

UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET U PODGORICI



VUKAN FUŠTIĆ

**ANALIZA SKLOPNIH PRENAPONA I
PRENAPONSKE ZAŠTITE HVDC
SISTEMA RAZLIČITIH
KONFIGURACIJA**

- MASTER RAD -

Podgorica, 2023.

PODACI I INFORMACIJE O STUDENTU

Ime i prezime: Vukan Fušić

Datum i mjesto rođenja: 27.03.1999.g. , Bijelo Polje, Crna Gora

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina završetka studija:
Energetika i automatika, Elektrotehnički fakultet Podgorica, Univerzitet Crne Gore, 2020.

INFORMACIJE O MASTER RADU

Naziv master studija: Elektroenergetski sistemi

Naslov rada: Analiza sklopnih prenapona i prenaponske zaštite HVDC sistema različitih konfiguracija

Fakultet na kojem je rad odbranjen: Elektrotehnički fakultet Podgorica, Univerzitet Crne Gore

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave master rada: 12.07.2022. godine

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: 23.11.2022. godine

Mentor: prof. dr Vladan Radulović

Komisija za ocjenu rada:

1. Prof. dr Saša Mujović, ETF Podgorica
2. Prof. dr Vladan Radulović, ETF Podgorica
3. Prof. dr Zoran Miljanić, ETF Podgorica

Komisija za odbranu rada:

1. Doc. dr Snežana Vujošević, ETF Podgorica
2. Prof. dr Vladan Radulović, ETF Podgorica
3. Prof. dr Zoran Miljanić, ETF Podgorica

Datum odbrane:

Datum promocije:

Ime i prezime autora: Vukan Fuštić, BSc

ETIČKA IZJAVA

U skladu sa članom 22 Zakona o akademskom integritetu i članom 18 Pravila studiranja na master studijama, pod krivičnom i materijalnom odgovornošću, izjavljujem da je master rad pod naslovom

"Analiza sklopnih prenapona i prenaponske zaštite HVDC sistema različitih konfiguracija"

moje originalno djelo.

Podnosilac izjave,



Vukan Fuštić, BSc

U Podgorici, dana 06.09.2023. godine

Predgovor

Konstantan porast potreba za električnom energijom uslovljava prenos sve većih vrijednosti električne snage od izvora do potrošačkih centara. U najvećem broju slučajeva ovaj prenos je neophodno izvršiti na velikim udaljenostima. Kako bi se smanjili gubici, povećala prenosna moć i postigli mnogi drugi benefiti, za ovakav prenos električne energije se sve češće upotrebljavaju sistemi prenosa pri jednosmjernom naponu (HVDC sistemi – High Voltage Direct Current systems).

Pojava prenapona kod HVDC sistema je veoma česta, pri čemu uzrok njihove pojave može dolaziti iz okolnog elektroenergetskog sistema, spoljašnje sredine ili iz samog HVDC sistema. Prenaponi kod HVDC sistema su najčešće praćeni brojnim negativnim efektima koji se ogledaju u narušavanju i/ili ozbiljnom ugrožavanju eksploatacije ovih sistema. Sa povećavanjem broja i vremena trajanja kvarova izazvanih prenaponima značajno se narušava pouzdanost rada HVDC sistema i njihova raspoloživost. Kako bi se spriječili navedeni negativni efekti, u HVDC sistemima je neophodna ugradnja adekvatne prenaponske zaštite.

U ovom radu su prikazana istraživanja koja se odnose na analizu prenapona u HVDC sistemima koji se pojavljuju u slučaju konkretno razmatranih poremećaja u sistemu. Analiza prenapona je izvršena sa aspekta ugrožavanja izolacije u sistemu i to za dvije najčešće upotrebljavane konfiguracije HVDC sistema u praksi. Za najkritičnije slučajeve dobijene iz prethodno navedene analize izvršena je koordinacija izolacije i to sa aspekta optimizacije mjesta ugradnje i broja ugrađenih odvodnika prenapona. Rezultati dobijeni u ovom radu mogu pronaći praktičnu primjenu u oblasti optimizacije prenaponske zaštite kod HVDC sistema.

Svom mentoru, Prof. dr Vladanu Raduloviću se posebno zahvaljujem na predloženoj temi master rada, uloženom trudu i pomoći pri izradi rada.

Izvod rada

Prenaponi predstavljaju jedan od najčešćih uzroka nastanka kvarova u elektroenergetskom sistemu. Naime, sposobnost izolacije opreme da podnese prenapone se karakteriše odgovarajućim vrijednostima podnosivih napona. Međutim, u slučaju kada dođe do pojave prenapona čije vrijednosti su iznad podnosivih napona izolacije, dolazi do narušavanja izolacije a posljedično i do kvara u elektroenergetskom sistemu. Sa povećavanjem broja i vremena trajanja kvarova u elektroenergetskom sistemu dolazi do značajnog narušavanja pouzdanosti napajanja konzuma, za šta u posljednje vrijeme postoje sve rigorozniji kriterijumi.

