1_1}| = 1.11 \times 10^3 \text{ A} \quad \arg(I_{B1_1}) = -85.816 \cdot \text{deg}$$

$$I_{B1_2} := I_{B1a2} + \frac{m \cdot Y_2 \cdot V_{B1_2}}{2} = (-34.726 + 921.737i) \text{ A}$$

$$|I_{B1_2}| = 922.391 \text{ A} \quad \arg(I_{B1_2}) = 92.158 \cdot \text{deg}$$

$$I_{B1_0} := I_{B1a0} + \frac{m \cdot Y_0 \cdot V_{B1_0}}{2} = (-43.021 + 224.994i) \text{ A}$$

$$|I_{B1_0}| = 229.07 \text{ A} \quad \arg(I_{B1_0}) = 100.825 \cdot \text{deg}$$

Στον ζυγό B2 τα ακολουθιακά ρεύματα υπολογίζονται

$$I_{B2_1} := I_{B2a1} + \frac{(1 - m) \cdot Y_1 \cdot V_{B2_1}}{2} = (93.147 - 1.349i \times 10^3) \text{ A}$$

$$|I_{B2_1}| = 1.353 \times 10^3 \text{ A} \quad \arg(I_{B2_1}) = -86.051 \cdot \text{deg}$$

$$I_{B2_2} := I_{B2a2} + \frac{(1-m) \cdot Y_2 \cdot V_{B2_2}}{2} = (-38.311 + 1.159i \times 10^3) \text{ A}$$

$$|I_{B2_2}| = 1.16 \times 10^3 \text{ A} \quad \arg(I_{B2_2}) = 91.893 \cdot \text{deg}$$

$$I_{B2_0} := I_{B2a0} + \frac{(1-m) \cdot Y_0 \cdot V_{B2_0}}{2} = (-57.081 + 263.946i) \text{ A}$$

$$|I_{B2_0}| = 270.048 \text{ A} \quad \arg(I_{B2_0}) = 102.203 \cdot \text{deg}$$

Επομένως συγκεντρωτικά οι φασικές τάσεις και ρεύματα του τριφασικού συστήματος στις θέσεις των ζυγών B1 και B2 υπολογίζονται:

Ζυγός B1:

$$\begin{pmatrix} V_{B1_a} \\ V_{B1_b} \\ V_{B1_c} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{B1_0} \\ V_{B1_1} \\ V_{B1_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.153 \times 10^5 + 574.819i \\ -3.883 \times 10^4 - 6.122i \times 10^4 \\ -4.14 \times 10^4 + 6.378i \times 10^4 \end{pmatrix} \text{ V}$$

$$\begin{pmatrix} |V_{B1_a}| \\ |V_{B1_b}| \\ |V_{B1_c}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.153 \times 10^5 \\ 7.249 \times 10^4 \\ 7.604 \times 10^4 \end{pmatrix} \text{ V} \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{B1_a}) \\ \arg(V_{B1_b}) \\ \arg(V_{B1_c}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.286 \\ -122.387 \\ 122.986 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$\begin{pmatrix} I_{B1_a} \\ I_{B1_b} \\ I_{B1_c} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{B1_0} \\ I_{B1_1} \\ I_{B1_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.239 + 39.687i \\ -1.823 \times 10^3 + 217.393i \\ 1.691 \times 10^3 + 417.895i \end{pmatrix} \text{ A}$$

$$\begin{pmatrix} |I_{B1_a}| \\ |I_{B1_b}| \\ |I_{B1_c}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 39.819 \\ 1.836 \times 10^3 \\ 1.742 \times 10^3 \end{pmatrix} \text{ A} \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{B1_a}) \\ \arg(I_{B1_b}) \\ \arg(I_{B1_c}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 85.334 \\ 173.2 \\ 13.883 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

Ζυγός B2:

$$\begin{pmatrix} V_{B2_a} \\ V_{B2_b} \\ V_{B2_c} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{B2_0} \\ V_{B2_1} \\ V_{B2_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.155 \times 10^5 + 872.944i \\ -3.898 \times 10^4 - 7.614i \times 10^4 \\ -4.144 \times 10^4 + 7.84i \times 10^4 \end{pmatrix} V$$

$$\begin{pmatrix} |V_{B2_a}| \\ |V_{B2_b}| \\ |V_{B2_c}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.155 \times 10^5 \\ 8.554 \times 10^4 \\ 8.868 \times 10^4 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{B2_a}) \\ \arg(V_{B2_b}) \\ \arg(V_{B2_c}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.433 \\ -117.108 \\ 117.856 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$\begin{pmatrix} I_{B2_a} \\ I_{B2_b} \\ I_{B2_c} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{B2_0} \\ I_{B2_1} \\ I_{B2_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2.245 + 73.758i \\ -2.257 \times 10^3 + 245.137i \\ 2.088 \times 10^3 + 472.934i \end{pmatrix} A$$

$$\begin{pmatrix} |I_{B2_a}| \\ |I_{B2_b}| \\ |I_{B2_c}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 73.792 \\ 2.27 \times 10^3 \\ 2.141 \times 10^3 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{B2_a}) \\ \arg(I_{B2_b}) \\ \arg(I_{B2_c}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 91.743 \\ 173.801 \\ 12.762 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

Εδώ τελείωσε η επίλυση του βραχυκυκλώματος, στην συνέχεια, θα υπολογίσουμε τις σύνθετες αντιστάσεις που υπολογίζει ο ηλεκτρονόμος.

