
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
9ο ΕΞΑΜΗΝΟ (2023-2024)

ΜΑΘΗΜΑ : ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ



ΥΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ: ΠΑΠΑΓΙΑΝΝΗΣ ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ, ΜΗΝΑΣ ΑΛΕΞΙΑΔΗΣ

ΕΡΓΑΣΙΑ 1: Χρήση του λογισμικού EMTP/ATP για την προσομοίωση μεταβατικών φαινομένων σε εναέριας ΓΜ

ΟΜΑΔΑ 6:

ΤΣΟΧΑΝΤΑΡΗΣ ΧΡΥΣΟΒΑΛΑΝΤΗΣ	10069	ctsochan@ece.auth.gr
ΣΙΔΗΡΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ	10048	konssidi@gapps.auth.gr
ΜΠΟΣΤΑΝΗΣ ΕΥΡΙΠΙΔΗΣ	9586	mpostanis@ece.auth.gr

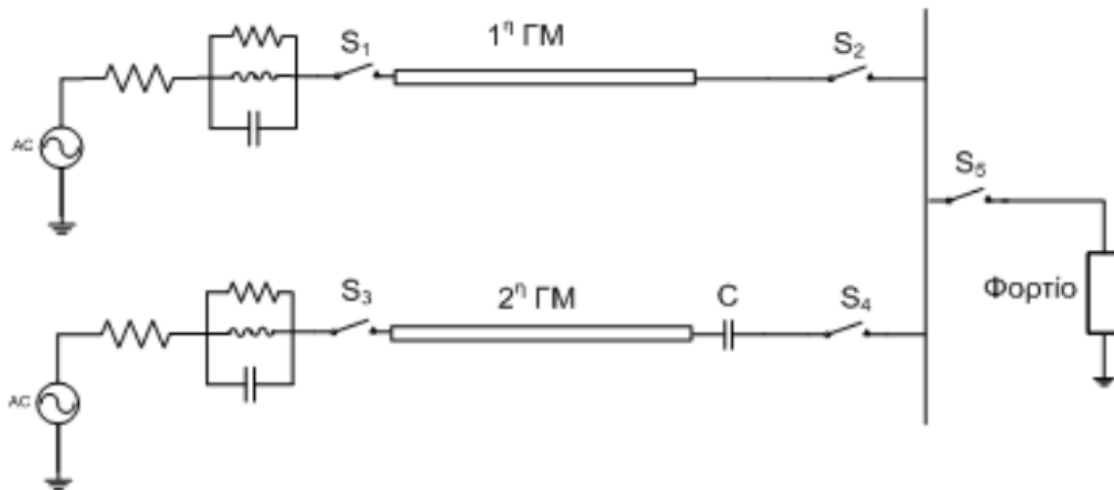
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	1
Γενικά δεδομένα του συστήματος προς προσομοίωση.....	3
Δεδομένα εκφώνησης.....	3
Δεδομένα προς Υπολογισμό.....	4
Δεδομένα για το κύκλωμα στο ATP.....	5
Ερώτημα 1 α).....	8
Ερώτημα 1 β).....	13
Ερώτημα 2.....	16
Ερώτημα 3 α).....	20
Ερώτημα 3 β).....	23
Ερώτημα 4.....	26
Ερώτημα 5.....	36

Γενικά δεδομένα του συστήματος προς προσομοίωση

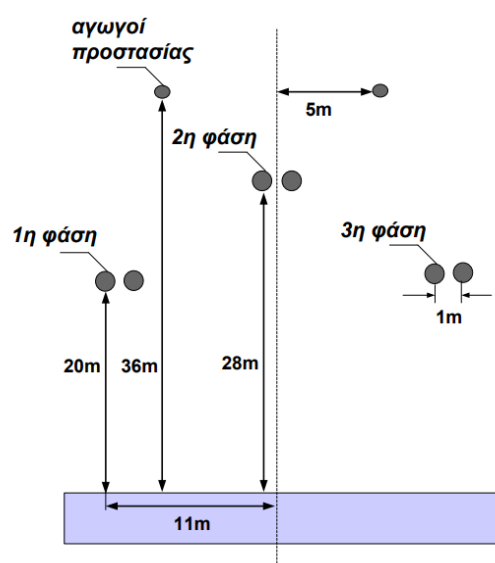
Δεδομένα εκφώνησης

Το σύστημα που καλούμαστε να προσομοιώσουμε έχει την εξής μορφή:



Εικόνα 1: Σύστημα προσομοίωσης

Αντίστοιχα, η διάταξη των εναέριων γραμμών μεταφοράς είναι γραμμές απλού κυκλώματος σε τριγωνική διάταξη όπως φαίνεται στο σχήμα:



Εικόνα 2: Διάταξη εναέριων γραμμών μεταφοράς

Σύμφωνα με την εκφώνηση της εργασίας τα **αναλυτικά δεδομένα του συστήματος** είναι:

1. Τριφασικός καταναλωτής $S = 200 \text{ MVA}$, με $\cos\phi = 0.8$ στα 400kV
2. Γραμμές τριγωνικής διάταξης με δέσμη 2 αγωγών ανά φάση
3. Όλοι οι αγωγοί (φάσεων και προστασίας) θεωρούνται ιδανικά τανυσμένοι
4. Οι αγωγοί των φάσεων είναι τύπου ACSR με εσωτερική ακτίνα $r_{\text{in}} = 5.86\text{mm}$ και εξωτερική $r_{\text{out}} = 17.5\text{mm}$. Η dc αντίσταση κάθε αγωγού είναι $R'_{\text{dc}} = 0.0497 \text{ } \Omega/\text{km}$
5. Οι αγωγοί προστασίας είναι συνεχώς γειωμένοι και συμπαγείς με διάμετρο 3.9mm (άρα $r_{\text{out}} = 3.9/2 = 1.95\text{mm}$) και $R'_{\text{dc}} = 2.61 \text{ } \Omega/\text{km}$
6. Τροφοδότηση από δύο σταθμούς 400kV συχνότητας 50Hz
7. Το Z_{eq} περιλαμβάνει τα στοιχεία με $R = 15 \text{ } \Omega$, $L = 22\text{mH}$, $C = 80\mu\text{F}$, ενώ $R_{\text{s-eq}} = 1 \text{ } \Omega$.
Ο συνδυασμός των Z_{eq} και $R_{\text{s-eq}}$ εκφράζει τη σύνθετη αντίσταση της τροφοδοσίας.
8. Ζεύξη/Απόζευξη με τριφασικούς διακόπτες ισχύος SF6
9. Ειδική αντίσταση εδάφους: $\text{ΓΜ\#1} \rightarrow 100 \text{ } \Omega\text{m}$ και $\text{ΓΜ\#2} \rightarrow 200 \text{ } \Omega\text{m}$
10. Πυκνωτές σειράς με χωρητικότητα $C = 55\mu\text{F}/\text{φάση}$ στο τέλος της ΓΜ\#2
11. Ο πίνακας ιδιομετασχηματισμού είναι πραγματικός και λαμβάνεται υπόψη το επιδερμικό φαινόμενο
12. Βήμα $\Delta t = 10^{-7} \text{ s}$

Ενώ τα **ειδικά δεδομένα** για την παρούσα ομάδα (Ομάδα 6) είναι:

- Μοντελοποίηση των γραμμών μεταφοράς με το **μοντέλο οδευόντων κυμάτων στο πεδίο του χρόνου** (Bergeron/KCLee)
- Μήκος **$\text{ΓΜ\#1} \rightarrow 175\text{km}$** και μήκος **$\text{ΓΜ\#2} \rightarrow 100\text{km}$**
- Επιλέγουμε ως χρόνο προσομοίωσης **$t_{\text{sim}} = 300\text{ms}$**

Δεδομένα προς Υπολογισμό

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα θα προχωρήσουμε σε κάποιους υπολογισμούς βασικών χαρακτηριστικών του εν λόγω συστήματος. Συγκεκριμένα η διαδικασία που ακολουθούμε είναι η εξής:

Σύμφωνα με την εκφώνηση, στη διάταξη παρέχεται υψηλή τάση των 400kV (πολική τάση).

Διαιρούμε με $\sqrt{3}$ για να λάβουμε τη **φασική τιμή** της τάσης και ταυτόχρονα πολλαπλασιάζουμε με $\sqrt{2}$ για να υπολογίσουμε την **peak τιμή της**. Άρα:

$$V_s = 400000 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 326598.6324 \text{ V}$$

Επίσης, υπολογίζεται το ρεύμα του φορτίου ως εξής: $S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I_{\Gamma P} \Rightarrow I_{\Gamma P} = \frac{200 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ kV}}$

Άρα $I_{\Gamma P} = 288.675 \text{ A}$ και αφού ο συντελεστής ισχύος του φορτίου $\cos\phi = 0.8$ επαγωγικό προκύπτει τελικά:

$$I_{\Gamma P} = 288.675 \angle -36.87^\circ \text{ A}$$

Ακολούθως, μπορούμε να υπολογίσουμε και τη σύνθετη αντίσταση του φορτίου ως εξής:

$$Z_L = \frac{V_{ph}}{I_{\Gamma P}} = \frac{400/\sqrt{3}}{288.675 \angle -36.87^\circ} \Rightarrow Z_L = 800 \angle 36.87^\circ \Omega = 640 + 480j \Omega$$

Τέλος, η αντίσταση φορτίου είναι: $R = 640 \Omega$ ενώ η αντίδραση: $L = \frac{X}{\omega} = \frac{480}{100\pi} = 1.528 \text{ H}$

Δεδομένα για το κύκλωμα στο ATP

Εισάγουμε τα παραπάνω δεδομένα στο ATP σύμφωνα με τις εικόνες παρακάτω:

Πηγές Τάσης

Component: AC3PH					
Attributes					
DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Amplitude	Volt	326598.6324	AC3	ABC	X0016
f	Hz	50			
pha	Deg/Rad	0			
A1		0			
T start	s	-1			
T stop	s	1000			

Εικόνα 3: Στοιχεία γραμμής μεταφοράς #1

Γραμμή μεταφοράς 1 - ΓΜ#1

Line/Cable Data: LINE1

Model Data Nodes

System type
 Overhead Line

☐ Transposed
☐ Auto bundling
☒ Skin effect
☐ Segmented ground
☒ Real transf. matrix

Units
☒ Metric
☐ English

Standard data
 Rho [ohm*m] 100
 Freq. init [Hz] 50
 Length [km] 175
☐ Set length in icon

Model Type
☒ Bergeron
☐ PI
☐ JMarti
☐ Semlyen
☐ Noda

Εικόνα 4: Στοιχεία γραμμής μεταφοράς #1

Γραμμή μεταφοράς 2 - ΓΜ#2

Line/Cable Data: LINE2

Model Data Nodes

System type
 Overhead Line

☐ Transposed
☐ Auto bundling
☒ Skin effect
☐ Segmented ground
☒ Real transf. matrix

Units
☒ Metric
☐ English

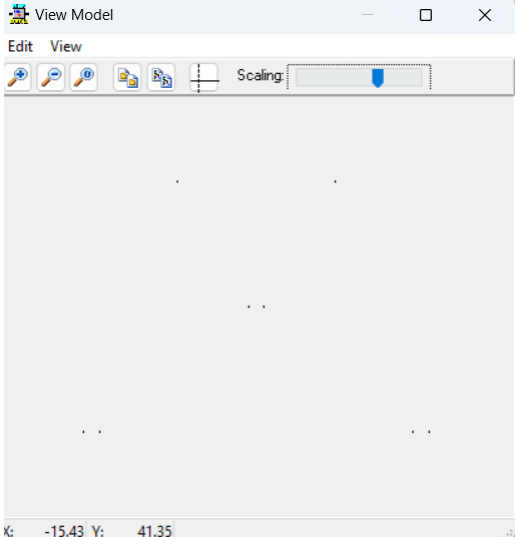
Standard data
 Rho [ohm*m] 200
 Freq. init [Hz] 50
 Length [km] 100
☐ Set length in icon

Model Type
☒ Bergeron
☐ PI
☐ JMarti
☐ Semlyen
☐ Noda

Εικόνα 5: Στοιχεία γραμμής μεταφοράς #2

Αγωγοί Φάσης και Αγωγοί Προστασίας - Διάταξη Γραμμών

Οι δύο γραμμές έχουν ίδια διάταξη και αγωγούς



	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid
#		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]
1	1	0.586	1.75	0.0497	-11	20	20
2	1	0.586	1.75	0.0497	-10	20	20
3	2	0.586	1.75	0.0497	-0.5	28	28
4	2	0.586	1.75	0.0497	0.5	28	28
5	3	0.586	1.75	0.0497	10	20	20
6	3	0.586	1.75	0.0497	11	20	20
7	0	0	0.195	2.61	-5	36	36
8	0	0	0.195	2.61	5	36	36

Εικόνα 6: Διάταξη και στοιχεία αγωγών των Γ.Μ.

Φορτίο

Το φορτίο μοντελοποιείται ως ένα τριφασικό RLC στοιχείο με μηδενισμένες τις παραμέτρους χωρητικότητας.

Component: RLC3

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
R_1	Ohms	640
L_1	mH	1528
C_1	μF	0
R_2	Ohms	640
L_2	mH	1528
C_2	μF	0
R_3	Ohms	640
L_3	mH	1528

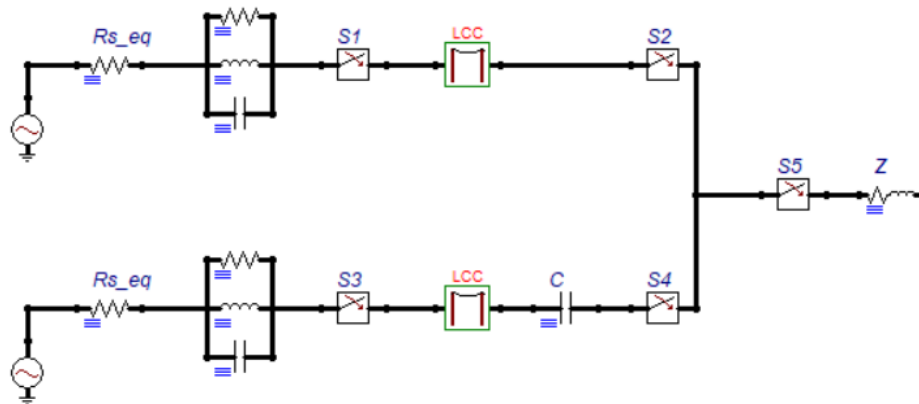
NODE	PHASE	NAME
IN1	ABC	X0013
OUT1	ABC	X0014

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label: Z

Εικόνα 7: Στοιχεία του φορτίου όπως αυτά υπολογίστηκαν

Συνολική Διάταξη

Αφού αναφέρθηκαν τα σημαντικότερα στοιχεία, το συνολικό σύστημα έχει την εξής μορφή.



Εικόνα 8: Συνολικό σύστημα προς προσομοίωση

Στη συνέχεια ακολουθούν τα ερωτήματα της παρούσας εργασίας, για την απάντηση των οποίων λήφθηκαν τα δεδομένα των εκφωνήσεων που αφορούν την Ομάδα 6 (Ομάδες 5 έως 8)

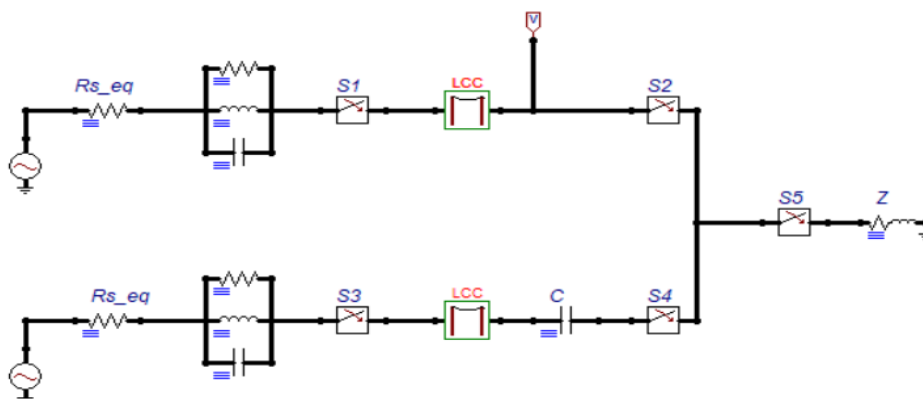
Ερώτημα 1 α)

Το σύστημα θεωρείται αρχικά αφόρτιστο (όλοι οι διακόπτες ισχύος ανοιχτοί). Τη χρονική στιγμή $t = 20 \text{ ms}$ ηλεκτρίζεται η 1η γραμμή μεταφοράς με το κλείσιμο του διακόπτη S_1 .

Να καταγραφεί συγκριτικά για την περίπτωση της αναπαράστασης της 1ης ΓΜ με 1 ισοδύναμο η τάση στη φάση a για παραμέτρους ΓΜ υπολογισμένες στα 50 Hz, 1.5 kHz και 5kHz. Να αιτιολογήσετε τις διαφορές που ενδεχόμενα προκύπτουν.

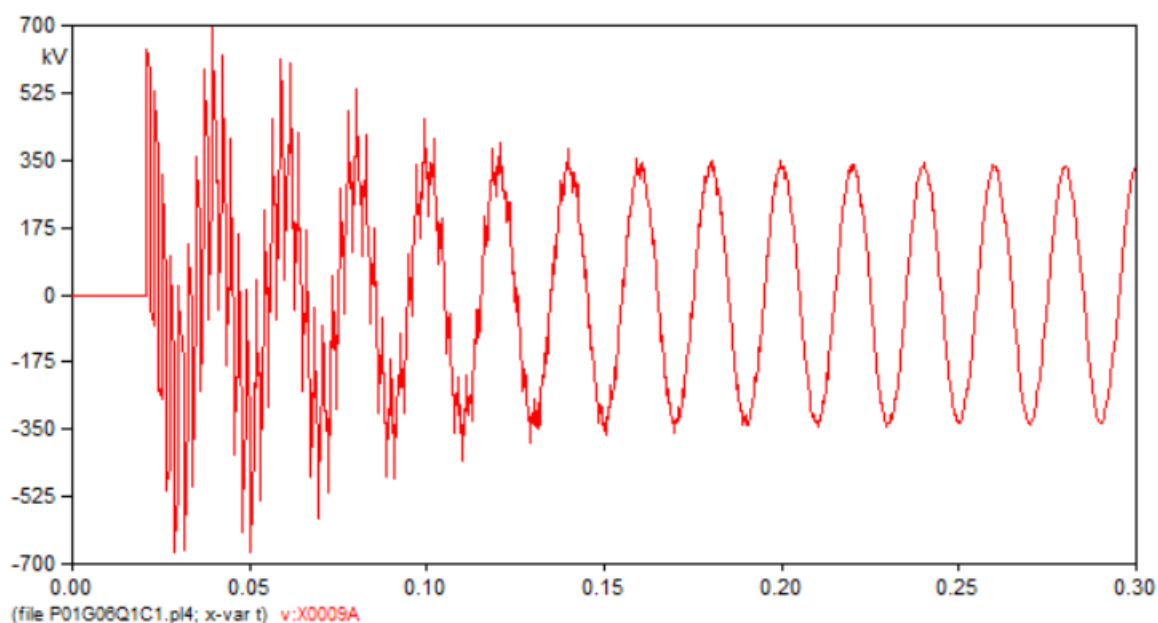
Απάντηση:

Μετράμε την τάση στη φάση a της ΓΜ#1 σύμφωνα με το παρακάτω κύκλωμα.