U cilju sprečavanja pojave kvarova, koji mogu proizvesti ozbiljne posljedice po opremu, neophodno je preduzeti odgovarajuće zaštitne mjere. Zaštitna sredstva koja se najčešće koriste za zaštitu izolacije od prenapona su odvodnici prenapona.

Cilj istraživanja u ovom radu je analiza prenaponske zaštite kod različitih konfiguracija sistema prenosa električne energije pri jednosmjernom naponu (HVDC sistemi – High Voltage Direct Current systems). Naime, ovo istraživanje se odnosi na analizu prenapona kod HVDC sistema u slučaju pojave određenih poremećaja u sistemu. Analiza prenapona se bazira na simulacijama sprovedenim u grafičkom programskom okruženju Simulink-u, u kojem su formirani odgovarajući modeli HVDC sistema. U ovoj analizi je utvrđen uticaj dva parametra, dužine HVDC sistema i snage koja se prenosi HVDC sistemom, na vrijednosti prenapona. Analiza prenapona je sprovedena za dvije najčešće upotrebljavane konfiguracije HVDC sistema, monopolarnu i bipolarnu konfiguraciju. Simulacije sprovedene u Simulink-u su pokazale da jedino prolazni trofazni kratki spoj u sistemu naizmjeničnog (AC – Alternating Current) napona na strani ispravljača dovodi do prenapona čije vrijednosti ugrožavaju izolaciju. Ovaj zaključak važi za obje konfiguracije HVDC sistema razmatrane u ovom radu.

Za najkritičnije kombinacije dužine i snage HVDC sistema, pri kojima se tokom prolaznog trofaznog kratkog spoja u sistemu AC napona na strani ispravljača javljaju maksimalne vrijednosti prenapona, izvršena je koordinacija izolacije. Koordinacija izolacije je izvršena u pravcu optimizacije mjesta i broja odvodnika prenapona koje je neophodno instalirati u sistemu. Rezultati ove analize su pokazali da za najkritičnije slučajeve nije neophodno instalirati odvodnike prenapona na svim lokacijama gdje je to predviđeno, već samo na pojedinim. Prilikom odabira odgovarajućeg odvodnika prenapona mora se voditi računa o energetske napreznjima tokom proticanja struje odvođenja kroz njih.

Praktična primjena dobijenih rezultata se ogleda u smanjenju troškova koji se odnose na odvodnike prenapona, a čija instalacija je neophodna kako bi se zaštitila izolacija opreme tokom poremećaja u sistemu. Pored toga, primjena rezultata u ovom radu se ogleda u saznanju da je za potrebe koordinacije izolacije potrebno analizirati poremećaje u konkretnom HVDC sistemu sa definisanom dužinom i snagom kroz sistem.

Ključne riječi: izolacija, prenaponi, odvodnici prenapona, konfiguracije HVDC sistema, optimalan odabir

Abstract

Surges are one of most common causes of failures in the power system. Namely, ability of installed insulation to withstand overvoltages is defined with appropriate values of withstand voltages. However, if value of overvoltage is higher than value of withstand voltage of insulation, the occurrence of permanent destruction of insulation, which consequently leads to failures. With an increase in number and time duration of failures in power system, there is significantly degradation of reliability of consumer power supply, for what lately there are increasingly rigorous criteria.

In order to prevent occurrence of failures, which can cause serious consequences for installed equipment, it is necessary to apply appropriate protective measures. Protective means which are most commonly in use to protect insulation from overvoltages are surge arresters.

The aim of research in this paper is to analyze overvoltage protection in different high voltage direct current transmission system (HVDC system) configurations. Namely, this research refers to analysis of overvoltages in HVDC systems in the case of occurrence specific disorders in power system. Analysis of overvoltages is based on simulations which are conducted in a block diagram environment Simulink, in which are created appropriate models of HVDC systems. In this analysis are determined influence of two parameters, length and power through the HVDC system, on values of overvoltages. Analysis of overvoltages is conducted for two most commonly used configurations of HVDC systems, monopolar and bipolar configuration. Simulations conducted in Simulink have shown that only temporary three-phase short circuit in alternating current (AC) system on rectifier side cause overvoltages which values endanger installed insulation. This conclusion is valid for both HVDC configurations considered in this paper.

For most critical combinations of length and power of HVDC system, at which during temporary three-phase short circuit in AC system on rectifier side occurs maximum values of overvoltages, insulation coordination is conducted. Insulation coordination is conducted in a way of optimization of locations and number of surge arresters which are necessary to install in system. Results of that analysis have shown that for these most critical cases it is not necessary to install surge arresters in every location where it is provided, but only at several. When choosing appropriate surge arrester, it must be taken care about energy stresses during the passage of discharge current through it.

The practical application of the obtained results is reflected in reduction of costs related to surge arresters which are necessary to be installed in order to protect equipment insulation during disturbances in system. Also, application of the results in this paper is reflected in knowledge that for needs of insulation coordination it is necessary analyze disturbances in specifically HVDC system with defined length and power through it.