Πολικές Σύνθετες Αντιστάσεις:

$$Z_{ab.B1} := \frac{V_{B1_a} - V_{B1_b}}{I_{B1_a} - I_{B1_b}} = (80.337 + 41.652i) \Omega$$

$$|Z_{ab.B1}| = 90.492 \Omega \quad \arg(Z_{ab.B1}) = 27.405 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{bc.B1} := \frac{V_{B1_b} - V_{B1_c}}{I_{B1_b} - I_{B1_c}} = (1.295 + 35.499i) \Omega$$

$$|Z_{bc.B1}| = 35.523 \Omega \quad \arg(Z_{bc.B1}) = 87.911 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{ca.B1} := \frac{V_{B1_c} - V_{B1_a}}{I_{B1_c} - I_{B1_a}} = (-80.418 + 55.478i) \Omega$$

$$|Z_{ca.B1}| = 97.697 \Omega \quad \arg(Z_{ca.B1}) = 145.399 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{ab.B2} := \frac{V_{B2_a} - V_{B2_b}}{I_{B2_a} - I_{B2_b}} = (65.524 + 39.135i) \Omega$$

$$|Z_{ab.B2}| = 76.321 \Omega \quad \arg(Z_{ab.B2}) = 30.848 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{bc.B2} := \frac{V_{B2_b} - V_{B2_c}}{I_{B2_b} - I_{B2_c}} = (1.295 + 35.499i) \Omega$$

$$|Z_{bc.B2}| = 35.523 \Omega \quad \arg(Z_{bc.B2}) = 87.911 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{ca.B2} := \frac{V_{B2_c} - V_{B2_a}}{I_{B2_c} - I_{B2_a}} = (-65.591 + 49.616i) \Omega$$

$$|Z_{ca.B2}| = 82.244 \Omega \quad \arg(Z_{ca.B2}) = 142.894 \cdot \text{deg}$$

Φασικές Σύνθετες Αντιστάσεις:

Θα χρειαστεί να οριστεί ο λεγόμενος Compensation Factor k.

$$k := \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \quad \text{Έτσι:}$$

$$Z_{a.B1} := \frac{V_{B1_a}}{I_{B1_a} + k(I_{B1_a} + I_{B1_b} + I_{B1_c})} = (10.884 - 133.721i) \Omega$$

$$|Z_{a.B1}| = 134.164 \Omega \quad \arg(Z_{a.B1}) = -85.347 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{b.B1} := \frac{V_{B1_b}}{I_{B1_b} + k(I_{B1_a} + I_{B1_b} + I_{B1_c})} = (1.209 + 35.476i) \Omega$$

$$|Z_{b.B1}| = 35.497 \Omega \quad \arg(Z_{b.B1}) = 88.049 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{c.B1} := \frac{V_{B1_c}}{I_{B1_c} + k(I_{B1_a} + I_{B1_b} + I_{B1_c})} = (1.349 + 35.434i) \Omega$$

$$|Z_{c.B1}| = 35.46 \Omega \quad \arg(Z_{c.B1}) = 87.82 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{a.B2} := \frac{V_{B2_a}}{I_{B2_a} + k \cdot (I_{B2_a} + I_{B2_b} + I_{B2_c})} = (5.956 - 110.911i) \Omega$$

$$|Z_{a.B2}| = 111.071 \Omega \quad \arg(Z_{a.B2}) = -86.926 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{b.B2} := \frac{V_{B2_b}}{I_{B2_b} + k \cdot (I_{B2_a} + I_{B2_b} + I_{B2_c})} = (-0.964 + 33.972i) \Omega$$

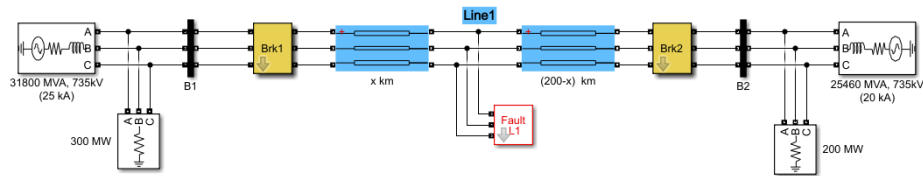
$$|Z_{b.B2}| = 33.985 \Omega \quad \arg(Z_{b.B2}) = 91.626 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{c.B2} := \frac{V_{B2_c}}{I_{B2_c} + k \cdot (I_{B2_a} + I_{B2_b} + I_{B2_c})} = (3.634 + 34.225i) \Omega$$

$$|Z_{c.B2}| = 34.417 \Omega \quad \arg(Z_{c.B2}) = 83.939 \cdot \text{deg}$$

Τριφασικό Βραχυκύκλωμα στο Μοντέλο Μεσαίου Μήκους

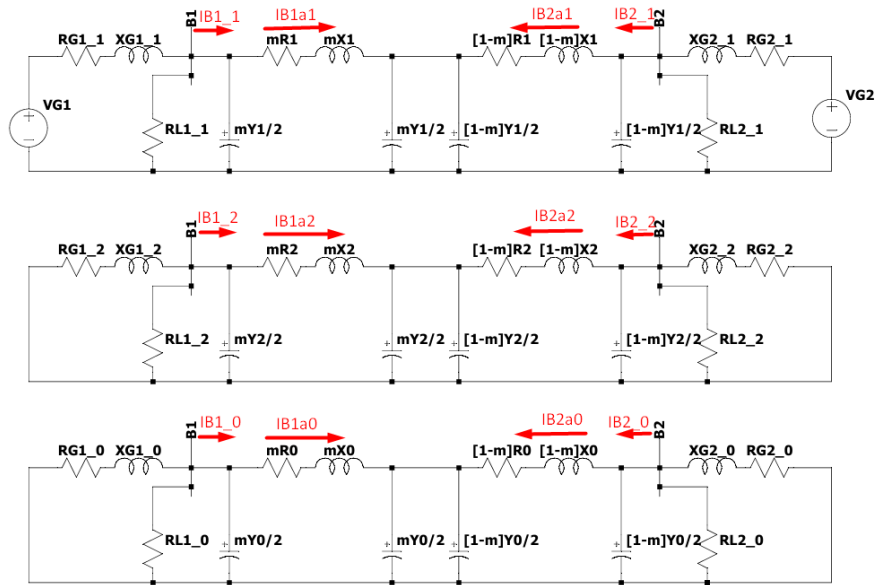
Το δίκτυο που μελετάμε είναι το παρακάτω:



$$a := -0.5 + 0.866i$$

$$A_1 := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -0.5 - 0.866i & -0.5 + 0.866i \\ 1 & -0.5 + 0.866i & -0.5 - 0.866i \end{pmatrix}$$