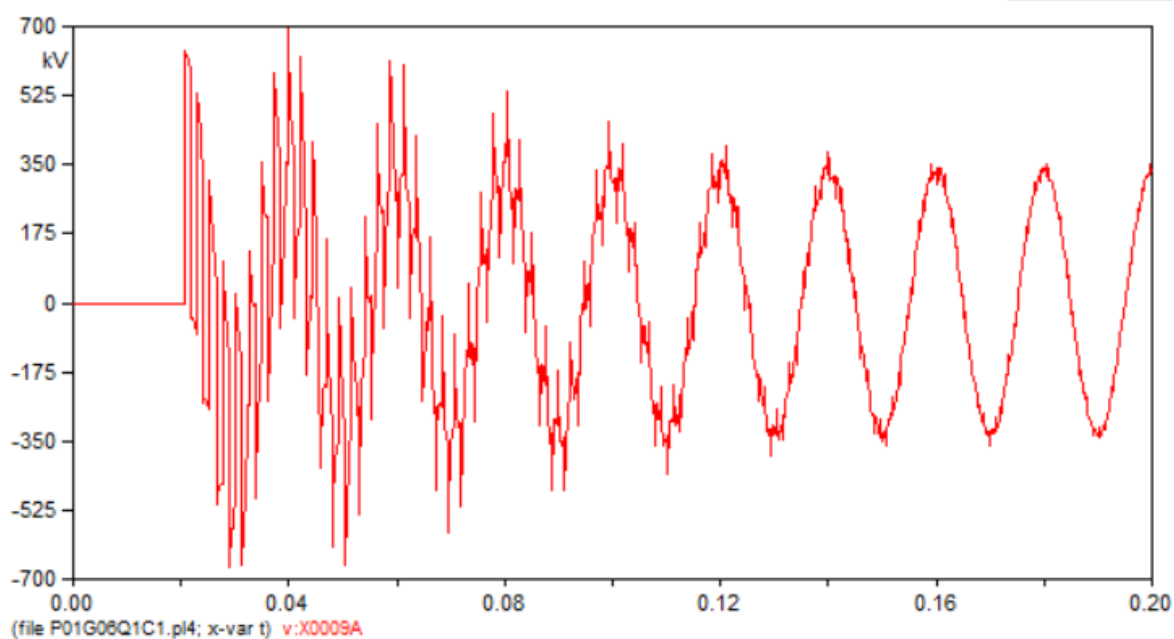
Εικόνα 1.1: Μέτρηση τάσης φάσης a της ΓΜ#1

α) Για παραμέτρους γραμμής στα 50 Hz (Αρχείο P01G06Q1C1)



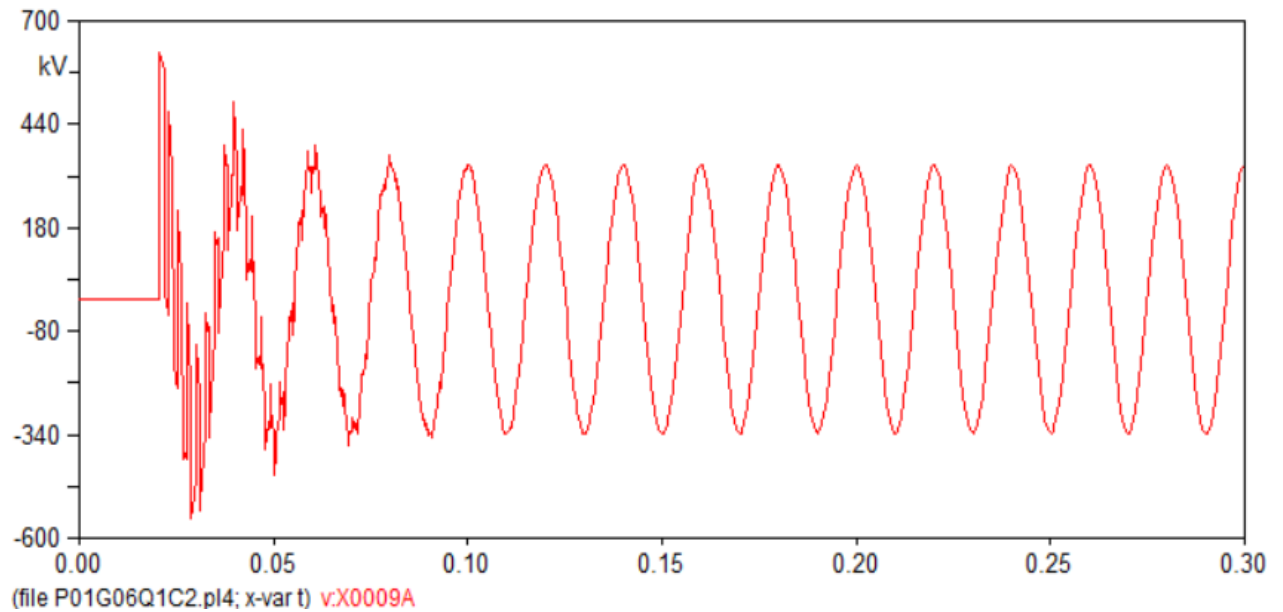
Εικόνα 1.2: Μέτρηση τάσης φάσης α της ΓΜ#1 στα 50 Hz

Και με μεγέθυνση(zoom):



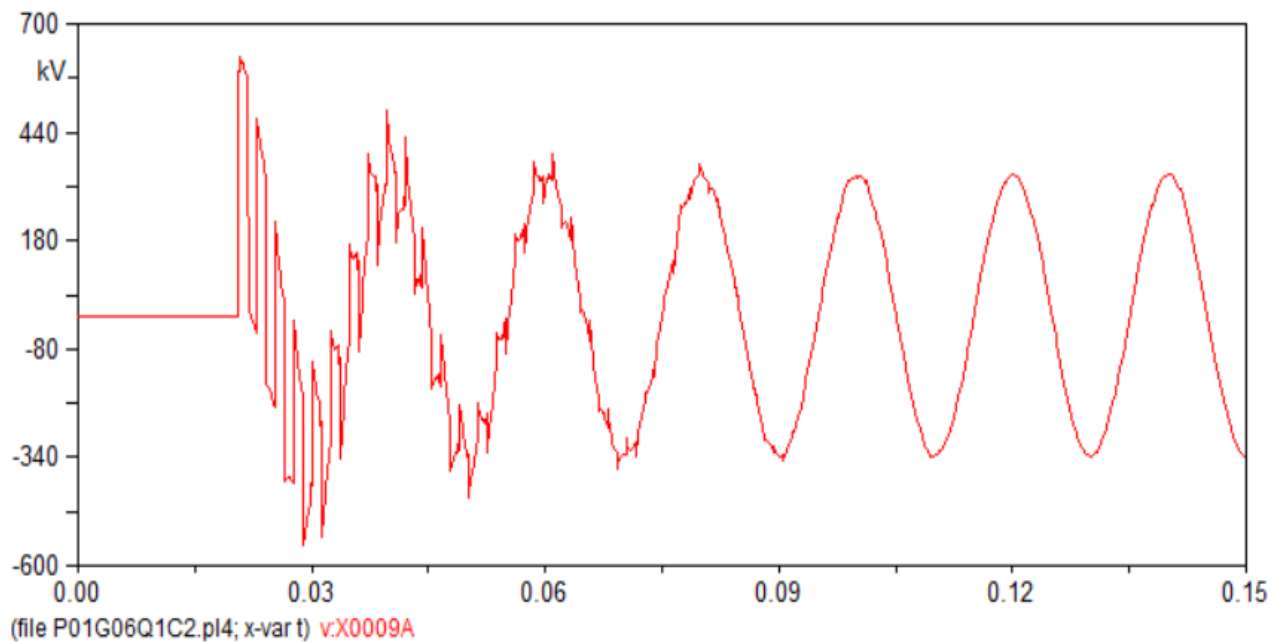
Εικόνα 1.3: Μέτρηση τάσης φάσης α της ΓΜ#1 στα 50 Hz (μεγέθυνση)

β) Για παραμέτρους γραμμής στα 1.5 kHz (Αρχείο P01G06Q1C2)



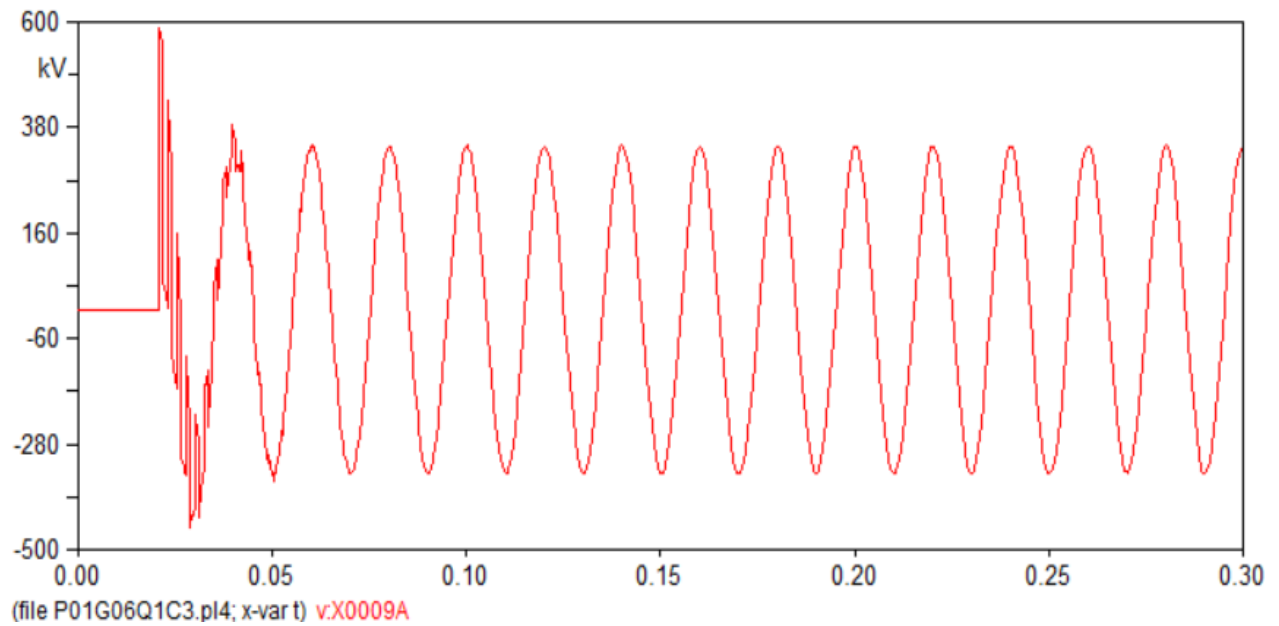
Εικόνα 1.4: Μέτρηση τάσης φάσης α της ΓΜ#1 στα 1.5 kHz

Και με μεγέθυνση(zoom):



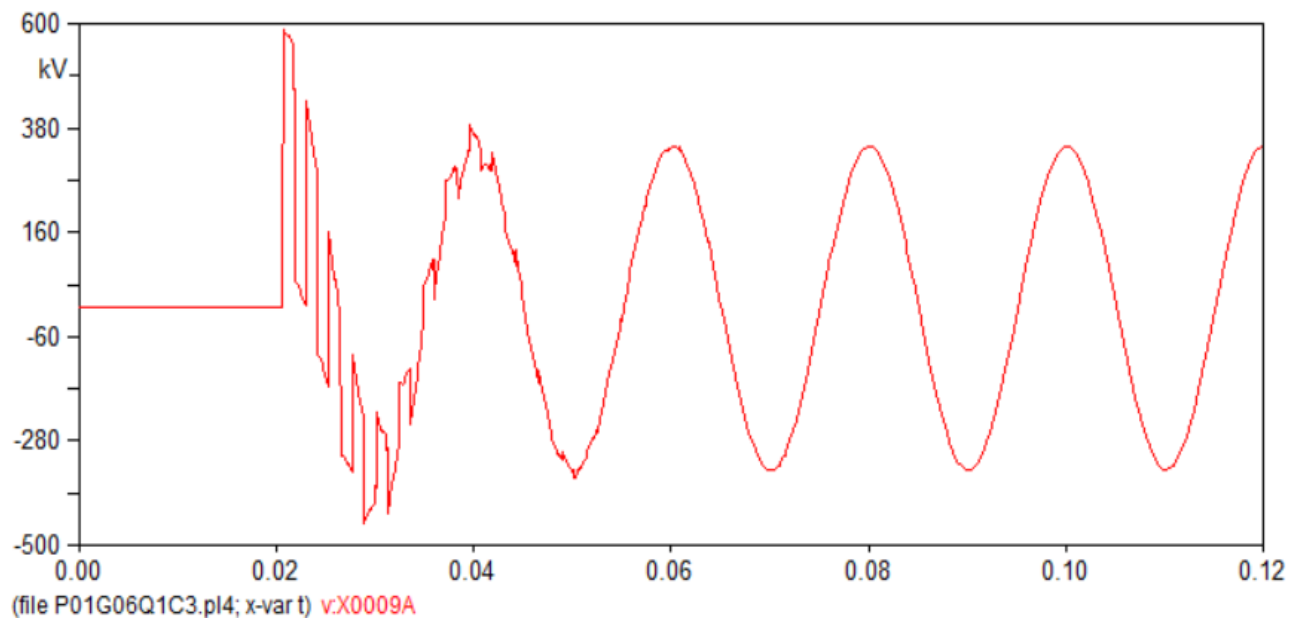
Εικόνα 1.5: Μέτρηση τάσης φάσης α της ΓΜ#1 στα 1.5 kHz (μεγέθυνση)

γ) Για παραμέτρους γραμμής στα 5 kHz (Αρχείο P01G06Q1C3)



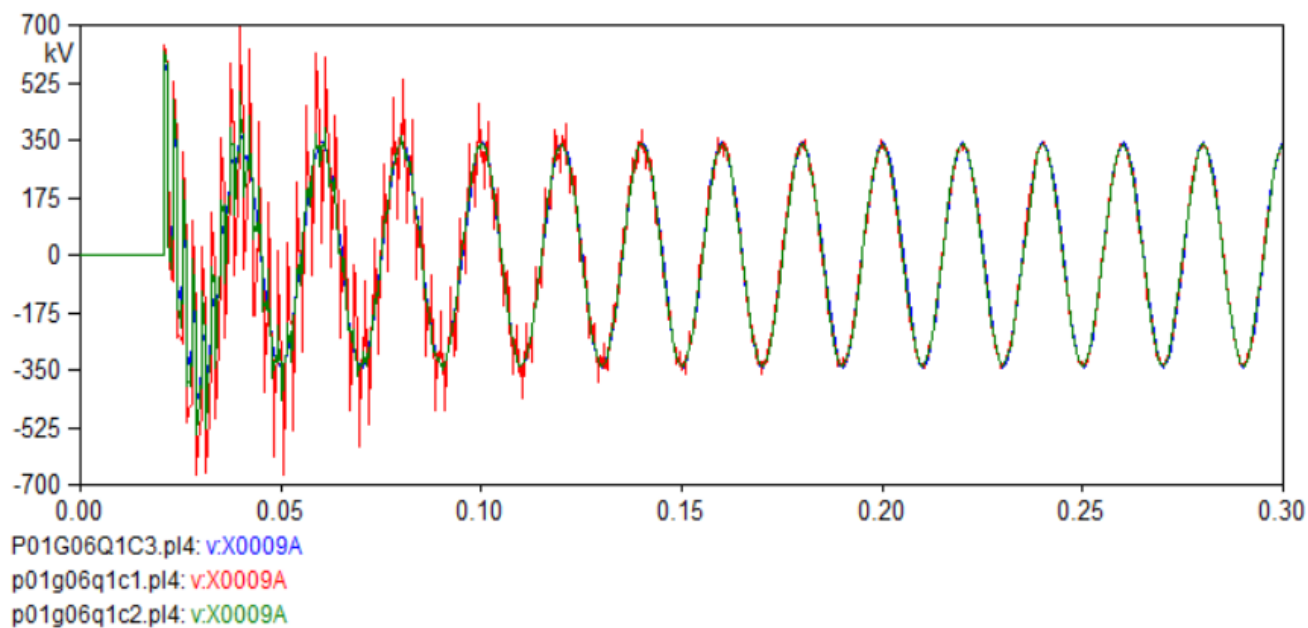
Εικόνα 1.6: Μέτρηση τάσης φάσης α της ΓΜ#1 στα 5 kHz

Και με μεγέθυνση(zoom):