Key words: insulation, overvoltages, surge arresters, HVDC configuration, optimal choice

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Sistemi prenosa energije pri jednosmjernom naponu	4
2.1 Sastavni djelovi HVDC sistema.....	4
2.1.1 Konvertor	5
2.1.2 Upravljanje konvertorom	8
2.1.3 Konvertorski transformator.....	10
2.1.4 Prigušnica.....	11
2.1.5 AC filtri.....	11
2.1.6 DC filtri.....	12
2.2 Konfiguracije HVDC sistema	12
2.2.1 Monopolarna konfiguracija.....	12
2.2.2 Bipolarna konfiguracija	13
2.3 Usporedna analiza HVAC i HVDC sistema.....	14
3. Prenaponi kod HVDC sistema.....	16
3.1 Prenaponi u elektroenergetskim sistemima	16
3.2 Prenaponi u HVDC sistemima.....	20
3.2.1 Privremeni prenaponi u HVDC sistemima	22
3.2.1.1 Privremeni prenaponi na AC strani konvertorskih stanica	22
3.2.1.2 Privremeni prenaponi na DC strani konvertorskih stanica	23
3.2.2 Prelazni prenaponi u HVDC sistemima.....	23
4. Metodologija za odabir odgovarajuće prenaponske zaštite	27
4.1 Zaštitna iskrišta	27
4.2 Odvodnici prenapona	27
4.2.1 Silicijum-karbidni odvodnici prenapona.....	28
4.2.2 Cink-oksidni (metal-oksidni) odvodnici prenapona	30
5. Softverski alat Simulink.....	37
5.1 Modelovanje HVDC sistema u Simulink-u	37
5.1.1 Model elektroenergetskog sistema.....	38
5.1.2 Model konvertorske stanice	39
5.1.3 Model DC voda.....	41
5.1.4 Model filtera i baterija kondenzatora.....	42
5.1.5 Model upravljanja konvertorima.....	43
5.2 Prateće „script” datoteke.....	47
6. Analiza prenaponske zaštite HVDC sistema različitih konfiguracija.....	50

6.1 Analiza prenapona kod različitih konfiguracija HVDC sistema za različite tipove poremećaja u sistemu	50
6.1.1 Analiza prenapona kod monopolarne konfiguracije	51
6.1.2 Analiza prenapona kod bipolarne konfiguracije	64
6.2 Koordinacija izolacije za najkritičnije slučajeve	86
6.2.1 Koordinacija izolacije kod monopolarne konfiguracije.....	86
6.2.2 Koordinacija izolacije kod bipolarne konfiguracije.....	99
7. Zaključna razmatranja.....	131
8. Literatura.....	133

Sadržaj slika

Slika 1. Principijelna šema HVDC sistema	4
Slika 2. Principijelna šema konvertorske stanice.....	5
Slika 3. Tiristorski 6-pulsni konvertor	5
Slika 4. Talasni oblici napona i struja 6-pulsnog konvertora.....	6
Slika 5. LCC – tiristorski 12-pulsni konvertor.....	7
Slika 6. Talasni oblici napona na priključcima 12-pulsnog konvertora, za $\alpha = 30^\circ$ (a) i $\alpha = 120^\circ$ (b)	7
Slika 7. Sistem upravljanja bipolarnim HVDC sistemom	8
Slika 8. Strujno-naponska karakteristika ispravljača i invertora	9
Slika 9. Monopolarna konfiguracija sa povratnim putem kroz zemlju (ili vodu).....	13
Slika 10. Monopolarna konfiguracija sa metalnim povratnim provodnikom	13
Slika 11. Bipolarna konfiguracija sa povratnim putem kroz zemlju (ili vodu)	14
Slika 12. Bipolarna konfiguracija sa metalnim povratnim provodnikom.....	14
Slika 13. Zavisnost ukupnih troškova izgradnje HVDC i HVAC sistema od dužine na kojoj je neophodno izvršiti prenos električne energije	15
Slika 14. Standardni 10/350 μ s talasni oblik struje	18
Slika 15. Šeme priključenja odvodnika prenapona u konvertorskoj stanici, na AC strani (a) i DC strani (b)	21
Slika 16. Jednofazni kratki spoj između konvertorskog transformatora i 6-pulsnog tiristorskog mosta koji se nalazi na višem potencijalu. Kratki spoj se ima na fazi R u ispravljačkoj konvertorskoj stanici.....	24
Slika 17. Tanjirasto iskrište.....	28
Slika 18. Vremenski dijagram napona i struja silicijum-karbidnog odvodnika prenapona pri nailasku atmosferskog prenapona.	29
Slika 19. Konstrukcija SiC odvodnika prenapona sa iskrištem sa magnetskim oduvavanjem luka	30
Slika 20. Poprečni presjek ZnO odvodnika prenapona.....	31
Slika 21. Volt-amperska karakteristika ZnO odvodnika prenapona.....	31
Slika 22. Volt-amperske karakteristike ZnO i SiC odvodnika prenapona.....	32
Slika 23. Termička ravnoteža cink-oksidnih odvodnika prenapona.....	33
Slika 24. Toplotna inercija cink-oksidnih odvodnika prenapona	34