Η σύνδεση των κυκλωμάτων ακολουθεί με βάση το είδος του σφάλματος (Τριφασικό):



Τώρα θα ορίσουμε τις παραμέτρους του δικτύου που έχουμε:

Γεννήτρια στον ζυγό B1 (Φασική τάση):

$$V_{G1} := \frac{(740.152 \cdot 10^3)}{\sqrt{3}} V = 4.273 \times 10^5 V$$

$$R_{G1_1} := 1.69882 \text{ ohm} \quad X_{G1_1} := 16.988 \text{ ohm} \quad Z_{G1_1} := (1.69882 + 16.988i) \text{ ohm} \text{ θετικής ακολουθίας}$$

$$R_{G1_2} := 1.69882 \text{ ohm} \quad X_{G1_2} := 16.988 \text{ ohm} \quad Z_{G1_2} := (1.69882 + 16.988i) \text{ ohm} \text{ αρνητικής ακολουθίας}$$

$$R_{G1_0} := 5.09646 \text{ ohm} \quad X_{G1_0} := 50.9646 \text{ ohm} \quad Z_{G1_0} := (5.09646 + 50.9646i) \text{ ohm} \text{ μηδενικής ακολουθίας}$$

Φορτίο στον ζυγό B1:

Έχει τοποθετηθεί ωμικό φορτίο 300 MW υπό πολική τάση 735 kV, το οποίο όμως δεν συμπεριλαμβάνεται στα κλώματα ακολουθίας.

Γραμμή Μεταφοράς:

Η σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς υπολογίζεται ως $Z = R + jX = r + j2\pi fL$.

Τα στοιχεία r, f και L λαμβάνονται από τις παραμέτρους του εκτελέσιμου αρχείου.

$$R_1 := 2.546 \text{ ohm} \quad X_1 := 70.3993 \text{ ohm} \quad Z_1 := (2.546 + 70.3993i) \text{ ohm}$$

$$R_2 := 2.546\text{ohm} \quad X_2 := 70.3993\text{ohm} \quad Z_2 := (2.546 + 70.3993i)\text{ohm}$$

$$R_0 := 77.28\text{ohm} \quad X_0 := 311.093\text{ohm} \quad Z_0 := (77.28 + 311.093i)\text{ohm}$$

Η αγωγιμότητα της γραμμής μεταφοράς υπολογίζεται ως $Y=G+j(1/X_c)=g+j2\pi fCl$.
Τα στοιχεία g,l,f και C λαμβάνονται από τις παραμέτρους του εκτελέσιμου αρχείου.

$$Y_1 := 9.6057i \cdot 10^{-4} \text{ohm}^{-1} \quad Y_2 := 9.6057i \cdot 10^{-4} \text{ohm}^{-1} \quad Y_0 := 5.8441i \cdot 10^{-4} \text{ohm}^{-1}$$

Γεννήτρια στον ζυγό B2 (Φασική τάση):

$$V_{G2} := \frac{(727.65 \cdot 10^3)}{\sqrt{3}} \text{V} = 4.201 \times 10^5 \text{V}$$

$$R_{G2_1} := 0.8929\text{ohm} \quad X_{G2_1} := 6.2505\text{ohm} \quad Z_{G2_1} := (0.8929 + 6.2505i)\text{ohm} \quad \text{θετικής ακολουθίας}$$

$$R_{G2_2} := 0.8929\text{ohm} \quad X_{G2_2} := 6.2505\text{ohm} \quad Z_{G2_2} := (0.8929 + 6.2505i)\text{ohm} \quad \text{αρνητικής ακολουθίας}$$

$$R_{G2_0} := 2.6787\text{ohm} \quad X_{G2_0} := 18.7515\text{ohm} \quad Z_{G2_0} := (2.6787 + 18.7515i)\text{ohm} \quad \text{μηδενικής ακολουθίας}$$

Φορτίο στον ζυγό B2:

Έχει τοποθετηθεί ωμικό φορτίο 200 MW υπό πολική τάση 735 kV, το οποίο όμως δεν συμπεριλαμβάνεται στα κυκλώματα ακολουθίας.

Έπειτα, θα ορίσουμε τις παραμέτρους του βραχυκυκλώματος που θέλουμε να μελετήσουμε :

$$m := 0.5 \quad R_F := 0\text{ohm}$$

Τώρα είμαστε σε θέση να επιλύσουμε το βραχυκύκλωμα.

Αριστερά του σημείου βραχυκύκλωσης εφαρμόζουμε θεώρημα Thevenin για να εξάγουμε το ισοδύναμο κύκλωμα στα τρία ακολουθιακά κυκλώματα και λαμβάνονται:

$$Z_{Th1_1} := \frac{2 \cdot (2 \cdot m \cdot Z_1 + m^2 \cdot Z_1 \cdot Y_1 \cdot Z_{G1_1} + 2 \cdot Z_{G1_1})}{(2 + m \cdot Y_1 \cdot Z_{G1_1}) \cdot m \cdot Y_1} \\ \left(\frac{2}{m \cdot Y_1} \right) + \left(\frac{2 \cdot m \cdot Z_1 + m^2 \cdot Z_1 \cdot Y_1 \cdot Z_{G1_1} + 2 \cdot Z_{G1_1}}{2 + m \cdot Y_1 \cdot Z_{G1_1}} \right)$$

$$Z_{Th1_1} = (3.062 + 52.918i) \Omega \quad |Z_{Th1_1}| = 53.007 \Omega \quad \arg(Z_{Th1_1}) = 86.688 \cdot \text{deg}$$

$$V_{Th1} := \left(\frac{2 \cdot V_{G1}}{8 \cdot m \cdot Y_1 \cdot Z_{G1_1} + 2m^3 \cdot Y_1^2 \cdot Z_1 \cdot Z_{G1_1} + 4 \cdot m^2 \cdot Y_1 \cdot Z_1 + 8} \right)$$

$$V_{Th1} = (1.086 \times 10^5 - 123.38i) V \quad |V_{Th1}| = 1.086 \times 10^5 V \quad \arg(V_{Th1}) = -0.065 \cdot \text{deg}$$

Τα μεγέθη είναι φασικά.