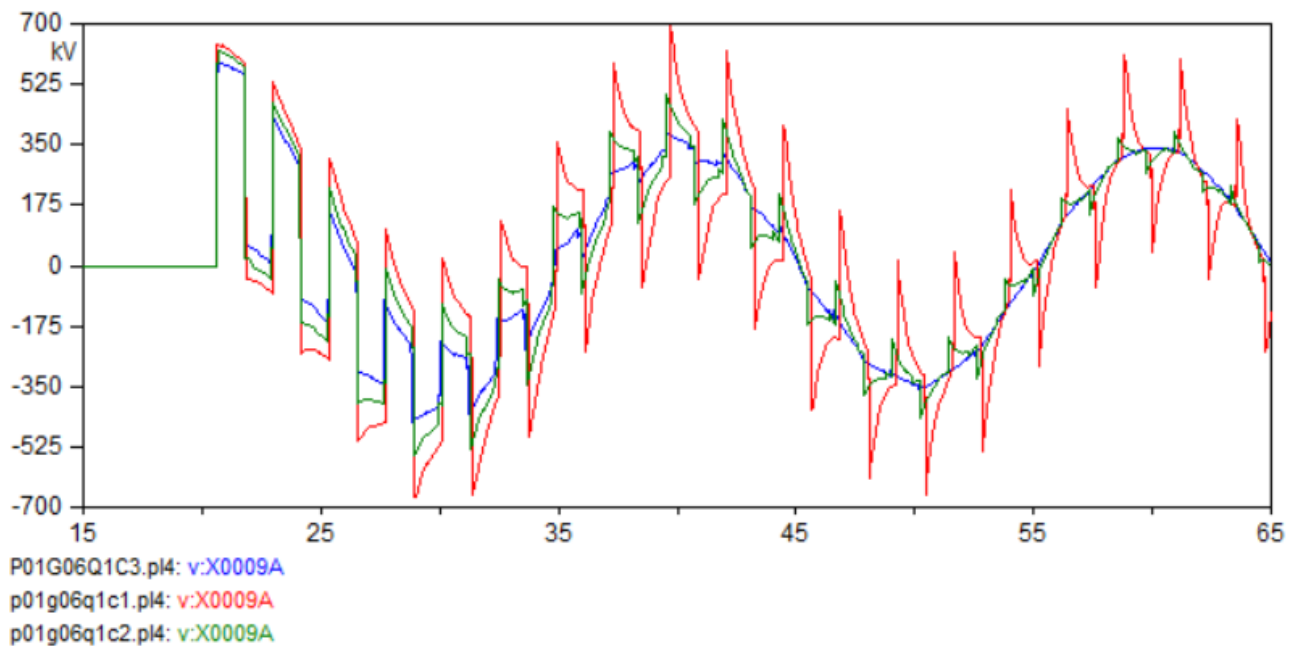
Εικόνα 1.7: Μέτρηση τάσης φάσης α της ΓΜ#1 στα 5 kHz (μεγέθυνση)

Το συγκριτικό διάγραμμα των τριών περιπτώσεων για την τάση της φάσης a προκύπτει:



Εικόνα 1.8: Συγκριτικό διάγραμμα για 50Hz, 1.5kHz, και 5kHz

Και με μεγέθυνση(zoom):



Εικόνα 1.9: Συγκριτικό διάγραμμα για 50Hz, 1.5kHz, και 5kHz (μεγέθυνση)

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι εμφανές, πως με αύξηση της συχνότητας πάνω στη γραμμή μεταφοράς, έχουμε γρηγορότερη απόσβεση του μεταβατικού φαινομένου που επέρχεται από το κλείσιμο του διακόπτη S_1 . Αυτό συμβαίνει γιατί έχουμε λάβει υπόψη στην προσομοίωση την επίδραση του επιδερμικού φαινομένου. Με αύξηση της συχνότητας το επιδερμικό φαινόμενο γίνεται πιο έντονο με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος που θα διαρρέει τους αγωγούς να τείνει να κυκλοφορεί στην εξωτερική τους επιφάνεια. Έτσι, έχουμε αύξηση της ειδικής αντίστασης του χαλκού των καλωδίων και επομένως την αύξηση της συνολικής ωμικής αντίστασης. Ως αποτέλεσμα αυτής της αύξησης, προκύπτει η γρηγορότερη απόσβεση του μεταβατικού φαινομένου.

Ερώτημα 1 β)

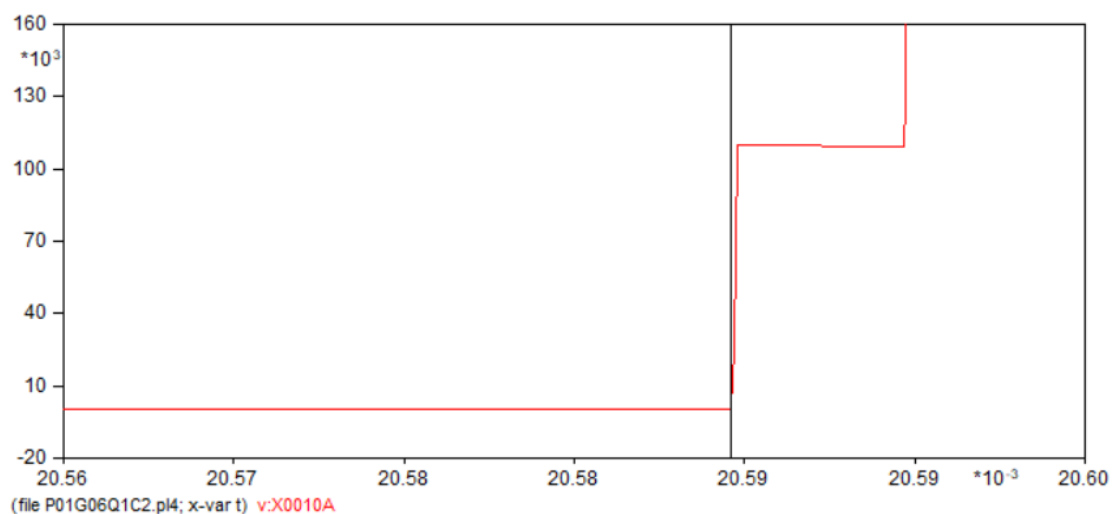
Για την περίπτωση των 1.5 kHz να υπολογιστεί ο χρόνος και η ταχύτητα διάδοσης του κύματος. Έχει νόημα η σύνδεση πολλαπλών μοντέλων KCLe / Bergeron; Αν ναι, γιατί; Να σχολιάσετε τα αποτελέσματα.

Απάντηση

Ο χρόνος διάδοσης του κύματος σε μία γραμμή μεταφοράς είναι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από την επιβολή μιας τάσης σε κάποιο σημείο της γραμμής, μέχρι τη στιγμή που γίνεται αντιληπτή αυτή η τάση σε ένα άλλο σημείο της γραμμής

Σύνδεση με ένα μοντέλο Bergeron (Αρχείο P01G06Q1C2)

Με βάση το διάγραμμα για συχνότητα 1.5 kHz βρίσκουμε το χρόνο όδευσης στην ΓΜ#1



Εικόνα 1.10: Υπολογισμός χρόνου όδευσης κύματος για 1500Hz

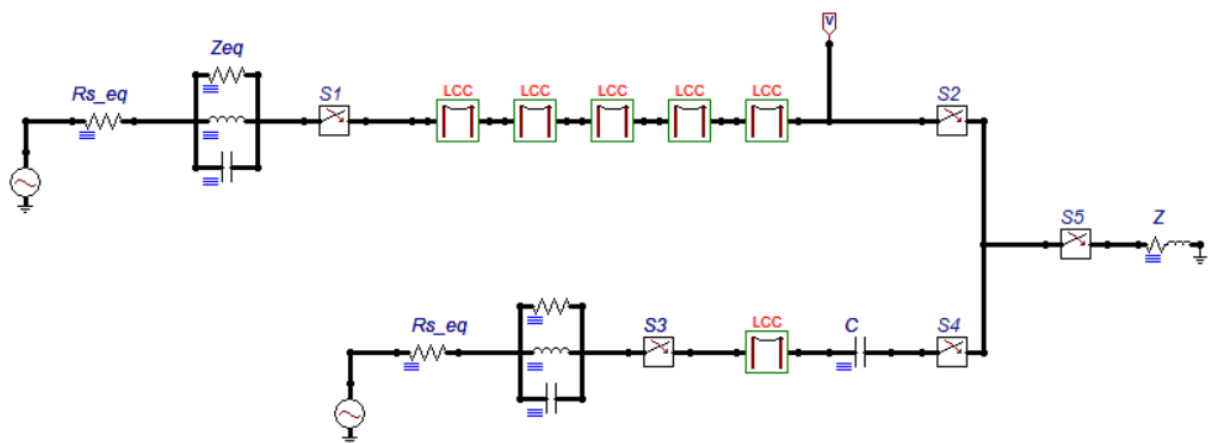
Γίνεται χρήση του cursor και βρίσκουμε πως το οδεύον κύμα φτάνει στο άκρο της γραμμής τη χρονική στιγμή $t_{\text{arrival}} = 20.587\text{ms}$, ενώ ο διακόπτης κλείνει τη στιγμή $t_{\text{close}} = 20\text{ms}$. Επομένως έχουμε ένα χρονικό διάστημα οδευσης $t_{\text{travel}} = 0.587\text{ms}$

Η ταχύτητα οδευσης του κύματος προκύπτει $u = \frac{175 \cdot 10^3}{0.587 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow u = 2.98 \cdot 10^8\text{ m/s}$

Παρατηρούμε πως η ταχύτητα διάδοσης είναι προσεγγιστικά ίση με αυτή του φωτός, κάτι που ήταν αναμενόμενο καθώς η μοντελοποίηση μας αφορά ΓΜΧΑ.

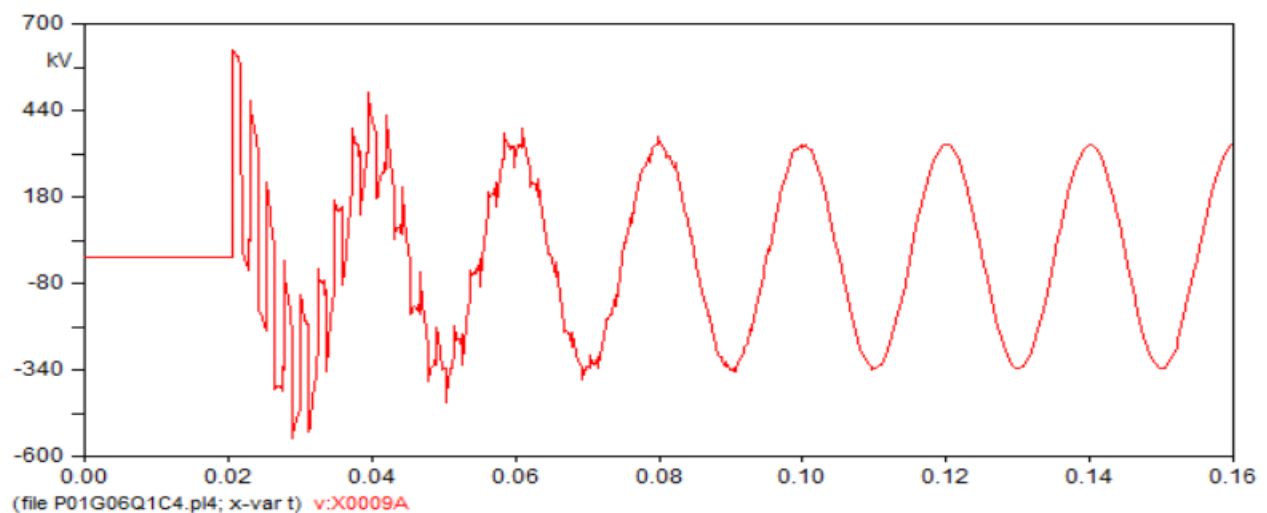
Σύνδεση πολλαπλών μοντέλων Bergeron (Αρχείο P01G06Q1C4)

Συνδέουμε 5 γραμμές μοντέλου Bergeron με μήκη $175/5=35\text{km}$:



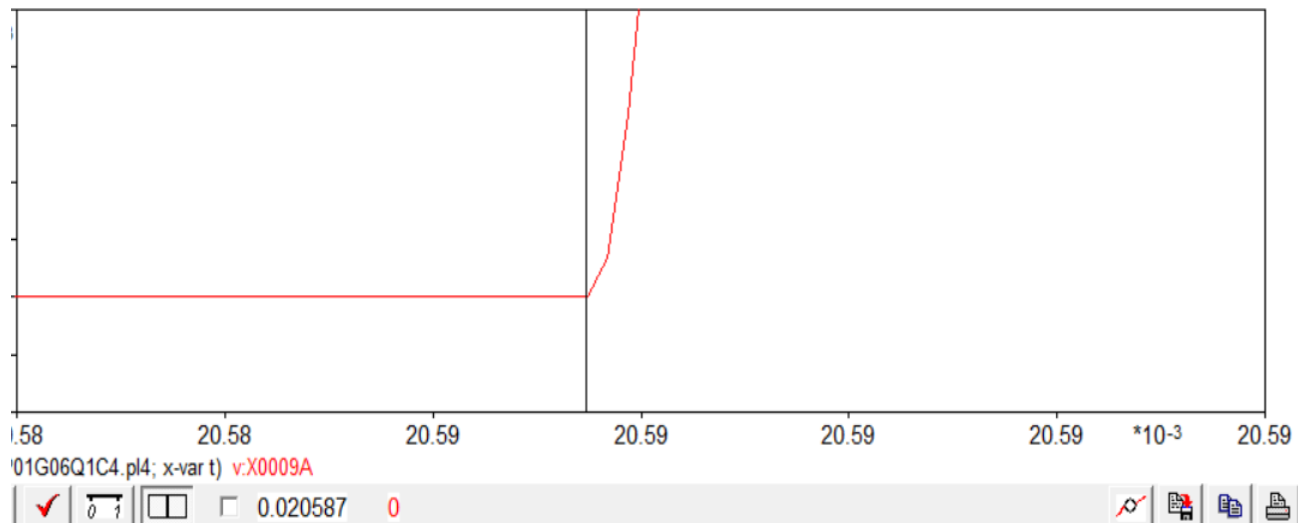
Εικόνα 1.11: Διάταξη 5 μοντέλων Bergeron

έχουμε το ακόλουθο διάγραμμα της προσομοίωσης:



Εικόνα 1.12: Τάση φάσης α για 1500Hz και με 5 μοντέλα Bergeron

ενώ για το χρόνο όδευσης από το διάγραμμα:



Εικόνα 1.13: Χρόνος όδευσης κύματος για 1500Hz και με 5 μοντέλα Bergeron

Άρα ο χρόνος όδευσης προκύπτει $t_{\text{travel}}=0.587\text{ms}$ και η ταχύτητα όδευσης $u \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Παρατηρήσεις - Σχόλια

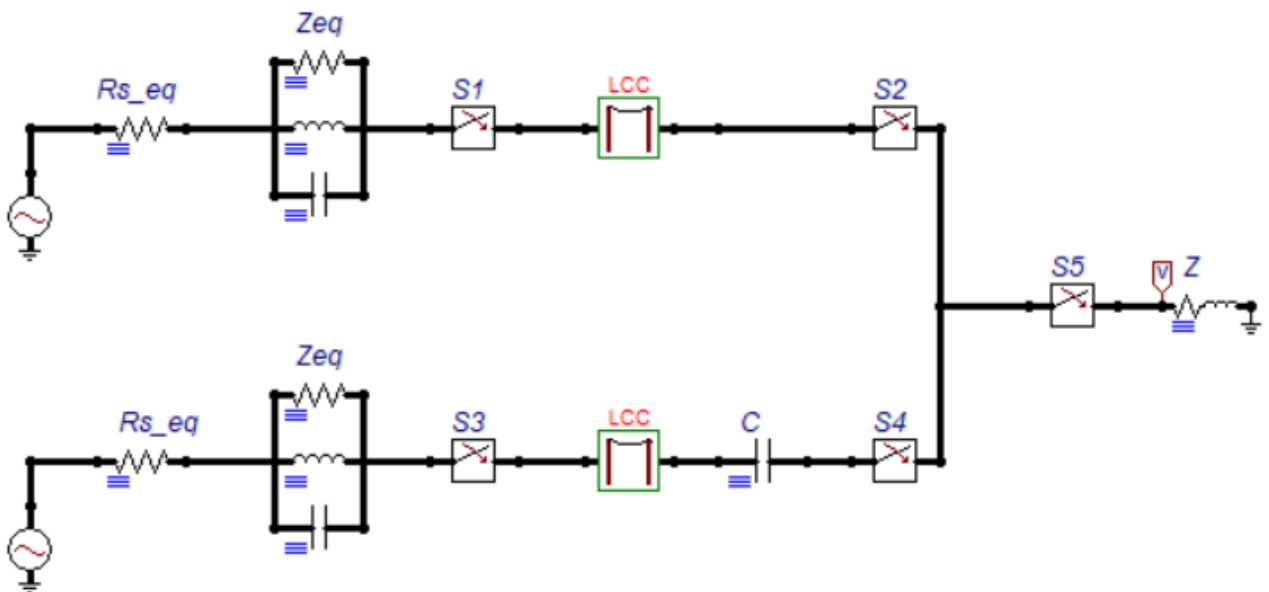
Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, η τάση, καθώς και ο χρόνος και η ταχύτητα όδευσης παραμένουν ουσιαστικά ίδια. Αυτή η διαπίστωση είναι απολύτως λογική, αφού το μοντέλο Bergeron είναι μοντέλο που προσομοιώνει τον διανεμημένο χαρακτήρα της γραμμής και επομένως η χρήση πολλαπλών Bergeron δεν παρουσιάζει ουσιαστικό νόημα.