Slika 25. Model monopolarnog HVDC sistema u Simulink-u	38
Slika 26. SubSistem „ISPRAVLJAČKA KONVERTORSKA STANICA”	39
Slika 27. SubSystem „KONVERTOR” u ispravljačkoj konvertorskoj stanici.....	40
Slika 28. SubSystem „INVERTORSKA KONVERTORSKA STANICA”	41
Slika 29. SubSystem „KONVERTOR” u invertorskoj konvertorskoj stanici.....	41
Slika 30. SubSystem „AC filter i baterije kondenzatora”.....	42
Slika 31. SubSystem „Glavna Kontrola”.....	43
Slika 32. Strujno-naponska karakteristika konvertora	44
Slika 33. SubSystem „Upravljanje ispravljačem”	45
Slika 34. Strujno-naponska karakteristika VDCOL kontrolera	46
Slika 35. Subsystem „Upravljanje inverterom”.....	47
Slika 36. Model sistema u Simulink-u formiran za potrebe analize prenapona u slučaju prolaznog kratkog spoja na kraju DC voda na strani ispravljača.....	52
Slika 37. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog kratkog spoja na kraju DC voda na strani ispravljača i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B) , c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4 (Faza A), g) mjernom mjestu 4 (Faza B), h) mjernom mjestu 4 (Faza C)	53
Slika 38. Model sistema u Simulink-u formiran za potrebe analize prenapona u slučaju prolaznog kratkog spoja na sredini DC voda.....	54
Slika 39. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog kratkog spoja na sredini DC voda i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B) , c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4 (Faza A), g) mjernom mjestu 4 (Faza B), h) mjernom mjestu 4 (Faza C).....	55
Slika 40. Model sistema u Simulink-u formiran za potrebe analize prenapona u slučaju prolaznog kratkog spoja na kraju DC voda na strani invertora	56
Slika 41. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog kratkog spoja na kraju DC voda na strani invertora i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B) , c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4 (Faza A), g) mjernom mjestu 4 (Faza B), h) mjernom mjestu 4 (Faza C)	57
Slika 42. Model sistema u Simulink-u formiran za potrebe analize prenapona u slučaju prolaznog jednofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani ispravljača	58
Slika 43. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog jednofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani ispravljača i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B) , c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4 (Faza A), g) mjernom mjestu 4 (Faza B), h) mjernom mjestu 4 (Faza C).....	59

Slika 44. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog trofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani ispravljača i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B) , c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4 (Faza A), g) mjernom mjestu 4 (Faza B), h) mjernom mjestu 4 (Faza C).....	61
Slika 45. Model sistema u Simulink-u formiran za potrebe analize prenapona u slučaju prolaznog jednofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani invertora	61
Slika 46. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog jednofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani invertora i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B) , c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4 (Faza A), g) mjernom mjestu 4 (Faza B), h) mjernom mjestu 4 (Faza C).....	63
Slika 47. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog trofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani invertora i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B) , c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4 (Faza A), g) mjernom mjestu 4 (Faza B), h) mjernom mjestu 4 (Faza C).....	64
Slika 48. Model sistema u Simulink-u formiran za potrebe analize prenapona u slučaju prolaznog kratkog spoja na kraju DC voda (pozitivni pol) na strani ispravljača.....	65
Slika 49. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog kratkog spoja na kraju DC voda (pozitivni pol) na strani ispravljača i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B) , c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4, g) mjernom mjestu 5, h) mjernom mjestu 6 (Faza A), i) mjernom mjestu 6 (Faza B), j) mjernom mjestu 6 (Faza C).....	67
Slika 50. Model sistema u Simulink-u formiran za potrebe analize prenapona u slučaju prolaznog kratkog spoja na sredini DC voda (pozitivni pol).....	67
Slika 51. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog kratkog spoja na sredini DC voda (pozitivni pol) i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B) , c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4, g) mjernom mjestu 5, h) mjernom mjestu 6 (Faza A), i) mjernom mjestu 6 (Faza B), j) mjernom mjestu 6 (Faza C) ...	69
Slika 52. Model sistema u Simulink-u formiran za potrebe analize prenapona u slučaju prolaznog kratkog spoja na kraju DC voda (pozitivni pol) na strani invertora	69
Slika 53. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog kratkog spoja na kraju DC voda (pozitivni pol) na strani invertora i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B) , c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4, g) mjernom mjestu 5, h) mjernom mjestu 6 (Faza A),i) mjernom mjestu 6 (Faza B), j) mjernom mjestu 6 (Faza C).....	71
Slika 54. Model sistema u Simulink-u formiran za potrebe analize prenapona u slučaju prolaznog kratkog spoja na kraju DC voda (negativni pol) na strani ispravljača.....	72