$$Z_{Th2_1} := \frac{\frac{2 \cdot (2 \cdot m \cdot Z_2 + m^2 \cdot Z_2 \cdot Y_2 \cdot Z_{G1_2} + 2 \cdot Z_{G1_2})}{(2 + m \cdot Y_2 \cdot Z_{G1_2}) \cdot m \cdot Y_2}}{\left(\frac{2}{m \cdot Y_2} \right) + \left(\frac{2 \cdot m \cdot Z_2 + m^2 \cdot Z_2 \cdot Y_2 \cdot Z_{G1_2} + 2 \cdot Z_{G1_2}}{2 + m \cdot Y_2 \cdot Z_{G1_2}} \right)}$$

$$Z_{Th2_1} = (3.062 + 52.918i) \Omega \quad |Z_{Th2_1}| = 53.007 \Omega \quad \arg(Z_{Th2_1}) = 86.688 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{Th0_1} := \frac{\frac{2 \cdot (2 \cdot m \cdot Z_0 + m^2 \cdot Z_0 \cdot Y_0 \cdot Z_{G1_0} + 2 \cdot Z_{G1_0})}{(2 + m \cdot Y_0 \cdot Z_{G1_0}) \cdot m \cdot Y_0}}{\left(\frac{2}{m \cdot Y_0} \right) + \left(\frac{2 \cdot m \cdot Z_0 + m^2 \cdot Z_0 \cdot Y_0 \cdot Z_{G1_0} + 2 \cdot Z_{G1_0}}{2 + m \cdot Y_0 \cdot Z_{G1_0}} \right)}$$

$$Z_{Th0_1} = (46.585 + 213.031i) \Omega \quad |Z_{Th0_1}| = 218.065 \Omega \quad \arg(Z_{Th0_1}) = 77.665 \cdot \text{deg}$$

Και αντίστοιχα δεξιά του σημείου βραχυκύκλωσης:

$$Z_{Th1_2} := \frac{\frac{2 \cdot [2 \cdot (1-m) \cdot Z_1 + (1-m)^2 \cdot Z_1 \cdot Y_1 \cdot Z_{G2_1} + 2 \cdot Z_{G2_1}]}{[2 + (1-m) \cdot Y_1 \cdot Z_{G2_1}] \cdot (1-m) \cdot Y_1}}{\left[\frac{2}{(1-m) \cdot Y_1} \right] + \left[\frac{2 \cdot (1-m) \cdot Z_1 + (1-m)^2 \cdot Z_1 \cdot Y_1 \cdot Z_{G2_1} + 2 \cdot Z_{G2_1}}{2 + (1-m) \cdot Y_1 \cdot Z_{G2_1}} \right]}$$

$$Z_{Th1_2} = (2.212 + 41.875i) \Omega \quad |Z_{Th1_2}| = 41.934 \Omega \quad \arg(Z_{Th1_2}) = 86.976 \cdot \text{deg}$$

$$V_{Th2} := \left[\frac{2 \cdot V_{G2}}{8 \cdot (1-m) \cdot Y_1 \cdot Z_{G2_1} + 2 \cdot (1-m)^3 \cdot Y_1^2 \cdot Z_1 \cdot Z_{G2_1} + 4 \cdot (1-m)^2 \cdot Y_1 \cdot Z_1 + 8} \right]$$

$$V_{Th2} = (1.062 \times 10^5 - 78.7i) \text{ V} \quad |V_{Th2}| = 1.062 \times 10^5 \text{ V} \quad \arg(V_{Th2}) = -0.042 \cdot \text{deg}$$

Τα μεγέθη είναι φασικά.

$$Z_{Th2_2} := \frac{\frac{2 \cdot [2 \cdot (1-m) \cdot Z_2 + (1-m)^2 \cdot Z_2 \cdot Y_2 \cdot Z_{G2_2} + 2 \cdot Z_{G2_2}]}{[2 + (1-m) \cdot Y_2 \cdot Z_{G2_2}] \cdot (1-m) \cdot Y_2}}{\left[\frac{2}{(1-m) \cdot Y_2} \right] + \left[\frac{2 \cdot (1-m) \cdot Z_2 + (1-m)^2 \cdot Z_2 \cdot Y_2 \cdot Z_{G2_2} + 2 \cdot Z_{G2_2}}{2 + (1-m) \cdot Y_2 \cdot Z_{G2_2}} \right]}$$

$$Z_{Th2_2} = (2.212 + 41.875i) \Omega \quad |Z_{Th2_2}| = 41.934 \Omega \quad \arg(Z_{Th2_2}) = 86.976 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{Th0_2} := \frac{\frac{2 \cdot [2 \cdot (1-m) \cdot Z_0 + (1-m)^2 \cdot Z_0 \cdot Y_0 \cdot Z_{G2_0} + 2 \cdot Z_{G2_0}]}{[2 + (1-m) \cdot Y_0 \cdot Z_{G2_0}] \cdot (1-m) \cdot Y_0}}{\left[\frac{2}{(1-m) \cdot Y_0} \right] + \left[\frac{2 \cdot (1-m) \cdot Z_0 + (1-m)^2 \cdot Z_0 \cdot Y_0 \cdot Z_{G2_0} + 2 \cdot Z_{G2_0}}{2 + (1-m) \cdot Y_0 \cdot Z_{G2_0}} \right]}$$

$$Z_{Th0_2} = (43.521 + 178.636i) \Omega \quad |Z_{Th0_2}| = 183.861 \Omega \quad \arg(Z_{Th0_2}) = 76.308 \cdot \text{deg}$$

Οπότε, τώρα οι ισοδύναμες αντιστάσεις των ακολουθιακών κυκλωμάτων καθώς και η ισοδύναμη τάση του κυκλώματος θετικής ακολουθίας υπολογίζονται από το θεώρημα Thevenin ως εξής:

$$(Z_{1.\text{final}}) := \frac{Z_{Th1_1} \cdot Z_{Th1_2}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} = (1.287 + 23.377i) \Omega$$

$$|Z_{1.\text{final}}| = 23.412 \Omega \quad \arg(Z_{1.\text{final}}) = 86.849 \cdot \text{deg}$$

Θα ξαναεφαρμόσουμε θεώρημα Thevenin.