Ερώτημα 2

Οι διακόπτες S_1 , S_3 και S_5 είναι κλειστοί. Οι διακόπτες S_2 και S_4 κλείνουν τις χρονικές στιγμές 30 ms και 170 ms, αντίστοιχα. Να απεικονιστούν οι τάσεις των φάσεων στο φορτίο και να υπολογιστεί προσεγγιστικά η ενεργός τιμή των στο πέρας κάθε μεταβατικού φαινομένου. Να θεωρηθεί ότι οι ΓΜ αναπαρίσταται με 1 ισοδύναμο κύκλωμα και παραμέτρους υπολογισμένες στο 1 kHz

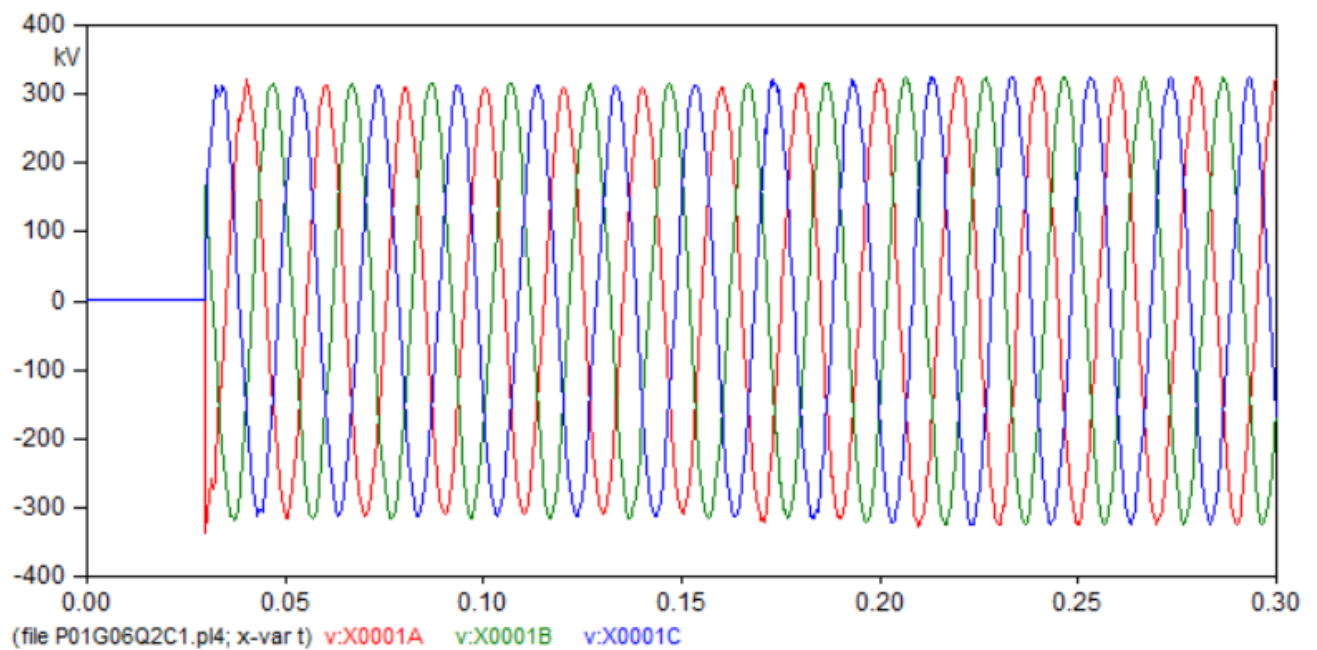
Απάντηση: (Αρχείο P01G06Q2C1)

Η διάταξη που θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση του ερωτήματος φαίνεται παρακάτω. Οι διακόπτες S_2 και S_4 έχουν ρυθμιστεί στους ζητούμενους χρόνους, ενώ έχει τοποθετηθεί βρόχος για τη μέτρηση της τάσης των τριών φάσεων στο φορτίο Z .



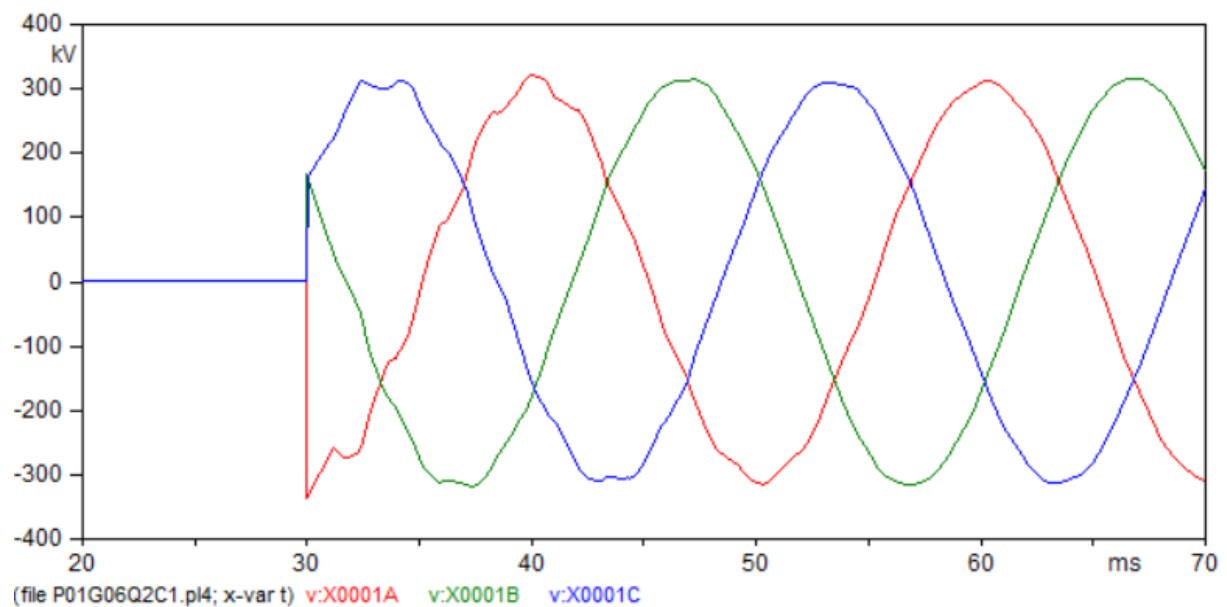
Εικόνα 2.1: Διάταξη μέτρησης της τάσης στο φορτίο

Οι τάσεις των φάσεων στο φορτίο φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα:

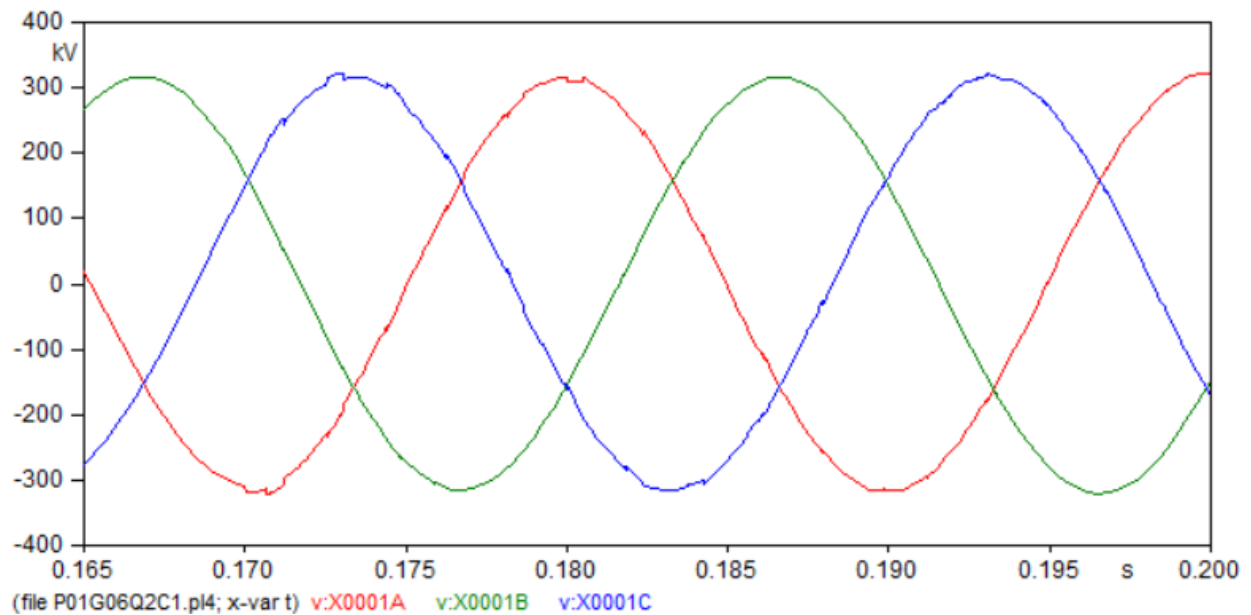


Εικόνα 2.2: Διάταξη μέτρησης της τάσης στο φορτίο

Με μεγέθυνση βλέπουμε τα μεταβατικά φαινόμενα στους χρόνους που κλείνουν οι διακόπτες:

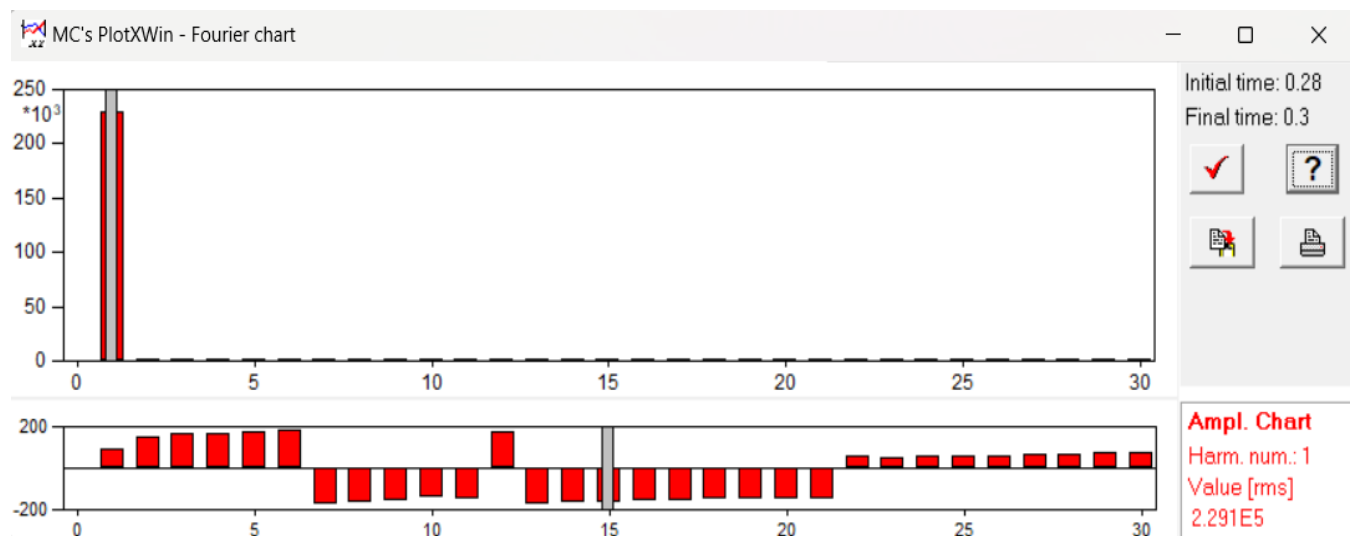


Εικόνα 2.3: Μεταβατικά φαινόμενα κατά το κλείσιμο του διακόπτη S_2 στα 30ms



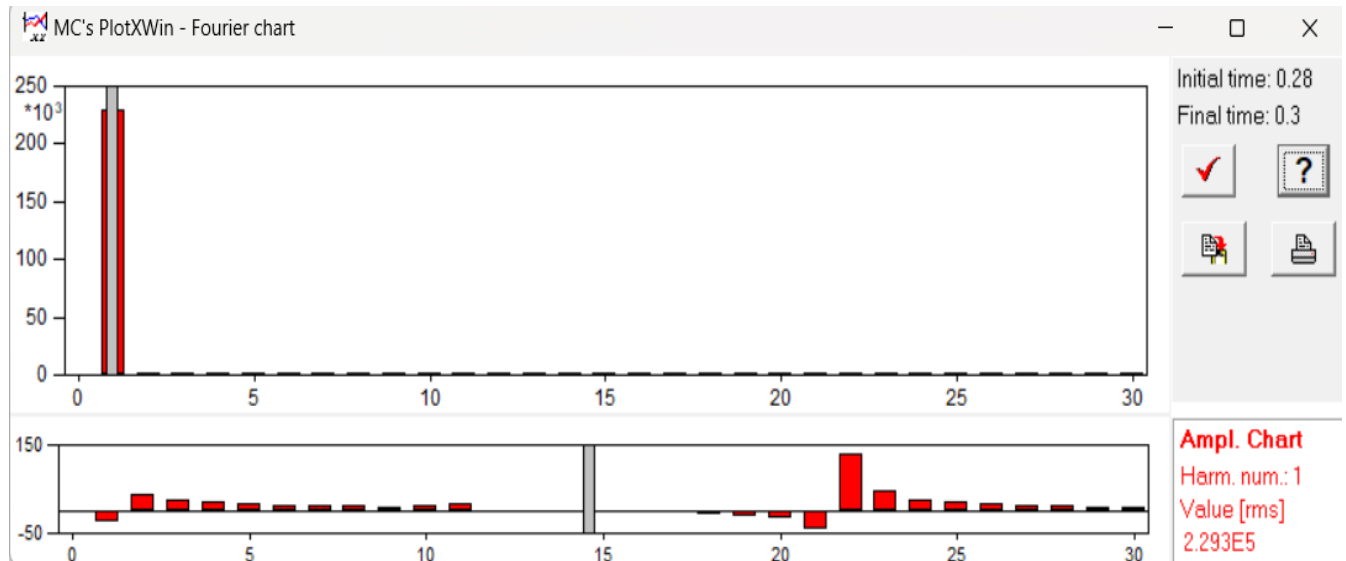
Εικόνα 2.4: Μεταβατικά φαινόμενα κατά το κλείσιμο του διακόπτη S_4 στα 170ms

Με χρήση διαγράμματος Fourier μέσω του ATP λαμβάνουμε τις ενεργές τιμές V_{rms} των τάσεων μετά το πέρας των μεταβατικών φαινομένων.



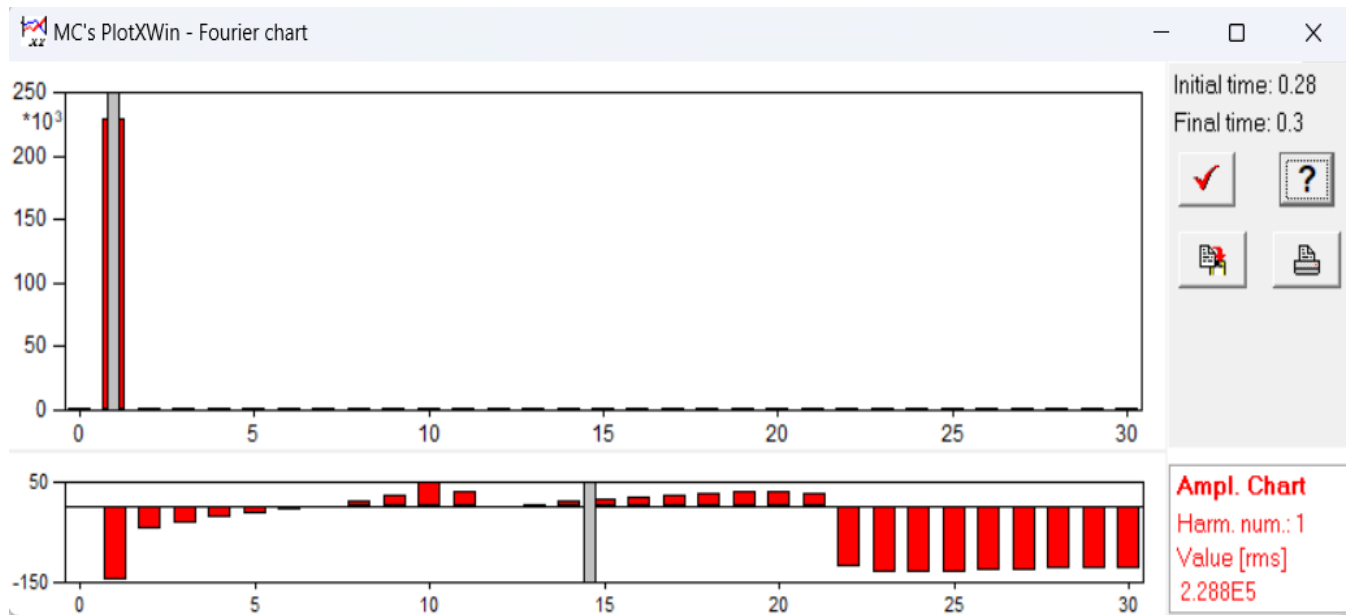
Εικόνα 2.5: Διάγραμμα Fourier για την τάση της φάσης a

Οπότε λαμβάνουμε, $V_{rms,A} = 229.1 \text{ kV}$



Εικόνα 2.6: Διάγραμμα Fourier για την τάση της φάσης b

Οπότε λαμβάνουμε, $V_{\text{rms},B} = 229.3 \text{ kV}$



Εικόνα 2.6: Διάγραμμα Fourier για την τάση της φάσης c

Οπότε λαμβάνουμε, $V_{\text{rms},C} = 228.8 \text{ kV}$

Ερώτημα 3 α)

Το φορτίο τροφοδοτείται κανονικά μέσω και των 2 ΓΜ (όλοι οι διακόπτες S κλειστοί). Τη χρονική στιγμή $t = 40 \text{ ms}$ παρουσιάζεται σφάλμα στον πυκνωτή C στην πλευρά του ζυγού του φορτίου. Το σφάλμα έχει τη μορφή μονοφασικού βραχυκυκλώματος με αντίσταση σφάλματος 2Ω ως προς τη γη στη φάση b και διαρκεί για 4 περιόδους, ενώ μετά το πέρας των απομονώνεται. Να θεωρηθεί ότι οι ΓΜ αναπαρίστανται με 1 ισοδύναμο κύκλωμα και παραμέτρους υπολογισμένες στο 1.5 kHz

Ποια είναι η μέγιστη τάση που θα εμφανιστεί πάνω στον πυκνωτή C; Πώς μπορούμε να τον προστατέψουμε; Σχολιάστε τα αποτελέσματα.