Slika 55. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog kratkog spoja na kraju DC voda (negativni pol) na strani ispravljača i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B) , c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4, g) mjernom mjestu 5, h) mjernom mjestu 6 (Faza A), i) mjernom mjestu 6 (Faza B), j) mjernom mjestu 6 (Faza C).....	73
Slika 56. Model sistema u Simulink-u formiran za potrebe analize prenapona u slučaju prolaznog kratkog spoja na sredini DC voda (negativni pol)	74
Slika 57. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog kratkog spoja na sredini DC voda (negativni pol) i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B) , c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4, g) mjernom mjestu 5, h) mjernom mjestu 6 (Faza A), i) mjernom mjestu 6 (Faza B), j) mjernom mjestu 6 (Faza C) ...	75
Slika 58. Model sistema u Simulink-u formiran za potrebe analize prenapona u slučaju prolaznog kratkog spoja na kraju DC voda (negativni pol) na strani invertora.....	76
Slika 59. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog kratkog spoja na kraju DC voda (negativni pol) na strani invertora i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B) , c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4, g) mjernom mjestu 5, h) mjernom mjestu 6 (Faza A), i) mjernom mjestu 6 (Faza B), j) mjernom mjestu 6 (Faza C).....	77
Slika 60. Model sistema u Simulink-u formiran za potrebe analize prenapona u slučaju prolaznog jednofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani ispravljača (bipolarna konfiguracija)	78
Slika 61. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog jednofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani ispravljača (bipolarna konfiguracija) i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B) , c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4, g) mjernom mjestu 5, h) mjernom mjestu 6 (Faza A), i) mjernom mjestu 6 (Faza B), j) mjernom mjestu 6 (Faza C).....	79
Slika 62. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog trofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani ispravljača (bipolarna konfiguracija) i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B) , c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4, g) mjernom mjestu 5, h) mjernom mjestu 6 (Faza A), i) mjernom mjestu 6 (Faza B), j) mjernom mjestu 6 (Faza C).....	81
Slika 63. Model sistema u Simulink-u formiran za potrebe analize prenapona u slučaju prolaznog jednofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani invertora (bipolarna konfiguracija)	82
Slika 64. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog jednofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani invertora (bipolarna konfiguracija) i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B) , c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4, g) mjernom mjestu 5, h) mjernom mjestu 6 (Faza A), i) mjernom mjestu 6 (Faza B), j) mjernom mjestu 6 (Faza C).....	84

Slika 65. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog trofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani invertora (bipolarna konfiguracija) i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B), c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4, g) mjernom mjestu 5, h) mjernom mjestu 6 (Faza A), i) mjernom mjestu 6 (Faza B), j) mjernom mjestu 6 (Faza C).....	85
Slika 66. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 1 – monopolarna konfiguracija (460 km i 540 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona.....	87
Slika 67. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 2 – monopolarna konfiguracija (460 km i 540 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona.....	87
Slika 68. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 3 – monopolarna konfiguracija (460 km i 540 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona.....	88
Slika 69. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 4 – monopolarna konfiguracija (460 km i 540 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona.....	88
Slika 70. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 1 – monopolarna konfiguracija (460 km i 540 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	89
Slika 71. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 2 – monopolarna konfiguracija (460 km i 540 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	89
Slika 72. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 3 – monopolarna konfiguracija (460 km i 540 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	90
Slika 73. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 4 – monopolarna konfiguracija (460 km i 540 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	90
Slika 74. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza A) – monopolarna konfiguracija (460 km i 540 MW).....	91
Slika 75. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza B) – monopolarna konfiguracija (460 km i 540 MW).....	91
Slika 76. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza C) – monopolarna konfiguracija (460 km i 540 MW).....	92
Slika 77. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 1 – monopolarna konfiguracija (200 km i 540 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona.....	93
Slika 78. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 2 – monopolarna konfiguracija (200 km i 540 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona.....	93
Slika 79. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 3 – monopolarna konfiguracija (200 km i 540 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona.....	94
Slika 80. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 4 – monopolarna konfiguracija (200 km i 540 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona.....	94
Slika 81. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 1 – monopolarna konfiguracija (200 km i 540 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	95

Slika 82. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 2 – monopolarna konfiguracija (200 km i 540 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	95
Slika 83. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 3 – monopolarna konfiguracija (200 km i 540 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	96
Slika 84. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 4 – monopolarna konfiguracija (200 km i 540 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	96
Slika 85. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza A) – monopolarna konfiguracija (200 km i 540 MW)	97
Slika 86. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza B) – monopolarna konfiguracija (200 km i 540 MW)	97
Slika 87. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza C) – monopolarna konfiguracija (200 km i 540 MW)	98
Slika 88. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 2 – monopolarna konfiguracija (200 km i 540 MW)	98
Slika 89. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 1 – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona	99
Slika 90. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 2 – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona	100
Slika 91. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 3 – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona	100
Slika 92. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 4 – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona	101
Slika 93. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 5 – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona	101
Slika 94. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 6 – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona	102
Slika 95. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 1 – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	102
Slika 96. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 2 – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	103
Slika 97. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 3 – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	103
Slika 98. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 4 – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	104
Slika 99. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 5 – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	104
Slika 100. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 6 – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	105