Από την Αρχή της Υπέρθεσης, η τάση E_1 του κυκλώματος θετικής ακολουθίας προκύπτει ως εξής:

$$E_1 := V_{Th1} \cdot \left(\frac{Z_{Th1_2}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} \right) + V_{Th2} \cdot \left(\frac{Z_{Th1_1}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} \right) = (1.073 \times 10^5 - 95.478i) \text{ V}$$

$$|E_1| = 1.073 \times 10^5 \text{ V} \quad \arg(E_1) = -0.051 \cdot \text{deg} \quad \text{Η τάση είναι φασική προφανώς.}$$

$$Z_{2,\text{final}} := \frac{Z_{\text{Th1_1}} \cdot Z_{\text{Th1_2}}}{Z_{\text{Th1_1}} + Z_{\text{Th1_2}}} = (1.287 + 23.377i) \Omega$$

$$|Z_{2,\text{final}}| = 23.412 \Omega \quad \arg(Z_{2,\text{final}}) = 86.849 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{0,\text{final}} := \frac{Z_{\text{Th0_1}} \cdot Z_{\text{Th0_2}}}{Z_{\text{Th0_1}} + Z_{\text{Th0_2}}} = (22.562 + 97.176i) \Omega$$

$$|Z_{0,\text{final}}| = 99.761 \Omega \quad \arg(Z_{0,\text{final}}) = 76.929 \cdot \text{deg}$$

Στο τριφασικό βραχυκύκλωμα τα τρία ακολουθιακά κυκλώματα είναι ανεξάρτητα. Επομένως, τα ακολουθιακά ρεύματα υπολογίζονται ως εξής:

$$I_1 := \frac{E_1}{Z_{1,\text{final}} + R_F} = (247.866 - 4.576i \times 10^3) \text{ A}$$

$$|I_1| = 4.583 \times 10^3 \text{ A} \quad \arg(I_1) = -86.9 \cdot \text{deg}$$

$$I_2 := 0$$

$$I_0 := 0$$

Οπότε στο τριφασικό σύστημα τα ρεύματα στο σημείο βραχυκύκλωσης υπολογίζονται ως:

$$I_{\text{abcF}} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 247.866 - 4.576i \times 10^3 \\ -4.087 \times 10^3 + 2.073i \times 10^3 \\ 3.839 \times 10^3 + 2.503i \times 10^3 \end{pmatrix} \text{ A}$$

Ενώ οι τάσεις:

$$V_1 := I_1 \cdot R_F = 0$$

$$V_2 := 0$$

$$V_0 := 0$$

$$V_{abcF} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Τώρα θέλουμε να υπολογίσουμε τις τάσεις και τα ρεύματα στα σημεία αναχώρησης και άφιξης της γραμμής, δηλαδή στα σημεία που τοποθετούνται οι ηλεκτρονόμοι. Για να το πετύχουμε αυτό θα πρέπει να κάνουμε κυκλωματική ανάλυση εντός των ακολουθιακών κυκλωμάτων:

Από διαίρεση ρεύματος στο σημείο βραχυκύκλωσης έχουμε για τα τρία ακολουθιακά κυκλώματα αντίστοιχα:

$$I_{Th1_1} := I_1 \cdot \left(\frac{Z_{Th1_2}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} \right) + \frac{V_{Th1} - V_{Th2}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} = (116.067 - 2.046i \times 10^3) A$$

Έχει εφαρμοστεί η Αρχή της Υπέρθεσης για το κυκλωμα χωρίς πηγές (πρώτος όρος) και παρουσία πηγών (δεύτερος όρος). Ομοίως για το υποκύκλωμα δεξιά του σφάλματος:

$$I_{Th1_2} := I_1 \cdot \left(\frac{Z_{Th1_1}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} \right) + \frac{V_{Th2} - V_{Th1}}{Z_{Th1_1} + Z_{Th1_2}} = (131.799 - 2.53i \times 10^3) A$$

$$I_{Th2_1} := I_2 \cdot \left(\frac{Z_{Th2_2}}{Z_{Th2_1} + Z_{Th2_2}} \right) = 0$$

$$I_{Th2_2} := I_2 \cdot \left(\frac{Z_{Th2_1}}{Z_{Th2_1} + Z_{Th2_2}} \right) = 0$$

$$I_{Th0_1} := I_0 \cdot \left(\frac{Z_{Th0_2}}{Z_{Th0_1} + Z_{Th0_2}} \right) = 0$$

$$I_{Th0_2} := I_0 \cdot \left(\frac{Z_{Th0_1}}{Z_{Th0_1} + Z_{Th0_2}} \right) = 0$$

Από Νόμο Ρευμάτων Kirchhoff:

$$I_{B1a1} := I_{Th1_1} + \frac{V_1 \cdot m \cdot Y_1}{2} = (116.067 - 2.046i \times 10^3) A$$

$$I_{B1a2} := I_{Th2_1} + \frac{V_2 \cdot m \cdot Y_2}{2} = 0$$

$$I_{B1a0} := I_{Th0_1} + \frac{V_0 \cdot m \cdot Y_0}{2} = 0$$

$$I_{B2a1} := I_{Th1_2} + \frac{V_1 \cdot (1 - m) \cdot Y_1}{2} = (131.799 - 2.53i \times 10^3) \text{ A}$$

$$I_{B2a2} := I_{Th2_2} + \frac{V_2 \cdot (1 - m) \cdot Y_2}{2} = 0$$

$$I_{B2a0} := I_{Th0_2} + \frac{V_0 \cdot (1 - m) \cdot Y_0}{2} = 0$$

Από Νόμο Τάσεων Kirchhoff, οι τάσεις ακολουθίας στον ζυγό B1 είναι:

$$V_{B1_1} := V_1 + m \cdot Z_1 \cdot I_{B1a1} = (7.217 \times 10^4 + 1.481i \times 10^3) \text{ V}$$

$$|V_{B1_1}| = 7.219 \times 10^4 \text{ V} \quad \arg(V_{B1_1}) = 1.175 \cdot \text{deg}$$