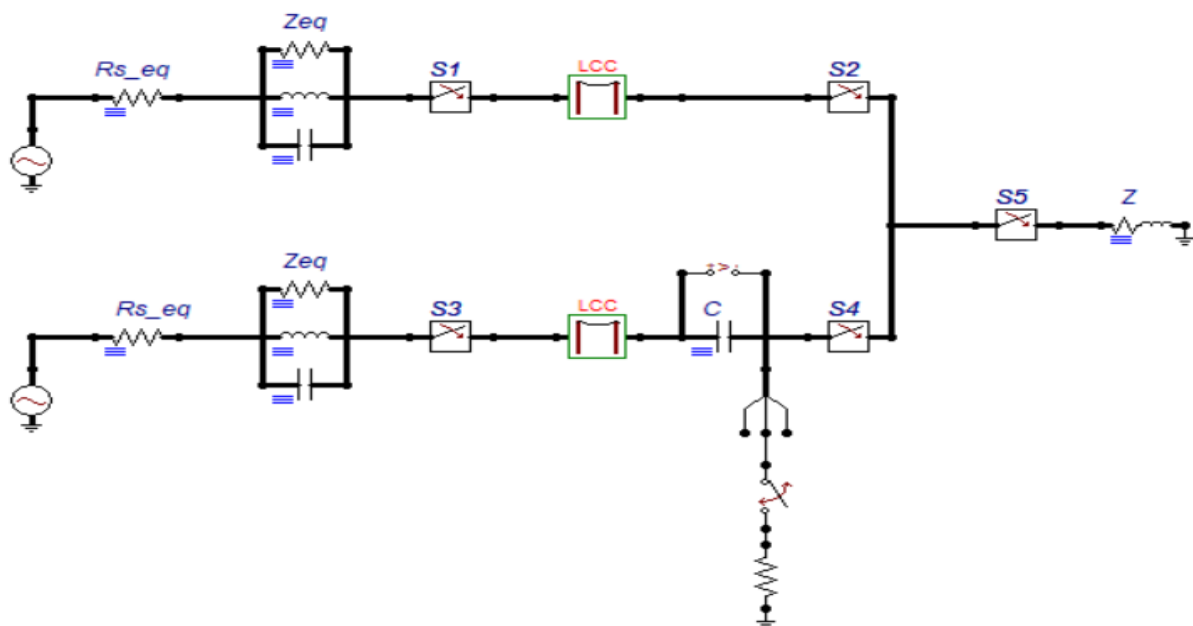
Απάντηση: (Αρχείο P01G06Q3C1)

Προσομοιώνουμε το βραχυκύκλωμα με έναν splitter για να πάρουμε τη φάση b που μας ενδιαφέρει και προσθέτουμε έναν χρονικά ελεγχόμενο διακόπτη και μία αντίσταση γείωσης καθώς και ένα βολτόμετρο στα άκρα του πυκνωτή. Όσον αφορά τους χρόνους του διακόπτη ως T_{close} λαμβάνουμε τη χρονική στιγμή του σφάλματος 40 ms , ενώ αφού το σφάλμα διαρκεί 4 περιόδους και με συχνότητα 50 Hz έχουμε διάρκεια σφάλματος:

$$t_{\text{fault}} = 4 \cdot T \text{ όπου } T = \frac{1}{f} = 20 \text{ ms} \Rightarrow t_{\text{fault}} = 80 \text{ ms}$$

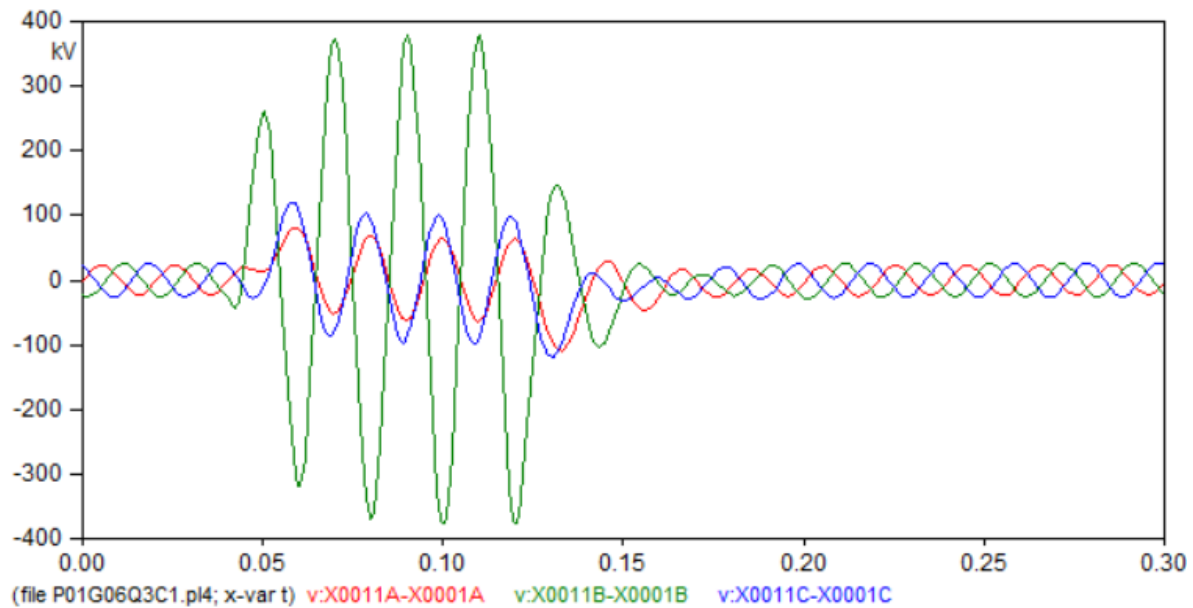
Άρα τελικά προκύπτουν $T_{\text{close}} = 40 \text{ ms} = 0.04 \text{ s}$ και $T_{\text{open}} = 40 \text{ ms} + 80 \text{ ms} = 0.12 \text{ s}$

Η διάταξη της εκφώνησης προκύπτει ως εξής:

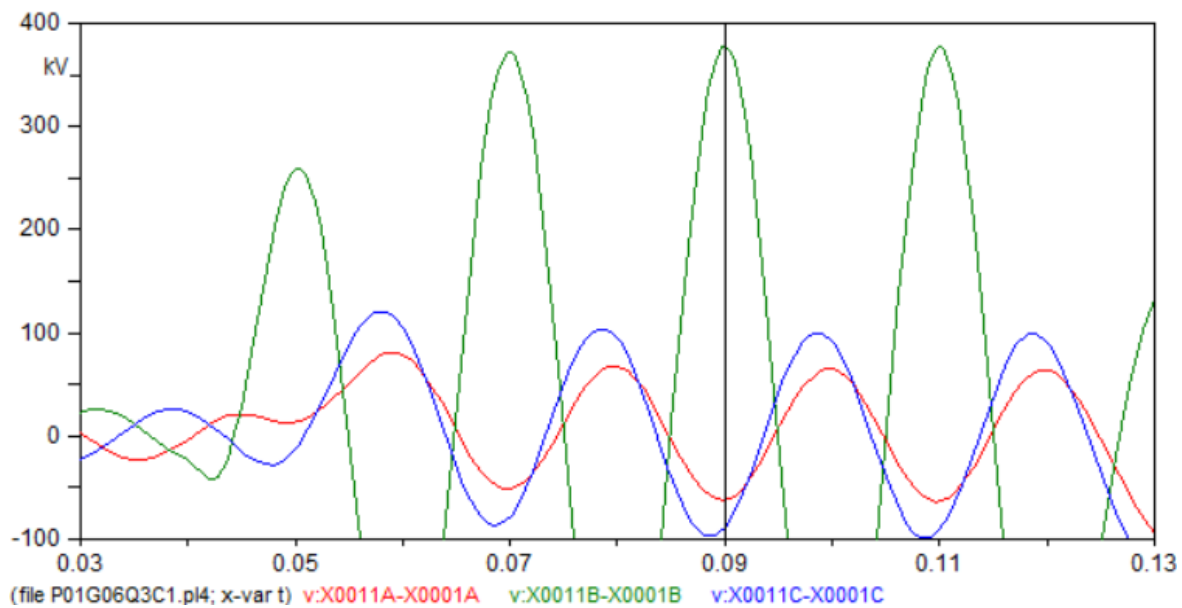


Εικόνα 3.1: Διάταξη μέτρησης τάσης πυκνωτή σε μονοφασικό βραχυκύκλωμα

Η κυματομορφή της τάσης που θα εμφανιστεί στον πυκνωτή C φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 3.2: Κυματομορφές των τάσεων στον πυκνωτή C



Εικόνα 3.3: Κορυφές των κυματομορφών των τάσεων στον πυκνωτή C

Σύμφωνα με τα διαγράμματα λοιπόν η μέγιστη τάση που εμφανίζεται στον πυκνωτή είναι ίση με $V_{\text{peak}} = 377.6 \text{ kV}$ στα 90ms

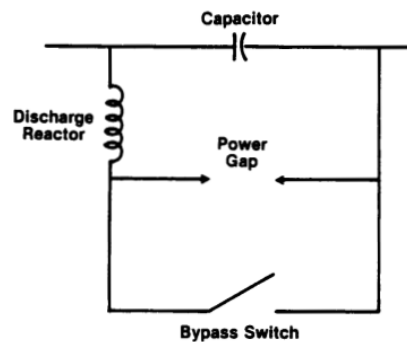
Παρατηρούμε πως στα άκρα του πυκνωτή αναπτύσσονται επικίνδυνες υπερτάσεις, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε καταστροφή του στοιχείου. Μετά τη λήξη του σφάλματος φαίνεται πως έχουμε ένα διάστημα μεταβατικής απόσβεσης της υπέρτασης και καταλήγουμε σε

μία στάσιμη κατάσταση. Τέλος, φαίνεται πως οι τάσεις των δύο άλλων φάσεων (a,c) δεν έχουν ομαλή κυματομορφή ώστε να καλύψουν τις ανάγκες του φορτίου.

Για την προστασία του πυκνωτή χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τεχνικές:

Α. Παράλληλο Διάκενο Σπινθηρισμού:

Χρησιμοποιούνταν τα παλαιότερα χρόνια. Η διάταξη αποτελείται από το διάκενο, το πηνίο εκφόρτισης και το διακόπτη παράκαμψης σε παράλληλη σύνδεση με τον πυκνωτή. Όταν εμφανιστεί στον πυκνωτή υπέρταση, της τάξης 2.5 με 4 φορές της ονομαστικής του, το διάκενο διασπάται (σπινθηρισμός). Το πηνίο τοποθετείται σε σειρά με το διάκενο ώστε να περιορίσει το ρεύμα που αναπτύσσεται στο διάκενο. Μόλις το διάκενο διαπεραστεί από ρεύμα ο διακόπτης παράκαμψης κλείνει για να αποσβέσει το τόξο στο διάκενο, παραμένει κλειστός μέχρι να περιοριστεί το φαινόμενο και έπειτα ανοίγει αυτόματα για να επανασυνδέσει τον πυκνωτή.



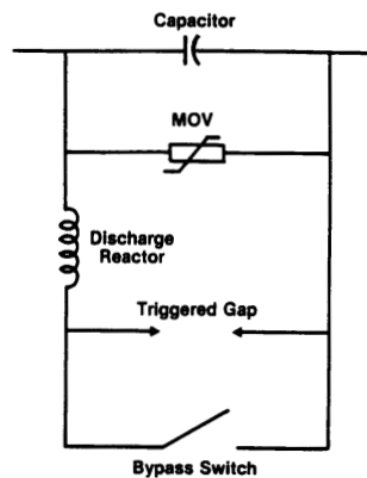
Εικόνα 3.4: Διάταξη προστασίας παράλληλου διακένου

Β. Varistor Οξειδίων Μετάλλου (MOV).

Η διάταξη αυτή χρησιμοποιείται ευρέως τα τελευταία χρόνια για την αντιμετώπιση των υπερτάσεων και των μεταβατικών φαινομένων που προκαλούν. Το MOV(βαρίστορ) συνδέεται απευθείας με τον πυκνωτή χωρίς να παρεμβάλλεται πηνίο ή διάκενο. Η μη-γραμμικότητα του βαρίστορ έχει ως αποτέλεσμα την απουσία αγωγιμότητας του σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας. Σε περίπτωση αύξησης της τάσης του πυκνωτή, το βαρίστορ ξεκινά να άγει ρεύμα μειώνοντας έτσι το ρεύμα που διαρρέει τον πυκνωτή και περιορίζοντας την τάση στα άκρα του. Μόλις ξεπεραστεί το φαινόμενο το βαρίστορ παύει να άγει και η διάταξη επανέρχεται σε φυσιολογική λειτουργία.

Σε περίπτωση που ξεπεραστεί το όριο της ενέργειας που μπορεί να απορροφήσει το βαρίστορ, υπάρχει συμπληρωματικά η διάταξη του παράλληλου διακένου. Μόλις καταγραφεί υπέρβαση του ορίου του βαρίστορ, το διάκενο διασπάται και ο διακόπτης παράκαμψης κλείνει για να προστατεύσει το βαρίστορ ενώ το πηνίο εκφόρτισης αποσβένει το ρεύμα του πυκνωτή.

Η διάταξη αυτή έχει το πλεονέκτημα πως ο πυκνωτής δεν αποσυνδέεται τελείως από το σύστημα μόλις συμβεί σφάλμα και συνεχίζει να διαρρέεται από ρεύμα με αποτέλεσμα η επανένταξη του να μην παρουσιάζει έντονα μεταβατικά φαινόμενα.



Εικόνα 3.5: Διάταξη προστασίας MOV

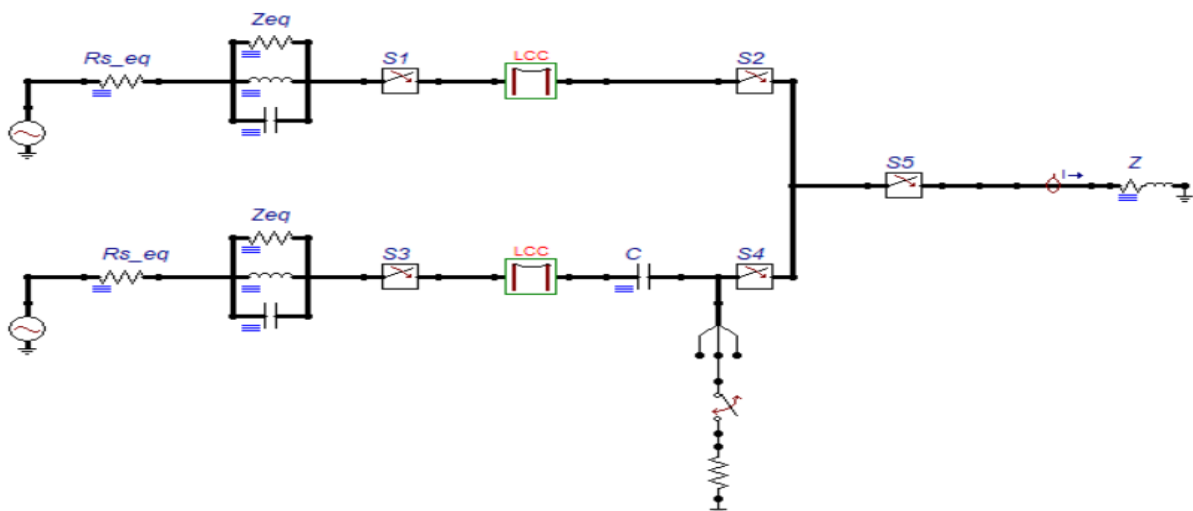
Ερώτημα 3 β)

Αν υποθέσουμε ότι το βραχυκύκλωμα είναι τριφασικό ως προς τη γη μέσω αντίστασης 2 Ω /φάση, τι διαφοροποιήσεις προκύπτουν στο ρεύμα του φορτίου σε σχέση με το μονοφασικό σφάλμα και που οφείλονται αυτές;

Απάντηση:

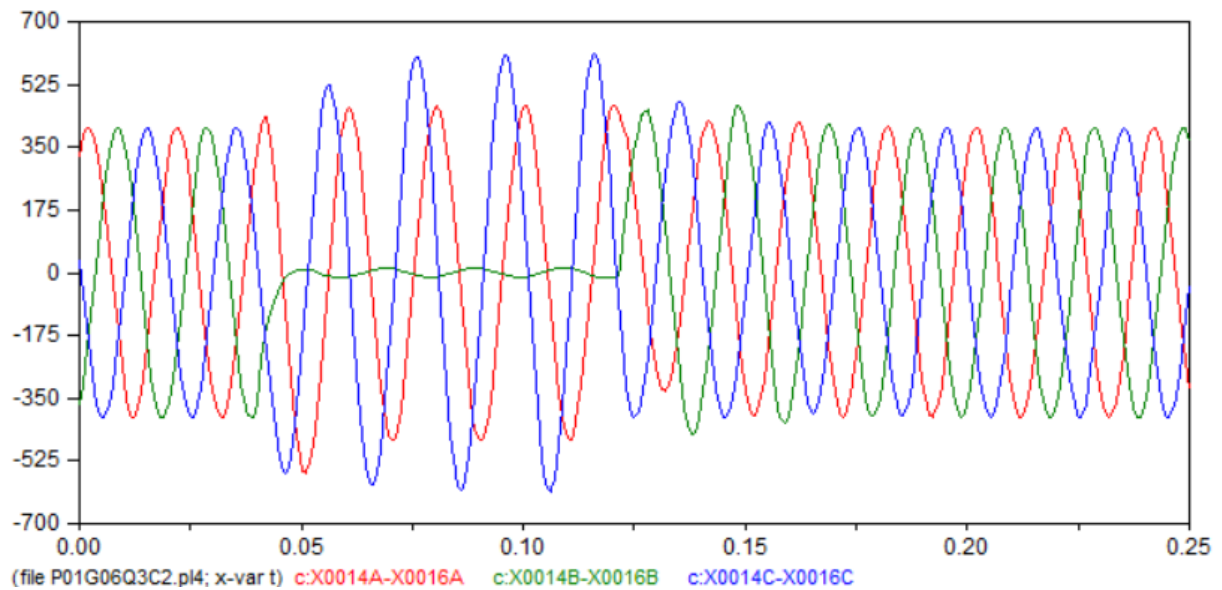
Μονοφασικό βραχυκύκλωμα (Αρχείο P01G06Q3C2)

Για το ρεύμα σε μονοφασικό βραχυκύκλωμα χρησιμοποιούμε την προηγούμενη διάταξη με ένα αμπερόμετρο τοποθετημένο στο φορτίο:



Εικόνα 3.6: Διάταξη μέτρησης ρεύματος φορτίου σε μονοφασικό βραχυκύκλωμα

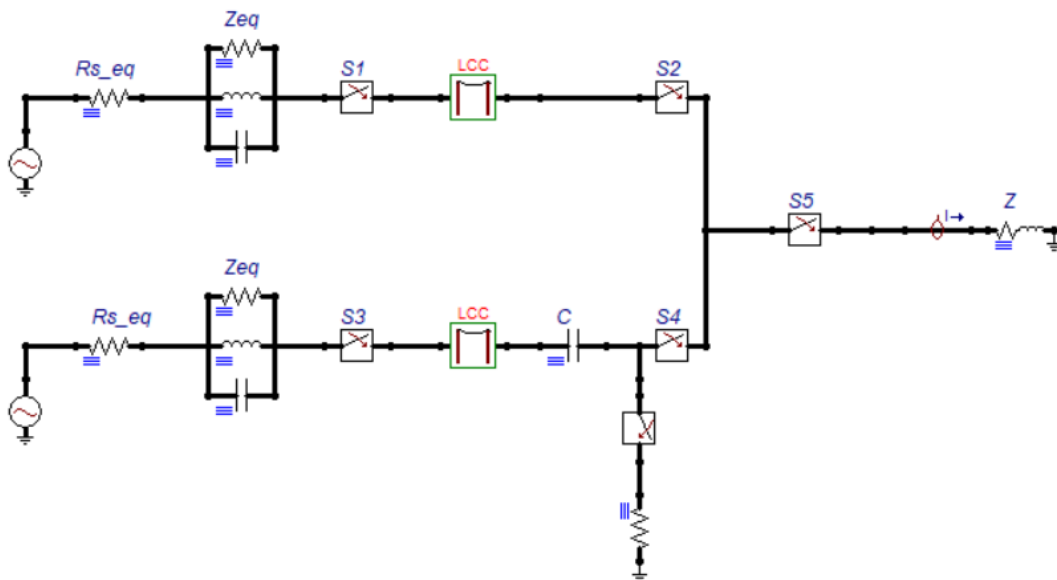
Με την εκτέλεση της προσομοίωσης προκύπτει το σχεδιάγραμμα:



Εικόνα 3.7: Ρεύματα φάσεων φορτίου σε μονοφασικό βραχυκύκλωμα

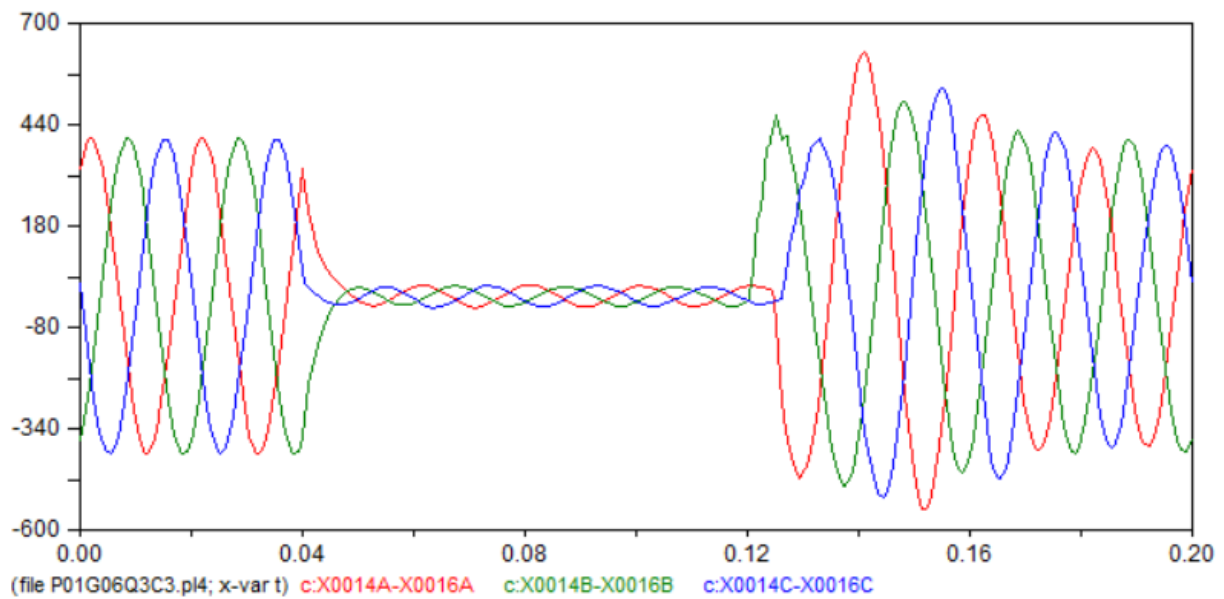
Τριφασικό βραχυκύκλωμα (Αρχείο P01G06Q3C3)

Για την προσομοίωση του τριφασικού βραχυκυκλώματος προκύπτει η ακόλουθη διάταξη:



Εικόνα 3.8: Διάταξη μέτρησης ρεύματος φορτίου σε τριφασικό βραχυκύκλωμα

Και το διάγραμμα των ρευμάτων



Εικόνα 3.9: Ρεύματα φάσεων φορτίου σε τριφασικό βραχυκύκλωμα

Παρατηρήσεις

Στην περίπτωση του μονοφασικού βραχυκυκλώματος, παρατηρούμε πως το ρεύμα της φάσης b τείνει να μηδενιστεί ενώ το ρεύμα των άλλων φάσεων αυξάνεται για να καλύψει το απαιτούμενο φορτίο.

Από την άλλη, στο τριφασικό βραχυκύκλωμα βλέπουμε πως το ρεύμα και των τριών φάσεων τείνει να μηδενιστεί, κάτι που είναι αναμενόμενο καθώς πρόκειται για ολικό σφάλμα.

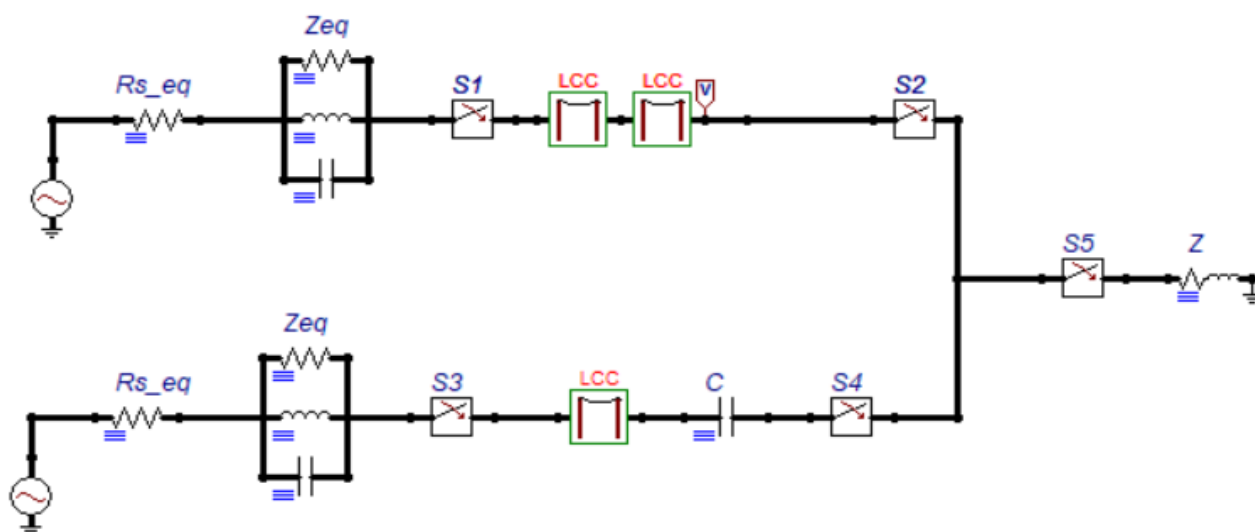
Ερώτημα 4

Το φορτίο τροφοδοτείται μόνο από τη 1η ΓΜ (διακόπτες S_3, S_4 ανοικτοί). Κάποια στιγμή συμβαίνει ένα κεραυνικό πλήγμα (1 kA, $1.2 \mu\text{s} / 5 \mu\text{s}$) στη φάση α στο $\frac{1}{4}$ του μήκους της ΓΜ (μετρούμενο από το άκρο αποστολής). Να υπολογιστεί σε ποιες χρονικές στιγμές πρέπει να συμβεί το πλήγμα ώστε να αναπτυχθεί η μικρότερη και η μεγαλύτερη μέγιστη στιγμιαία τάση στο φορτίο. Να απεικονισθούν οι τάσεις αυτές με μορφή διαγράμματος. Για ποιο λόγο προσομοιώνεται το κεραυνικό πλήγμα με πηγή ρεύματος και όχι τάσης;

Απάντηση: (Αρχεία P01G06Q4C1,P01G06Q4C2,P01G06Q4C3,P01G06Q4C4-5)

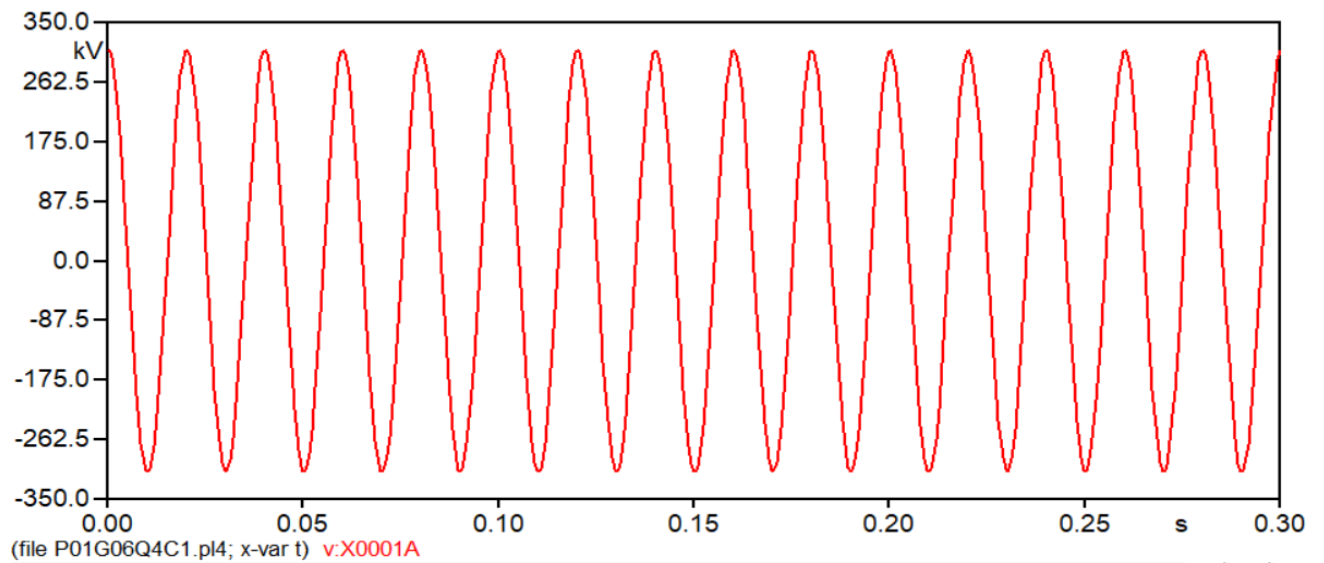
Θα κάνουμε πέντε προσομοιώσεις. Στην πρώτη προσομοίωση θεωρούμε πως δεν έχει γίνει ακόμη το κεραυνικό πλήγμα και καταγράφουμε την κυματομορφή της τάσης στο φορτίο. Στην δεύτερη προσομοίωση υπολογίζουμε το χρόνο διάδοσης του κύματος στα υπόλοιπα $\frac{3}{4}$ της ΓΜ#1. Στην τρίτη προσομοίωση πραγματοποιείται το κεραυνικό πλήγμα και αφορά τη στιγμή που έχουμε ελάχιστη τάση στο φορτίο. Τέλος στην τέταρτη και πέμπτη προσομοίωση πραγματοποιείται το κεραυνικό πλήγμα και αφορά τη στιγμή που έχουμε μέγιστη τάση (θετική και αρνητική) στο φορτίο.

Χρησιμοποιούμε δύο μοντέλα Bergeron με μήκη 43.75km και 131.25km αντίστοιχα, αφού το πλήγμα συμβαίνει στο $\frac{1}{4}$ της ΓΜ#1, η οποία έχει μήκος 175km



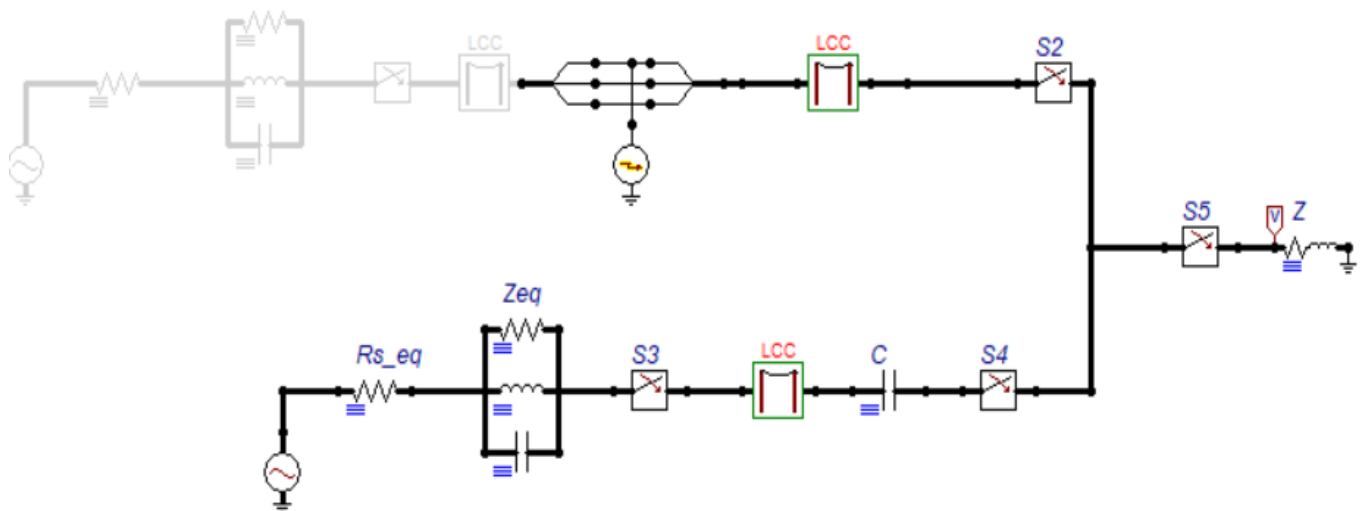
Εικόνα 4.1: Διάταξη πριν το κεραυνικό πλήγμα

Και λαμβάνουμε την κυματομορφή για την τάση

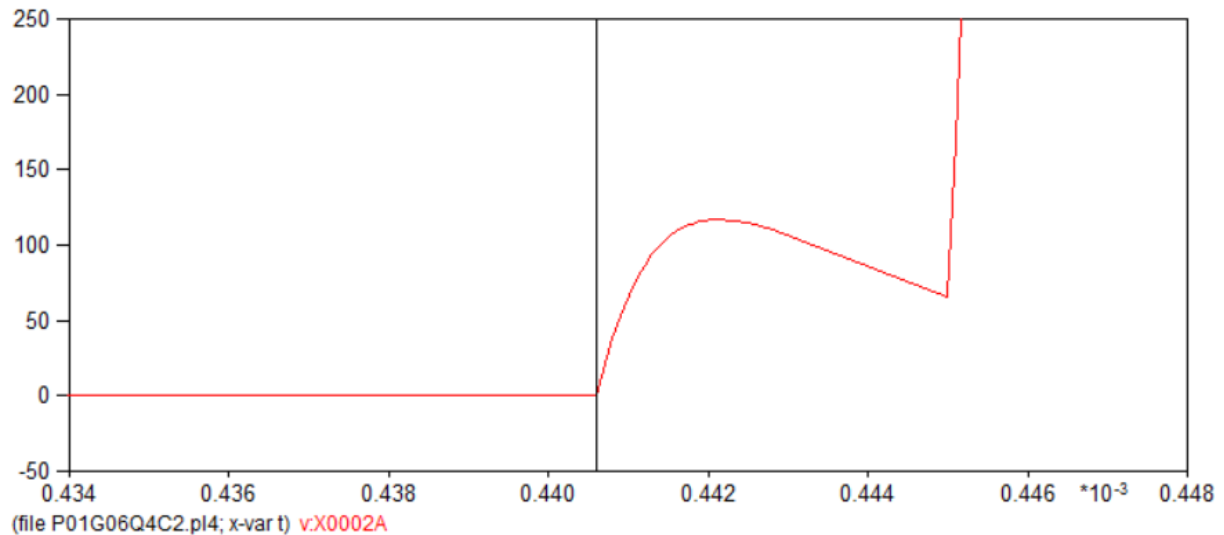


Εικόνα 4.2: Κυματομορφή τάσης στη φάση α του φορτίου

Επειτα υπολογίζουμε το χρόνο διάδοσης του πλήγματος στο υπόλοιπο της ΓΜ#1



Εικόνα 4.3: Διάταξη για τον υπολογισμό του χρόνου μετάδοσης του κεραυνού

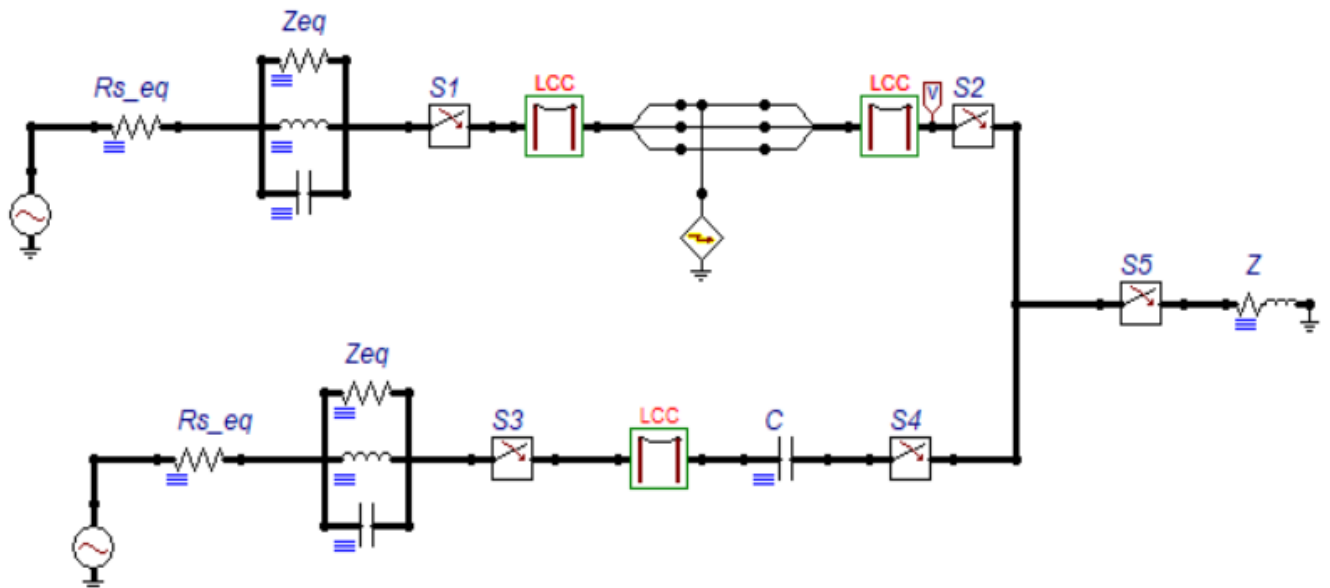


Εικόνα 4.3: Χρόνος διάδοσης του κεραυνού

Απο το διάγραμμα φαίνεται πως ο χρόνος διάδοσης του κεραυνού μέχρι το τέλος της ΓΜ#1 είναι

$$t_{\text{travel}} = 4.4068 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