Slika 101. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza A) – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW).....	105
Slika 102. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza B) – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW).....	106
Slika 103. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza C) – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW).....	106
Slika 104. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 1 – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona.....	107
Slika 105. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 2 – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona.....	107
Slika 106. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 3 – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona.....	108
Slika 107. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 4 – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona.....	108
Slika 108. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 5 – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona.....	109
Slika 109. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 6 – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona.....	109
Slika 110. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 1 – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	110
Slika 111. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 2 – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	110
Slika 112. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 3 – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	111
Slika 113. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 4 – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	111
Slika 114. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 5 – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	112
Slika 115. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 6 – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	112
Slika 116. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza A) – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW).....	113
Slika 117. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza B) – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW).....	113
Slika 118. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza C) – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW).....	114
Slika 119. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 2 – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW).....	114

Slika 120. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 1 – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona.....	115
Slika 121. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 2 – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona.....	115
Slika 122. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 3 – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona.....	116
Slika 123. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 4 – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona.....	116
Slika 124. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 5 – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona.....	117
Slika 125. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 6 – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona.....	117
Slika 126. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 1 – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	118
Slika 127. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 2 – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	118
Slika 128. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 3 – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	119
Slika 129. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 4 – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	119
Slika 130. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 5 – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	120
Slika 131. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 6 – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	120
Slika 132. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza A) – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW).....	121
Slika 133. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza B) – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW).....	121
Slika 134. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza C) – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW).....	122
Slika 135. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 1 – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona.....	123
Slika 136. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 2 – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona.....	123
Slika 137. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 3 – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona.....	124
Slika 138. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 4 – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona.....	124

Slika 139. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 5 – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona.....	125
Slika 140. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 6 – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona.....	125
Slika 141. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 1 – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	126
Slika 142. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 2 – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	126
Slika 143. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 3 – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	127
Slika 144. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 4 – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	127
Slika 145. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 5 – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	128
Slika 146. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 6 – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona	128
Slika 147. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza A) – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW).....	129
Slika 148. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza B) – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW).....	129
Slika 149. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza C) – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW).....	130
Slika 150. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 4 – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW).....	130

Sadržaj tabela

Tabela 1. Parametri trofaznih naponskih izvora	38
Tabela 2. Parametri paralelne RL grane	39
Tabela 3. Parametri konvertorskog transformatora	40
Tabela 4. Parametri 6-pulsnog konvertora.....	40
Tabela 5. Parametri voda	42
Tabela 6. Parametri redne RL grane	42

1. Uvod

Kako bi se zadovoljio konstantan rast potreba za električnom energijom, neophodan je prenos sve većih vrijednosti snaga od izvora električne energije (elektrana) do potrošačkih centara. Ovaj prenos električne energije se vrši upotrebom elektroenergetskih vodova pri čemu je osnovni cilj izvršiti taj prenos na najekonomičniji i najpouzdaniji mogući način. Lokacije na kojima se grade elektrane su najčešće veoma udaljene od konzuma pa je iz toga razloga velike količine električne energije potrebno prenositi na velike udaljenosti.

Danas je u elektroenergetskim sistemima dominantno u upotrebi prenos električne energije pri naizmjeničnom naponu. Za prenos velikih snaga koriste se sistemi prenosa električne energije pri naizmjeničnom naponu (HVAC sistemi – High Voltage Alternating Current systems). Sa veoma ubrzanim razvojem sistema naizmjeničnog napona došlo se do određenih ograničenja kada je riječ o prenosu velikih količina električne energije na velike udaljenosti. Najznačajnija ograničenja su: povišeni gubici zbog neizbježnog prenosa reaktivne snage, skin-efekat, problemi sa statičkom i dinamičkom stabilnošću itd [1].

Kada je riječ o prenosu velikih vrijednosti snage na velike udaljenosti, sistemi prenosa električne energije pri jednosmjernom naponu (HVDC sistemi – High Voltage Direct Current systems) imaju mnogo prednosti u odnosu na HVAC sisteme. Glavnu prepreku za širu upotrebu HVDC prenosnih sistema je predstavljala energetska elektronika. Međutim, sa značajnim razvojem energetske elektronike u poslednjim decenijama, omogućena je upotreba i sistema prenosa pri jednosmjernom naponu. Neke od najznačajnijih prednosti upotrebe HVDC prenosnih sistema su: mogućnost povezivanja sistema naizmjeničnog (AC – Alternating Current) napona različitih frekvencija (i na taj način povećanju njihove stabilnosti), mogućnost upravljanja smjerom prenosa energije, ne postojanje prenosa reaktivne snage pa ona ne može ograničavati prenosni kapacitet voda, ne postojanje ogromnih gubitaka zbog kapacitivnosti kabla kod podmorskih kablova itd. S druge strane, kod upotrebe HVDC sistema postoje i određeni nedostaci. Najznačajniji problem predstavlja generisanje viših harmonika struje i napona prilikom rada konvertora. Viši harmonici struje se prenose ka mreži naizmjeničnog napona dok se viši harmonici napona prenose u mrežu jednosmjernog (DC – Direct Current) napona. Generisani viši harmonici značajno narušavaju kvalitet električne energije, izazivaju oštećenja izolacije i smetnje u telekomunikacionoj infrastrukturi. Pored toga, činjenica da se svi proizvodni kapaciteti i većina potrošača zasnivaju na sistemu naizmjeničnog napona daje prirodnu prednost upotrebi sistema prenosa električne energije pri naizmjeničnom naponu.