$$V_{B1_2} := V_2 + m \cdot Z_2 \cdot I_{B1a2} = 0$$

$$|V_{B1_2}| = 0$$

$$V_{B1_0} := V_0 + m \cdot Z_0 \cdot I_{B1a0} = 0$$

$$|V_{B1_0}| = 0$$

Ενώ στον ζυγό B2 οι τάσεις ακολουθίας είναι:

$$V_{B2_1} := V_1 + (1 - m) \cdot Z_1 \cdot I_{B2a1} = (8.923 \times 10^4 + 1.418i \times 10^3) \text{ V}$$

$$|V_{B2_1}| = 8.924 \times 10^4 \text{ V} \quad \arg(V_{B2_1}) = 0.911 \cdot \text{deg}$$

$$V_{B2_2} := V_2 + (1 - m) \cdot Z_2 \cdot I_{B2a2} = 0$$

$$|V_{B2_2}| = 0$$

$$V_{B2_0} := V_0 + (1 - m) \cdot Z_0 \cdot I_{B2a0} = 0$$

$$|V_{B1_0}| = 0$$

Στον ζυγό B1 τα ακολουθιακά ρεύματα υπολογίζονται

$$I_{B1_1} := I_{B1a1} + \frac{m \cdot Y_1 \cdot V_{B1_1}}{2} = (115.712 - 2.029i \times 10^3) \text{ A}$$

$$|I_{B1_1}| = 2.032 \times 10^3 \text{ A} \quad \arg(I_{B1_1}) = -86.736\text{-deg}$$

$$I_{B1_2} := I_{B1a2} + \frac{m \cdot Y_2 \cdot V_{B1_2}}{2} = 0$$

$$|I_{B1_2}| = 0$$

$$I_{B1_0} := I_{B1a0} + \frac{m \cdot Y_0 \cdot V_{B1_0}}{2} = 0$$

$$|I_{B1_0}| = 0$$

Στον ζυγό B2 τα ακολουθιακά ρεύματα υπολογίζονται

$$I_{B2_1} := I_{B2a1} + \frac{(1 - m) \cdot Y_1 \cdot V_{B2_1}}{2} = (131.459 - 2.509i \times 10^3) \text{ A}$$

$$|I_{B2_1}| = 2.512 \times 10^3 \text{ A} \quad \arg(I_{B2_1}) = -87\text{-deg}$$

$$I_{B2_2} := I_{B2a2} + \frac{(1 - m) \cdot Y_2 \cdot V_{B2_2}}{2} = 0$$

$$|I_{B2_2}| = 0$$

$$I_{B2_0} := I_{B2a0} + \frac{(1 - m) \cdot Y_0 \cdot V_{B2_0}}{2} = 0$$

$$|I_{B2_0}| = 0$$

Επομένως συγκεντρωτικά οι φασικές τάσεις και ρεύματα του τριφασικού συστήματος στις θέσεις των ζυγών B1 και B2 υπολογίζονται:

Ζυγός B1:

$$\begin{pmatrix} V_{B1_a} \\ V_{B1_b} \\ V_{B1_c} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{B1_0} \\ V_{B1_1} \\ V_{B1_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7.217 \times 10^4 + 1.481i \times 10^3 \\ -3.48 \times 10^4 - 6.324i \times 10^4 \\ -3.737 \times 10^4 + 6.176i \times 10^4 \end{pmatrix} V$$

$$\begin{pmatrix} |V_{B1_a}| \\ |V_{B1_b}| \\ |V_{B1_c}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7.219 \times 10^4 \\ 7.218 \times 10^4 \\ 7.218 \times 10^4 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{B1_a}) \\ \arg(V_{B1_b}) \\ \arg(V_{B1_c}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.175 \\ -118.823 \\ 121.176 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$\begin{pmatrix} I_{B1_a} \\ I_{B1_b} \\ I_{B1_c} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{B1_0} \\ I_{B1_1} \\ I_{B1_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 115.712 - 2.029i \times 10^3 \\ -1.815 \times 10^3 + 914.095i \\ 1.699 \times 10^3 + 1.115i \times 10^3 \end{pmatrix} A$$

$$\begin{pmatrix} |I_{B1_a}| \\ |I_{B1_b}| \\ |I_{B1_c}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.032 \times 10^3 \\ 2.032 \times 10^3 \\ 2.032 \times 10^3 \end{pmatrix} A \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{B1_a}) \\ \arg(I_{B1_b}) \\ \arg(I_{B1_c}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -86.736 \\ 153.266 \\ 33.265 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

Zuyός B2:

$$\begin{pmatrix} V_{B2_a} \\ V_{B2_b} \\ V_{B2_c} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} V_{B2_0} \\ V_{B2_1} \\ V_{B2_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 8.923 \times 10^4 + 1.418i \times 10^3 \\ -4.338 \times 10^4 - 7.798i \times 10^4 \\ -4.584 \times 10^4 + 7.656i \times 10^4 \end{pmatrix} V$$

$$\begin{pmatrix} |V_{B2_a}| \\ |V_{B2_b}| \\ |V_{B2_c}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 8.924 \times 10^4 \\ 8.924 \times 10^4 \\ 8.924 \times 10^4 \end{pmatrix} V \quad \begin{pmatrix} \arg(V_{B2_a}) \\ \arg(V_{B2_b}) \\ \arg(V_{B2_c}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.911 \\ -119.088 \\ 120.911 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

$$\begin{pmatrix} I_{B2_a} \\ I_{B2_b} \\ I_{B2_c} \end{pmatrix} := A_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{B2_0} \\ I_{B2_1} \\ I_{B2_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 131.459 - 2.509i \times 10^3 \\ -2.238 \times 10^3 + 1.14i \times 10^3 \\ 2.107 \times 10^3 + 1.368i \times 10^3 \end{pmatrix} A$$

$$\begin{pmatrix} |I_{B2_a}| \\ |I_{B2_b}| \\ |I_{B2_c}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.512 \times 10^3 \\ 2.512 \times 10^3 \\ 2.512 \times 10^3 \end{pmatrix} \text{ A} \quad \begin{pmatrix} \arg(I_{B2_a}) \\ \arg(I_{B2_b}) \\ \arg(I_{B2_c}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -87 \\ 153.001 \\ 33 \end{pmatrix} \cdot \text{deg}$$

Εδώ τελείωσε η επίλυση του βραχυκυκλώματος, στην συνέχεια, θα υπολογίσουμε τις σύνθετες αντιστάσεις που υπολογίζει ο ηλεκτρονόμος.