Έπειτα συνδέουμε το κεραυνικό πλήγμα σύμφωνα με την παρακάτω διάταξη. Η διάταξη είναι ίδια και για τις δύο περιπτώσεις, ωστόσο αλλάζει ο χρόνος T_{start} του κεραυνικού πλήγματος

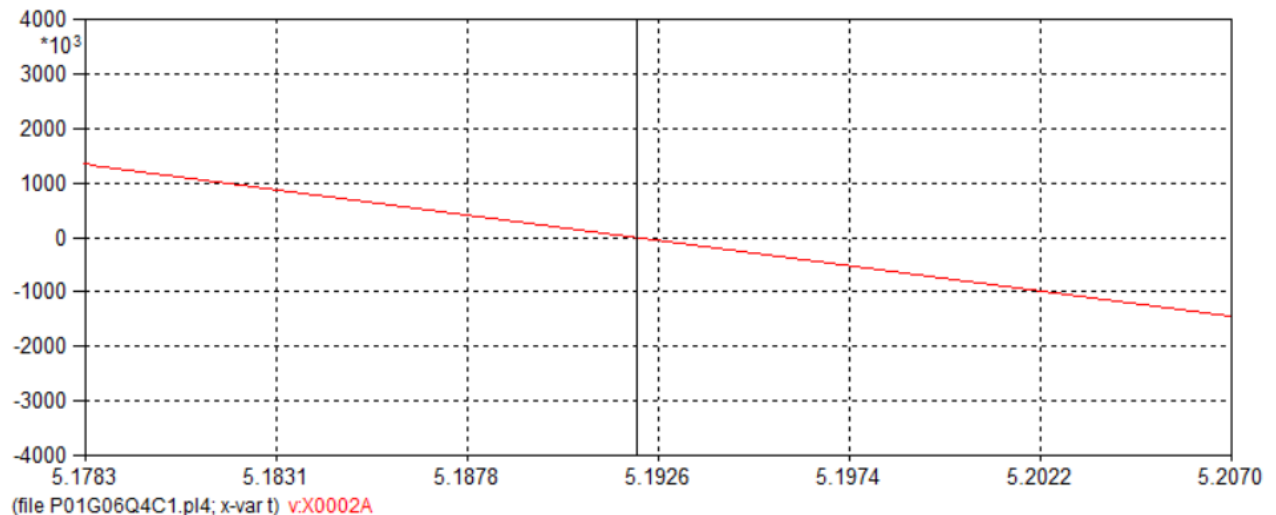


Εικόνα 4.4: Διάταξη με κεραυνικό πλήγμα στη φάση a

Βέλτιστη Περίπτωση - Ελάχιστη Τάση

Στη βέλτιστη περίπτωση το μέτωπο του κεραυνού βρίσκει το φορτίο όταν αυτό είναι υπό ελάχιστη τάση.

Από το διάγραμμα της πρώτης προσομοίωσης βρίσκουμε το χρόνο που έχουμε ελάχιστη τάση στη φάση α.



Εικόνα 4.5: Χρόνος ελάχιστης τάσης στο φορτίο

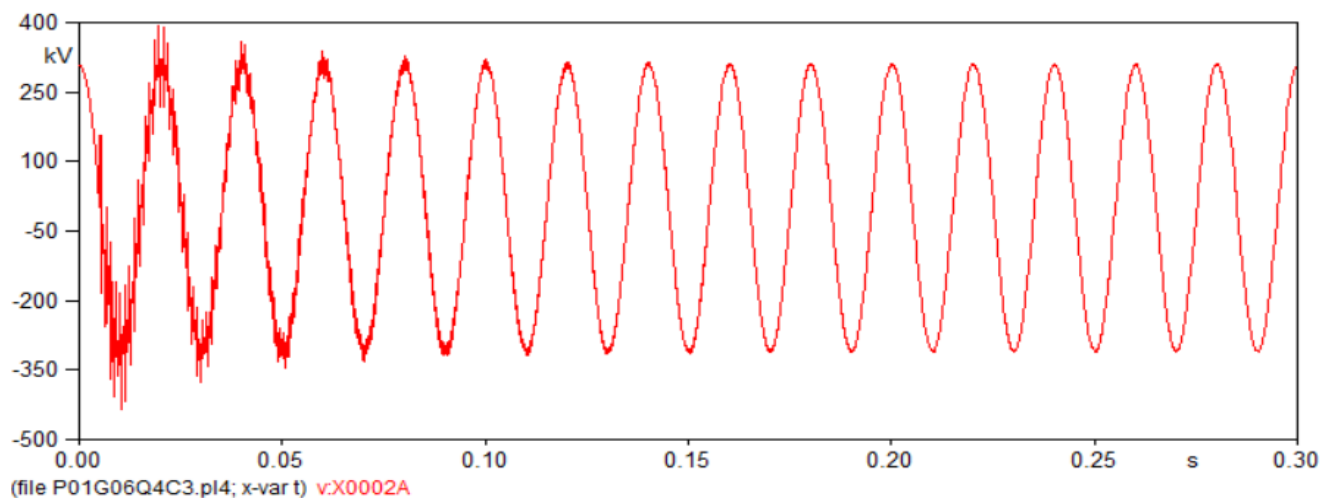
Οπότε προκύπτει $t_{\min} = 5.192 \cdot 10^{-3} \text{ s} + k \cdot (1/f)$, όπου f η συχνότητα

Τελικά το T_{start} του κεραυνού στην βέλτιστη περίπτωση υπολογίζεται:

$$T_{\text{start}} = t_{\min} - (t_{\text{travel}} + t_{\text{μετώπου}}) + k \cdot 0.02 = 0.00475 \text{ s}$$

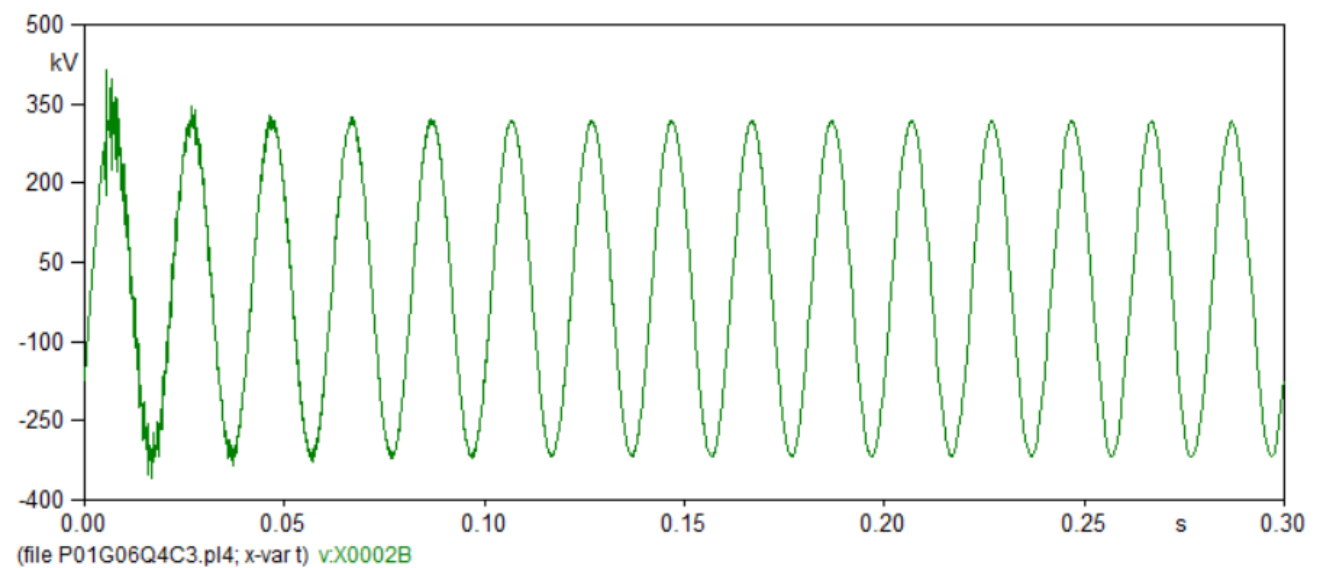
Για $k=0$ παίρνουμε τον πρώτο μηδενισμό της τάσης και με $T_{\text{start}}=0.00475 \text{ s}$ για το πλήγμα έχουμε τις ακόλουθες κυματομορφές:

Φάση α



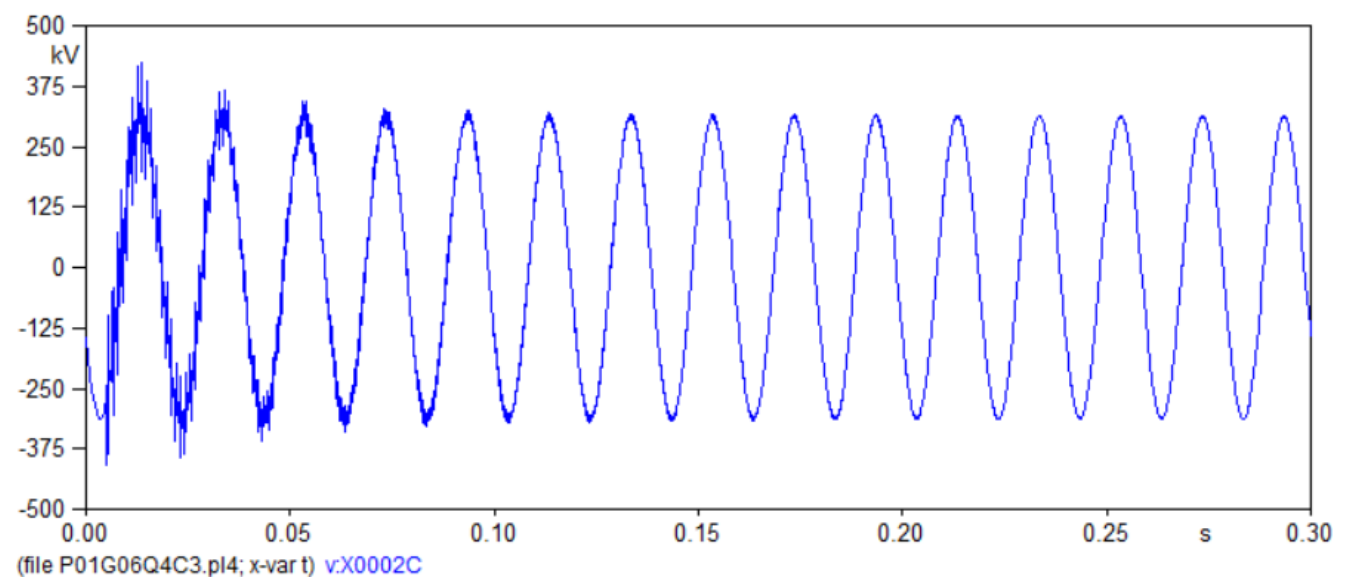
Εικόνα 4.6: Επίδραση κεραυνικού πλήγματος στη φάση a

Φάση b



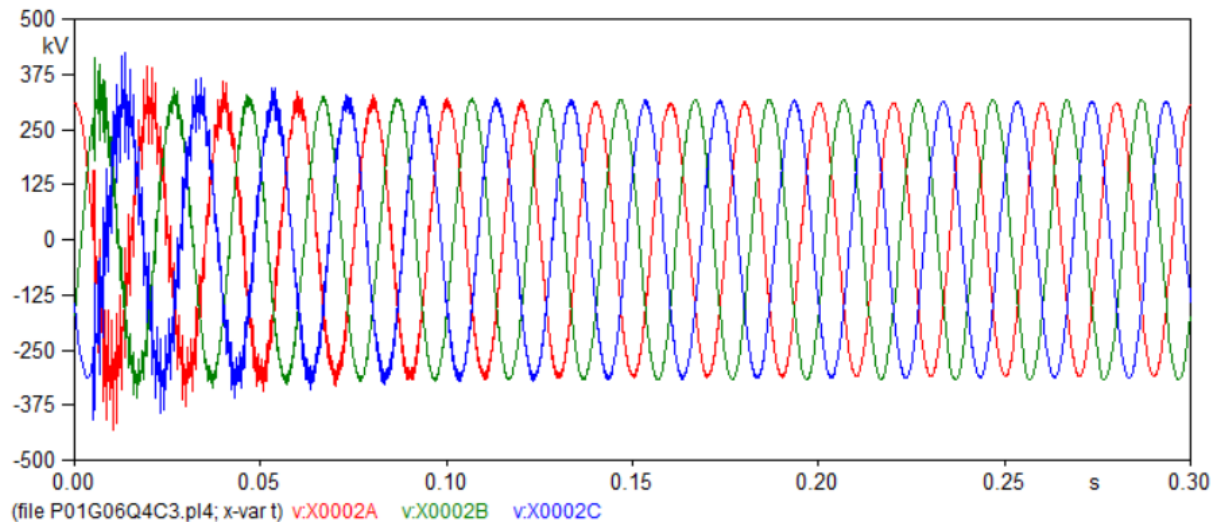
Εικόνα 4.7: Επίδραση κεραυνικού πλήγματος στη φάση b

Φάση c



Εικόνα 4.8: Επίδραση κεραυνικού πλήγματος στη φάση c

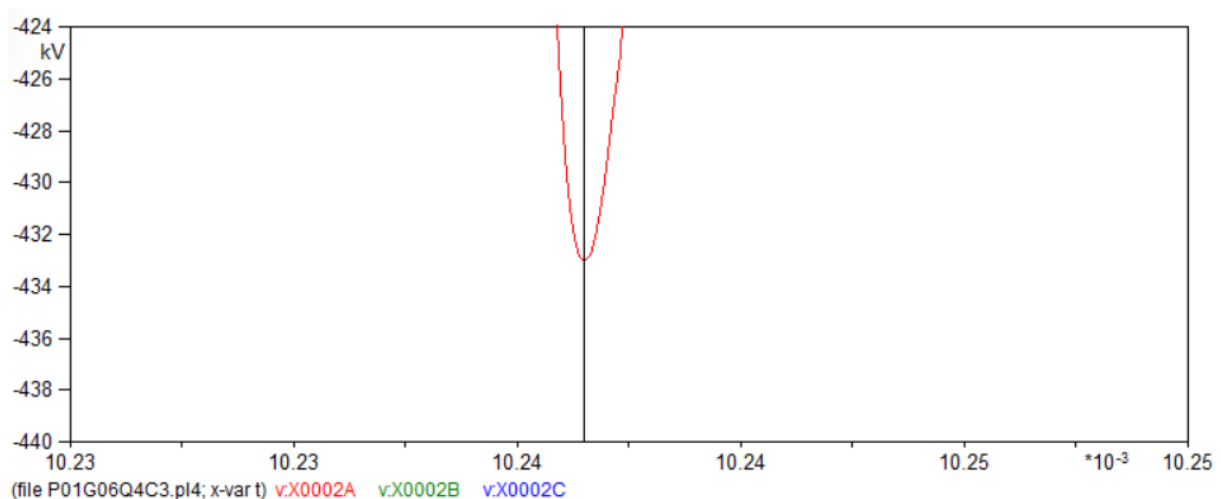
Και τέλος το συγκριτικό διάγραμμα των τριών φάσεων:



Εικόνα 4.9: Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων των τριών φάσεων

Από τις παραπάνω κυματομορφές βρίσκουμε πως στη βέλτιστη περίπτωση που το φορτίο δέχεται το κεραυνικό πλήγμα όταν βρίσκεται υπό ελάχιστη τάση, τότε έχουμε τη μικρότερη μέγιστη στιγμιαία τάση που μπορεί να αναπτυχθεί στο φορτίο και εντοπίζεται στη φάση α και είναι ίση με:

$$V_{\text{peak,surge}} = -433\text{kV}$$



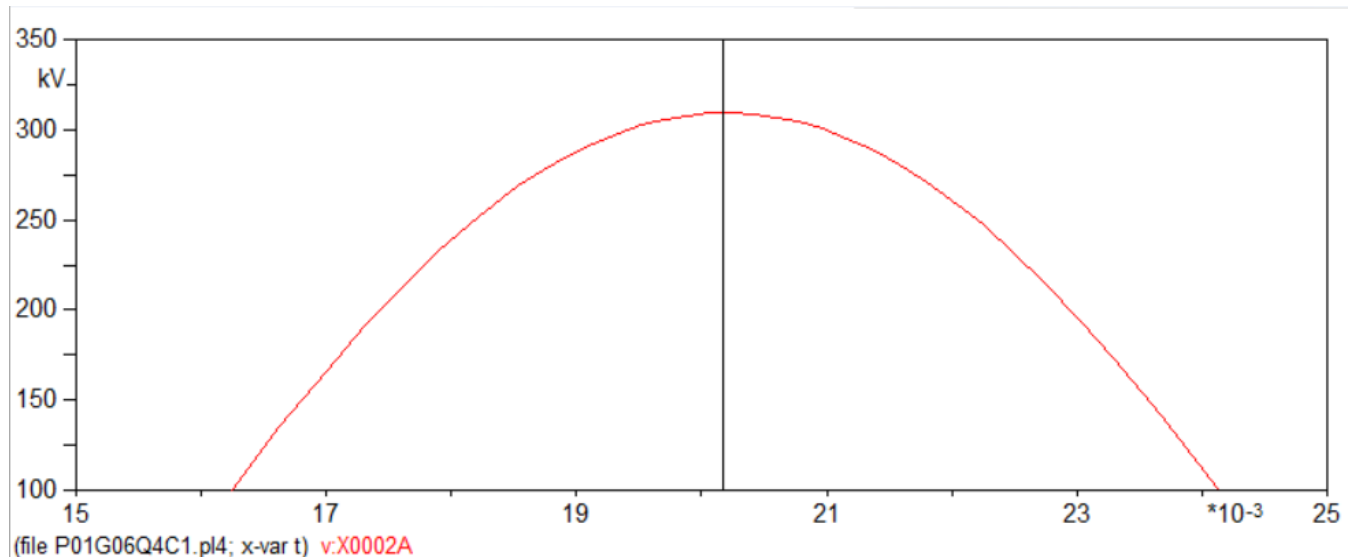
Εικόνα 4.9: Μικρότερη μέγιστη στιγμιαία τάση στο φορτίο λόγω κεραυνικού πλήγματος

Χείριστη Περίπτωση - Μέγιστη Τάση

Στη χείριστη περίπτωση το μέτωπο του κεραυνού βρίσκει το φορτίο όταν αυτό είναι υπό μέγιστη τάση.