Tokom normalnog pogona elektroenergetskog sistema različiti njegovi djelovi se nalaze na različitim potencijalima. Kako bi se odvojili djelovi koji su u normalnom pogonu pod naponom od djelova koji su uzemljeni kao i djelovi koji se nalaze na različitim potencijalima koristi se izolacija opreme i provodnika. Osnovni parametar na osnovu kojeg se vrši dimenzionisanje izolacije je najviši napon opreme. Naime, izolacija mora imati sposobnost trajnog funkcionisanja pri najvišem naponu opreme. Međutim, u okviru elektroenergetskog sistema brojni su uzroci pojave vrijednosti napona koje premašuju najviše napone opreme i ovakvi naponi se nazivaju prenaponima. Kada dođe do pojave prenapona dolazi i do naprezanja izolacije koja je postavljena u sistemu pri čemu intenzitet naprezanja zavisi od karakteristika prenapona. Izolacija koja je instalirana u sistemu posjeduje sposobnost da podnese djelovanje prenapona u određenom

vremenskom intervalu. Sposobnost izolacije da podnese prenapone se definiše preko izolacionog nivoa opreme dok se izolacioni nivoi opreme definišu preko podnosivih napona izolacije. Podnosivi napon izolacije predstavlja napon koji neće dovesti do narušavanja karakteristika izolacije, odnosno do njenog oštećenja. U zavisnosti od vremena trajanja i frekvencije napona razlikuje se više tipova podnosivih napona izolacije.

Prenaponi se prema uzroku nastanka mogu podijeliti u dvije grupe: spoljašnji (atmosferski) prenaponi i unutrašnji prenaponi. Uzrok nastanka spoljašnjih ili atmosferskih prenapona je atmosfersko pražnjenje u elemente elektroenergetskog sistema ili njihovu blizinu. Direktno atmosfersko pražnjenje se ima u slučaju ako se atmosfersko pražnjenje odvija u same elemente elektroenergetskog sistema. Sa druge strane, ukoliko se ima udar atmosferskog pražnjenja u zemlju ili susjedne objekte u blizini posmatranog visokonaponskog razvodnog postrojenja u tom slučaju dolazi do pojave indukovanih prenapona na faznim provodnicima voda. Za razliku od atmosferskih prenapona, uzrok nastanka unutrašnjih prenapona su poremećaji unutar samog elektroenergetskog sistema. Prema uzroku unutrašnji prenaponi se mogu podijeliti u dvije grupe: sklopni (komutacioni) prenaponi i privremeni (povremeni) prenaponi. Uzrok nastanka sklopnih prenapona predstavljaju uključanja ili isključenja (sklopne operacije) djelova elektroenergetske mreže. Privremeni prenaponi imaju najduže trajanje od svih ostalih tipova prenapona dok njihova amplituda nije mnogo veća od najvišeg napona mreže. Zbog svojih karakteristika, privremeni prenaponi predstavljaju najveću opasnost po funkcionisanje određenih elemenata u elektroenergetskom sistemu kao što su odvodnici prenapona i mjerni transformatori.

Kako bi se spriječila oštećenja izolacije i eventualni dalji kvarovi usljed pojave prenapona, neophodno je izvršiti koordinaciju izolacije. Koordinacija izolacije predstavlja složen zadatak usklađivanja broja, mjesta ugradnje i karakteristika odvodnika prenapona i drugih zaštitnih uređaja sa izolacionim nivoom električne opreme. Procedure za koordinaciju izolacije u različitim djelovima elektroenergetskog sistema su definisane u različitim standardima. Tako su standardom IEC 60071-1 definisane procedure i pravila za koordinaciju izolacije u trofaznim mrežama naizmjeničnog napona u kojima najviši napon opreme prelazi vrijednost od 1 kV. Takođe, u standardu IEC 60071-5 su definisane procedure koordinacije izolacije unutar konvertorskih stanica HVDC sistema.