Πολικές Σύνθετες Αντιστάσεις:

$$Z_{ab.B1} := \frac{V_{B1_a} - V_{B1_b}}{I_{B1_a} - I_{B1_b}} = (1.295 + 35.499i) \Omega$$

$$|Z_{ab.B1}| = 35.523 \Omega \quad \arg(Z_{ab.B1}) = 87.911 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{bc.B1} := \frac{V_{B1_b} - V_{B1_c}}{I_{B1_b} - I_{B1_c}} = (1.295 + 35.499i) \Omega$$

$$|Z_{bc.B1}| = 35.523 \Omega \quad \arg(Z_{bc.B1}) = 87.911 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{ca.B1} := \frac{V_{B1_c} - V_{B1_a}}{I_{B1_c} - I_{B1_a}} = (1.295 + 35.499i) \Omega$$

$$|Z_{ca.B1}| = 35.523 \Omega \quad \arg(Z_{ca.B1}) = 87.911 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{ab.B2} := \frac{V_{B2_a} - V_{B2_b}}{I_{B2_a} - I_{B2_b}} = (1.295 + 35.499i) \Omega$$

$$|Z_{ab.B2}| = 35.523 \Omega \quad \arg(Z_{ab.B2}) = 87.911 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{bc.B2} := \frac{V_{B2_b} - V_{B2_c}}{I_{B2_b} - I_{B2_c}} = (1.295 + 35.499i) \Omega$$

$$|Z_{bc.B2}| = 35.523 \Omega \quad \arg(Z_{bc.B2}) = 87.911 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{ca.B2} := \frac{V_{B2_c} - V_{B2_a}}{I_{B2_c} - I_{B2_a}} = (1.295 + 35.499i) \Omega$$

$$|Z_{ca.B2}| = 35.523 \, \Omega \quad \arg(Z_{ca.B2}) = 87.911 \cdot \text{deg}$$

Φασικές Σύνθετες Αντιστάσεις:

Θα χρειαστεί να οριστεί ο λεγόμενος Compensation Factor k .

$$k := \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \quad \text{Έτσι:}$$

$$Z_{a.B1} := \frac{V_{B1_a}}{I_{B1_a} + k(I_{B1_a} + I_{B1_b} + I_{B1_c})} = (1.294 + 35.498i) \, \Omega$$

$$|Z_{a.B1}| = 35.521 \, \Omega \quad \arg(Z_{a.B1}) = 87.912 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{b.B1} := \frac{V_{B1_b}}{I_{B1_b} + k(I_{B1_a} + I_{B1_b} + I_{B1_c})} = (1.297 + 35.5i) \, \Omega$$

$$|Z_{b.B1}| = 35.523 \, \Omega \quad \arg(Z_{b.B1}) = 87.908 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{c.B1} := \frac{V_{B1_c}}{I_{B1_c} + k(I_{B1_a} + I_{B1_b} + I_{B1_c})} = (1.294 + 35.501i) \, \Omega$$

$$|Z_{c.B1}| = 35.524 \, \Omega \quad \arg(Z_{c.B1}) = 87.913 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{a.B2} := \frac{V_{B2_a}}{I_{B2_a} + k(I_{B2_a} + I_{B2_b} + I_{B2_c})} = (1.294 + 35.498i) \, \Omega$$

$$|Z_{a.B2}| = 35.521 \, \Omega \quad \arg(Z_{a.B2}) = 87.912 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{b.B2} := \frac{V_{B2_b}}{I_{B2_b} + k(I_{B2_a} + I_{B2_b} + I_{B2_c})} = (1.297 + 35.5i) \, \Omega$$

$$|Z_{b.B2}| = 35.523 \, \Omega \quad \arg(Z_{b.B2}) = 87.908 \cdot \text{deg}$$

$$Z_{c.B2} := \frac{V_{B2_c}}{I_{B2_c} + k(I_{B2_a} + I_{B2_b} + I_{B2_c})} = (1.294 + 35.501i) \, \Omega$$