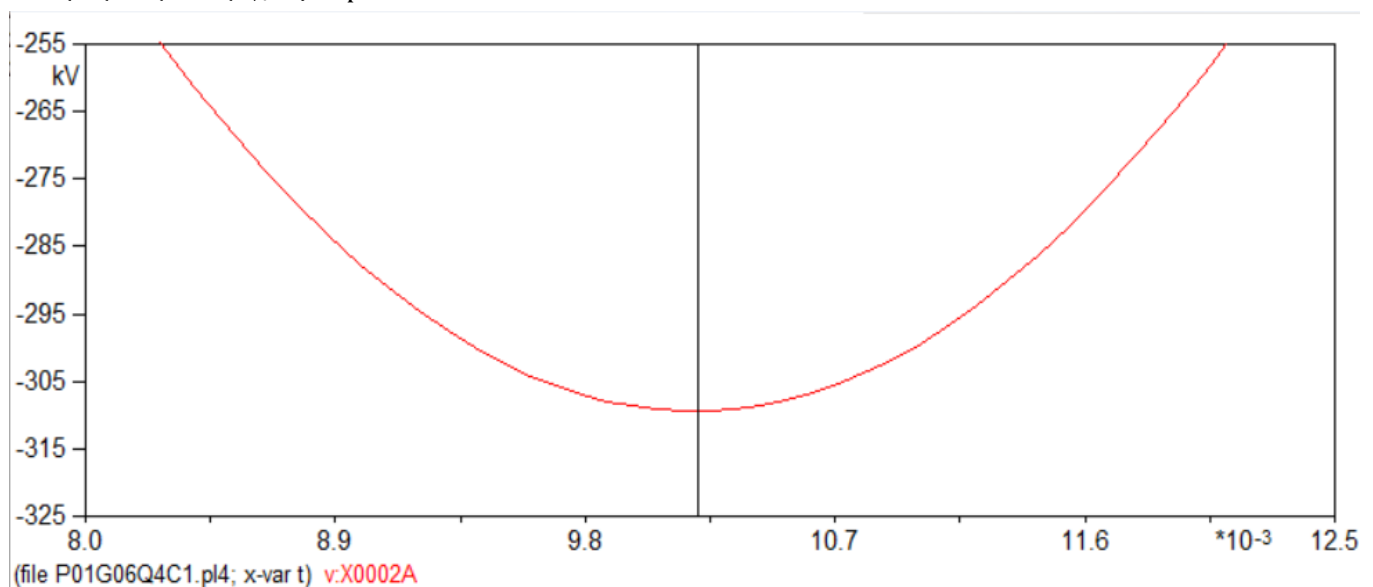
Από το διάγραμμα της πρώτης προσομοίωσης βρίσκουμε το χρόνο που έχουμε μέγιστη τάση στη φάση α.

Για θετική τάση έχουμε $t_{\text{peak}} = 0.202 \cdot 10^{-3} \text{ s} + k \cdot (1/f)$



Εικόνα 4.10: Χρόνος μέγιστης θετικής τάσης στο φορτίο

Για αρνητική τάση έχουμε $t_{\text{peak}} = 10.202 \cdot 10^{-3} \text{ s} + k \cdot (1/f)$



Εικόνα 4.11: Χρόνος μέγιστης αρνητικής τάσης στο φορτίο

Τελικά το T_{start} του κεραυνού στην χειρίστη περίπτωση για θετική και αρνητική τάση υπολογίζεται:

$$\text{Θετική} \rightarrow T_{\text{start}} = t_{\text{peak}} - (t_{\text{travel}} + t_{\text{μετώπου}})$$

$$\text{Αρνητική} \rightarrow T_{\text{start}} = t_{\text{peak}} - (t_{\text{travel}} + t_{\text{μετώπου}})$$

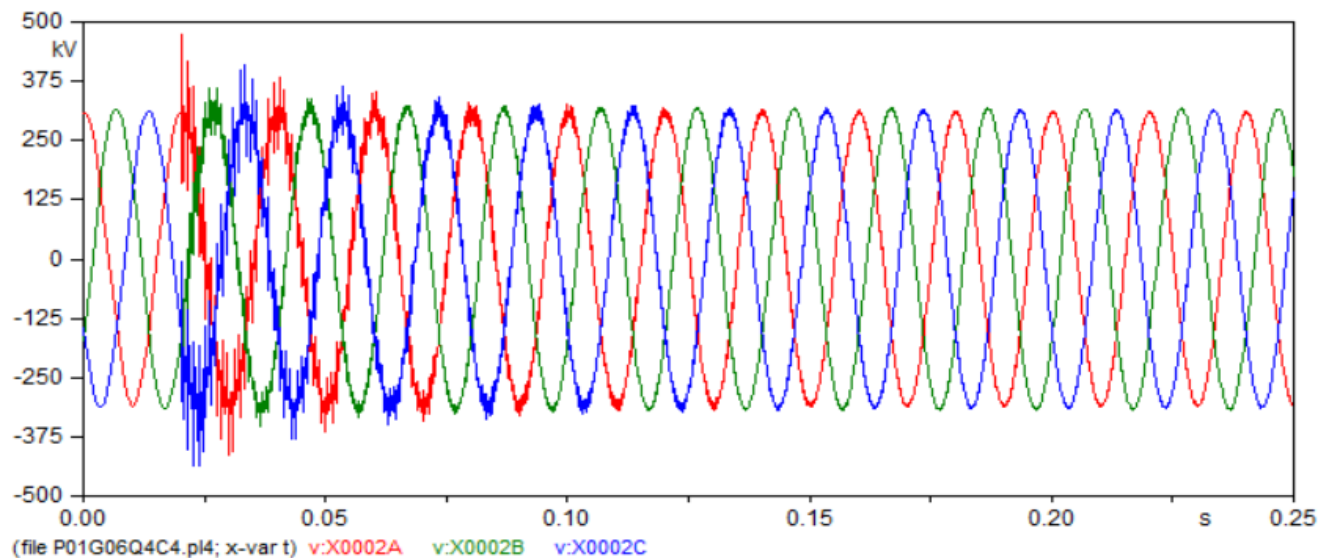
Αρα, για $k=1$ στην θετική και $k=0$ στην αρνητική τάση έχουμε:

$$\text{Θετική} \rightarrow T_{\text{start}} = \mathbf{0.01976s \text{ και}}$$

$$\text{Αρνητική} \rightarrow T_{\text{start}} = \mathbf{0.00976s}$$

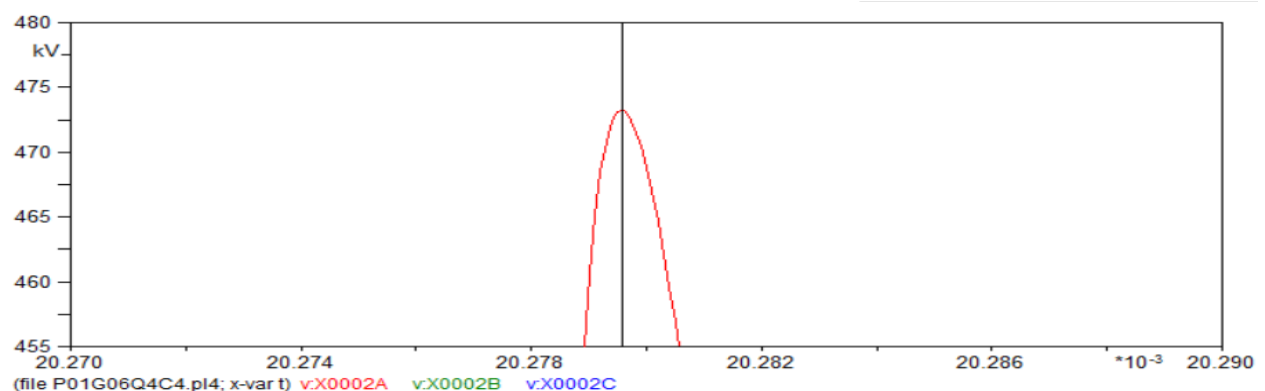
Επομένως προκύπτουν τα ακόλουθα συγκριτικά διαγράμματα τάσεων:

Όταν ο κεραυνός βρίσκει το φορτίο όταν αυτό είναι υπό **θετικό peak τάσης**:



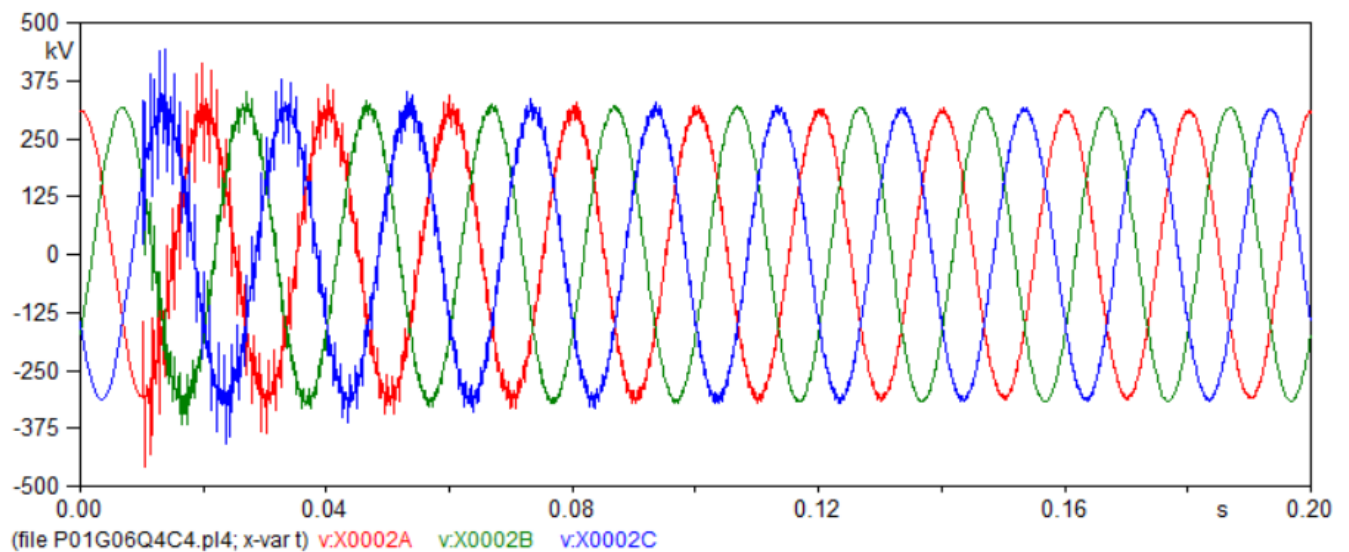
Εικόνα 4.12: Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων των τριών φάσεων για πλήγμα τη στιγμή θετικού peak

Όπου προκύπτει $V_{\text{peak,surge}} = \mathbf{473.2 \text{ kV}}$



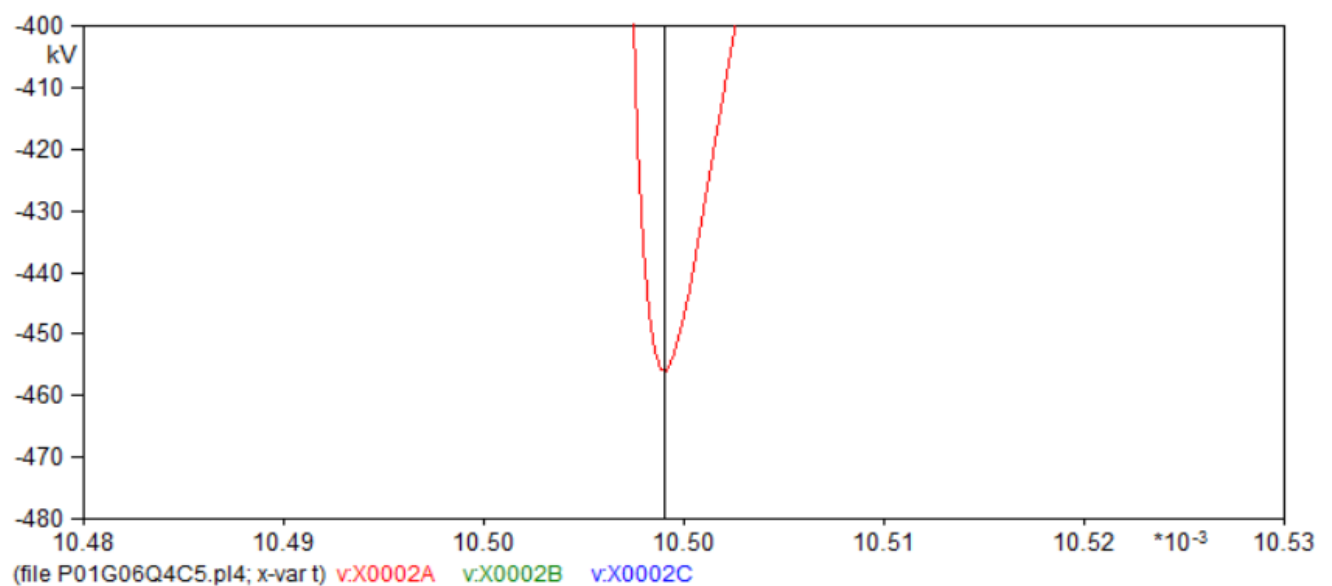
Εικόνα 4.13: Μέγιστη τάση στο φορτίο λόγω κεραυνού σε θετικό peak τάσης

Όταν ο κεραυνός βρίσκει το φορτίο όταν αυτό είναι υπό **αρνητικό peak τάσης**:



Εικόνα 4.14: Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων των τριών φάσεων για πλήγμα τη στιγμή αρνητικού peak

Όπου προκύπτει $V_{\text{peak,surge}} = -456.1 \text{ kV}$



Εικόνα 4.15: Μέγιστη τάση στο φορτίο λόγω κεραυνού σε αρνητικό peak τάσης

Άρα τελικά, στη χειρίστη περίπτωση που το φορτίο δέχεται το κεραυνικό πλήγμα τη χρονική στιγμή που βρίσκεται υπό μέγιστη τάση, είτε θετική είτε αρνητική, τότε η **μεγαλύτερη μέγιστη στιγμιαία τάση** λόγω του πλήγματος που μπορεί να αναπτυχθεί στο φορτίο είναι:

$$V_{\text{peak,surge}} = 473.2 \text{ kV}$$

Παρατηρήσεις

Έχουμε τελικά ως μικρότερη και μεγαλύτερη στιγμιαία τάση στο φορτίο λόγω του κεραυνικού πλήγματος $V_{\text{surge,min}} = |433\text{kV}|$ και $V_{\text{surge,max}} = |473.2\text{kV}|$ αντίστοιχα.

Όπως ήταν αναμενόμενο η υπέρταση στη φάση a που δέχεται το πλήγμα είναι μεγαλύτερη από τις υπερτάσεις στις άλλες δύο φάσεις. Επομένως, σε περίπτωση ενός κεραυνικού πλήγματος σε κάποια φάση του φορτίου, επηρεάζονται και οι τρεις φάσεις, ωστόσο μεγαλύτερη επίδραση δέχεται η φάση που δέχθηκε το πλήγμα, στην οποία και εμφανίζονται ιδιαίτερα υψηλές κρουστικές τάσεις.

Ο κεραυνός είναι ένα φυσικό φαινόμενο ατμοσφαιρικής προέλευσης που προκύπτει από την ηλεκτρική εκκένωση μεταξύ νέφους και γης. Όταν θέλουμε να προσομοιώσουμε το πλήγμα ενός κεραυνού, το κάνουμε με τη χρήση πηγών ρεύματος. Αυτό γίνεται για τους εξής λόγους:

1. Ο κεραυνός είναι ένα παροδικό γεγονός που συμβαίνει κατά τη διάρκεια πολύ μικρού χρονικού διαστήματος. Σε αυτό το διάστημα έχουμε απότομη μείωση φορτίου του νέφους και αύξηση του φορτίου της γης. Η αποτύπωση του, λοιπόν, ως πηγή ρεύματος αποτυπώνει τη χρονομεταβαλλόμενη φύση αυτής της εκκένωσης
2. Ο κεραυνός δεν αποτελεί μία άκαμπτη πηγή τάσης (άπειρος ζυγός), καθώς έχουμε κατάρρευση της τάσης του
3. Η μοντελοποίηση του κεραυνού ως πηγή ρεύματος επιτρέπει την εκτίμηση της αντίδρασης του συστήματος στο παροδικό ρεύμα, βοηθώντας έτσι στον σχεδιασμό αποτελεσματικών μέσων προστασίας

Ερώτημα 5

Ποια είναι η ιδανική συχνότητα υπολογισμού των ανα μονάδα μήκους παραμέτρων στις 2 γραμμές μεταφοράς; Ποιοι είναι οι κυριότεροι παράγοντες που την επηρεάζουν;

Απάντηση: Ο υπολογισμός των παραμέτρων κάθε γραμμής μεταφοράς πρέπει να γίνεται σε μία βέλτιστη συχνότητα. Αυτή η ιδανική συχνότητα δίνεται από τον τύπο:

$$f = \frac{c}{4 \cdot l}$$

όπου, $\rightarrow c$ είναι η ταχύτητα του φωτός

$\rightarrow l$ το μήκος της γραμμής μεταφοράς

Οι παράγοντες που καθορίζουν τον προσδιορισμό αυτής της συχνότητας είναι οι εξής:

- ❖ Το μήκος της γραμμής μεταφοράς
- ❖ Οι χαρακτηριστικές παράμετροι της γραμμής R, L, C
- ❖ Το είδος του μεταβατικού φαινομένου

Στις εναέριες γραμμές μεταφοράς θεωρούμε την ταχύτητα διάδοσης του κύματος ίση με την ταχύτητα του φωτός. Μεγάλη συχνότητα συνεπάγεται μεγάλη ωμική αντίσταση και άρα μεγάλη απόσβεση.

Στην περίπτωση μας, οι ιδανικές συχνότητες των δύο γραμμών προκύπτουν:

- ΓΜ#1 $\rightarrow l_1 = 175 \text{ km}$, άρα **$f_1 = 428.57 \text{ Hz}$**
- ΓΜ#2 $\rightarrow l_2 = 100 \text{ km}$, άρα **$f_2 = 750 \text{ Hz}$**