$$|Z_{c.B2}| = 35.524 \, \Omega \quad \arg(Z_{c.B2}) = 87.913 \cdot \text{deg}$$

Βιβλιογραφία

Βιβλία και δημοσιεύσεις

- [1] Β. Κ. Παπαδιάς, Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τόμος ΙΙ, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1993.
- [2] Μ. Π. Παπαδόπουλος, Προστασία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1997.
- [3] Π. Σ. Γεωργιάκης, Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας. Ηλεκτρονικό Βιβλίο, Σύνδεσμος Ελλήνων Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών (ΣΕΑΒ), Αθήνα, 2015.
- [4] Juan M. Gers and Edward J. Holmes, Protection of Electricity Distribution Networks, 3rd Edition, IET Power and Energy Series65, 2011
- [5] G. B. Song, X. Chu, S. P. Gao, X. N. Kang, Z. B. Jiao, and J. L. Suonan, "Novel distance protection based on distributed parameter model for long-distance transmission lines," IEEE Trans. Power Del., vol. 28, no. 4, pp. 2126–2123, Oct. 2013.
- [6] J. Ma, X. Yan, B. Fan, C. Liu, and J. S. Thorp, "A novel line protection scheme for a single phase-to-ground fault based on voltage phase comparison," IEEE Trans. Power Del., vol. 31, no. 5, pp. 2018–2027, Oct. 2016.
- [7] V. H. Makwana and B. R. Bhalja, "A new digital distance relaying scheme for compensation of high-resistance faults on transmission line," IEEE Trans. Power Del., vol. 27, no. 4, pp. 2133–2140, Oct. 2012.
- [8] J. L. Blackburn, T. J. Domin, Protective Relaying, Principles and Applications, Third Edition, CRC Press, 2007
- [9] J. M. Gers, E. J. Holmes, Protection of Electricity Distribution Networks Third Edition, 2011.
- [10] N. D. Tleis, Power Systems Modelling and Fault Analysis, Theory and Practice, 2008.
- [11] W. A. Elmore, Protective Relaying, Theory and Applications, Second Edition, Marcel Dekker, Inc, 2004.
- [12] P. M. Anderson, Power System Protection, IEEE Press, 1999.
- [13] Md T. Hoq, "Distance Protection of Transmission Lines with High Levels of Series Compensation," Doctoral Thesis, KTH Royal Institute of Technology, 2023.
- [14] V. Vittal, S. Lotfifard, A. Bose, M. Khorsand, "Evaluation of Protective Relay Dynamic Response via a Co-Simulation Platform," PSERC, 2017.
- [15] M. Zhou, Y. Li, "Adaptive distance relay algorithms for high-voltage networks with renewables," IEEE Trans. Power Deliv., 2022.
- [16] ENTSO-E, "Adaptive Protection Technologies for Distance Relays," ENTSO-E Report, 2023.
- [17] K. Hassanpouri Baesmat, A. Shiri, "Critical relay identification for grid stability," IEEE Open Access J. Power Energy, vol. 8, pp. 107–117, 2021.
- [18] CIGRE, "Testing Procedures for Distance Protection Relays," CIGRE Report, 2023.
- [19] Digital Relay Performance Research Team, "Digital distance relays in inverter-based systems," IEEE Trans. Power Syst., 2023.
- [20] E. M. Lima, A. Lima, "High impedance fault detection using short-time Fourier transform," IET Gener. Transm. Distrib., vol. 12, no. 11, pp. 2577–2584, 2018.

- [21] V. Torres-Garcia, D. Guillen, "Modelling high impedance faults in distribution systems," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 83, pp. 106576, 2020.
- [22] A. Ghorbani, H. Mehrjerdi, "Distance protection with fault resistance compensation for lines connected to PV plants," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 148, 2023.
- [23] A. Chowdhury, S. Paladhi, A.K. Pradhan, "Local positive sequence component based protection of series compensated parallel lines connecting solar PV plants," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 225, 2023.
- [24] S. Singh, P.K. Nayak, S. Sarangi, S. Biswas, "Improved protection scheme for high voltage transmission lines connecting solar PV plants," *Proc. Natl. Power Syst. Conf.*, 2022.
- [25] Y.B. Yoldas, R. Yumurtacı, "Improvement of distance protection with SVM on PV-Fed transmission lines in infeed conditions," *Energies*, vol. 16, 2023.
- [26] O. Noureldeen, I. Hamdan, B. Hassanin, "Design of advanced ai protection for large-scale wind farms," *SN Appl. Sci.*, vol. 1, 2019.
- [27] S. Ghosh, T. Bhuiyan, "Transient-based fault detection for medium-length lines," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 182, 2020.
- [28] M. Almomani and S. F. Algharaibeh, "Modelling and testing of a numerical pilot distance relay for compensated transmission lines," 2024.
- [29] A. Delavari, P. Brunelle, and C. F. Mugombozi, "Real-time modeling and testing of distance protection relay based on IEC 61850 protocol," *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 43, no. 3, pp. 157-162, Summer 2020.
- [30] S. Misra, "Simulation and performance analysis of distance protection for transmission lines using MATLAB/Simulink," *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 11, no. 4, April 2023.
- [31] M. Krishnan, K. Satish, and R. Sundararajan, "Distance relay modeling using Simulink: Implementation and testing," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 38, no. 2, pp. 1023-1030, March 2023.
- [32] D. Gupta, A. Kumar, and M. Ali, "Simulink-based model of distance protection relay for HVDC transmission lines," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 18490-18501, January 2024.
- [33] B. Roy and S. Chakrabarti, "Performance analysis of mho distance protection using Simulink," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 151, pp. 12345-12352, February 2024.
- [34] G. Tripathi and R. Shah, "Comparative Study of distance protection algorithms using Simulink models," *IEEE Systems Journal*, vol. 18, no. 1, pp. 254-263, March 2024.
- [35] P. S. Wadhwa, "Simulation and performance analysis of zone-1 distance protection using MATLAB/Simulink," *International Journal of Electrical Engineering*, vol. 55, no. 1, January 2024.
- [36] M. Diaz and L. Perez, "Testing of distance protection relays in Simulink for multiterminal HVDC Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 39, no. 5, pp. 1109-1118, February 2024.
- [37] S. Maheshwari, "Modeling distance relays for fault location in MATLAB Simulink," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 12, no. 3, April 2023.
- [38] A. Singhal and P. Kumar, "Transient analysis of distance protection relays using Simulink," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 39, no. 3, pp. 222-229, May 2023.

- [39] M. Zhang, "Simulink implementation of adaptive distance protection scheme for transmission lines," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 125, no. 6, July 2023.
- [40] Wang and Y. Sun, "Performance evaluation of Simulink-based distance relays for FACTS-compensated lines," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 38, no. 4, pp. 2010-2020, July 2023.
- [41] V. Tandon, "Study of distance relay for transmission line protection using MATLAB/Simulink," International Journal of Power and Energy Systems, vol. 18, no. 3, August 2023.
- [42] Ariana Amberg and Alex Rangel, Tutorial on Symmetrical Components, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2012,2013.
- [43] J. Roberts and A. Guzman, $Z=V/I$ does not make a distance relay, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 1993.

Σημειώσεις

- [44] Γ. Κορρές, Διαφάνειες μαθήματος “Προστασία Σ.Η.Ε.”.

Ιστοσελίδες

- [45] “Schweitzer Engineering Laboratories”. selinc [online] Available at: <[www.selinc.com\(SEL\)](http://www.selinc.com(SEL))> [Accessed 28 February 2024]
- [46] “Simulink Documentation”. ch.mathworks [online] Available at: <<https://ch.mathworks.com/help/simulink/>> [Accessed 28 February 2024]