Odvodnici prenapona su uređaji čiji je zadatak da ograniče prenapone na vrijednosti koje ogovaraju izolacionom nivou opreme i na taj način spriječe oštećenje izolacije opreme. Odvodnici prenapona se sastoje od nelinearnih otpornika vezanih prema zemlji koji mijenjaju svoju otpornost u zavisnosti od primijenjenog napona. Prilikom nailaska prenaponskog talasa dolazi do smanjenja otpornosti ovih otpornika i kao rezultat toga se dio energije prenapona odvodi ka zemlji. Nakon nestanka prenapona otpornost odvodnika prenapona se vraća na prvobitnu vrijednost i prekida se protok struje prema zemlji. Prema svojoj konstrukciji, odvodnici prenapona koji su danas u upotrebi se mogu svrstati u jednu od sljedeće dvije grupe: silicijum-karbidni (SiC) i cink-oksadni (ZnO) odvodnici prenapona. Cink-oksadni odvodnici prenapona su opisani sa električnim i termičkim karakteristikama. Najvažnija električna karakteristika metal-oksidnih odvodnika prenapona je njihova volt-amperska karakteristika. Takođe, prilikom proticanja struje odvođenja kroz odvodnik prenapona dolazi do razvijanja velike količine toplote pa se iz toga razloga mora voditi računa i o termičkim karakteristikama odvodnika prenapona.

Za potrebe istraživanja u ovom radu će se koristiti softverski alat Simulink. Naime, u okviru ovog softverskog alata će biti formirani modeli HVDC sistema. U okviru formiranih modela će se izvršiti simulacija različitih poremećaja u sistemu pri čemu će se vršiti mjerenja

napona na tačno određenim lokacijama u sistemu. Na prethodno opisani način će se doći do talsnih oblika napona na mjernim mjestima a na osnovu njih je moguće utvrditi koji su to poremećaji u sistemu najkritičniji sa aspekta prenapona na mjernim mjestima. U okviru navedenog postupka pronalaženja najkritičnijih slučajeva biće uzet u obzir i uticaj određenih parametara sistema. Za najkritičnije slučajeve dobijene iz prethodne analize biće izvršena koordinacija izolacije. Koordinacija izolacije će biti izvršena na način da se pronađe optimalno rješenje sa aspekta broja i mjesta ugradnje odvodnika prenapona.

Master rad se sastoji od šest poglavlja. U okviru uvodnog poglavlja prikazan je pregled najvažnijih napomena vezanih za temu obrađenu u radu. Drugo poglavlje se odnosi na sisteme prenosa električne energije pri jednosmjernom naponu gdje će biti riječi o njegovim sastavnim djelovima i njihovom principu rada, konfiguracijama HVDC sistema koje su najčešće u upotrebi kao i prednostima i nedostacima HVDC sistema u odnosu na HVAC sisteme. U trećem poglavlju će biti detaljno objašnjena podjela prenapona sa aspekta uzroka nastanka kako u elektroenergetskim sistemima tako i u HVDC sistemima. U narednom, četvrtom poglavlju će se govoriti o uređajima koji se koriste kao zaštita od prenapona kao i o metodologijama za njihov adekvatan odabir. Peto poglavlje se odnosi na softverski alat Simulink gdje će se objasniti modelovanje HVDC sistema u ovom softverskom alatu i mogućnosti upotrebe ovog softverskog alata za analize procesa u HVDC sistemima. U okviru šestog poglavlja će biti izvršena analiza prenaponske zaštite HVDC sistema različitih konfiguracija. Ovdje će se u prvom dijelu izvršiti analiza prenapona kod različitih konfiguracija HVDC sistema u slučaju različitih tipova poremećaja u sistemu. U drugom dijelu šestog poglavlja će biti izvršena koordinacija izolacije za najkritičnije slučajeve iz prvog dijela. U posljednjem poglavlju će biti ukazano na doprinos naučnog istraživanja u ovom radu, moguće primjene dobijenih rezultata u praksi kao i na moguće pravce daljeg istraživanja iz obrađene oblasti.

2. Sistemi prenosa energije pri jednosmjernom naponu

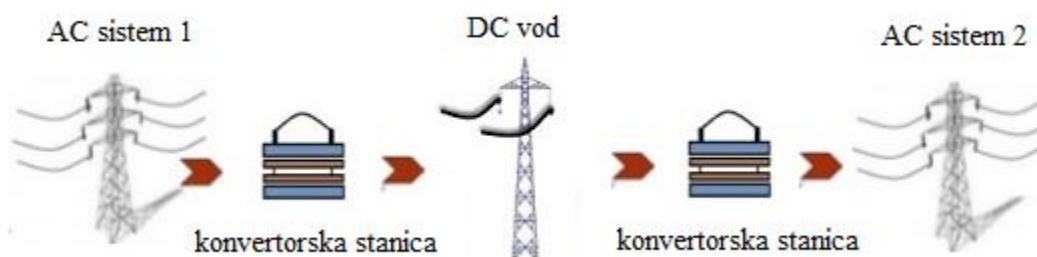
Početak prenosa električne energije se vezuje za upotrebu jednosmjernog napona pri čemu je taj prenos vršen na distancama od nekoliko stotina metara. Prve mreže za prenos električne energije su korišćene za potrebe rasvjete javnih površina i domaćinstava. Međutim, najveći problem ovakvog prenosa električne energije je predstavljala nemogućnost transformacije napona na viši i niži nivo. Iz toga razloga su se javljali povišeni gubici pri prenosu većih opterećenja na veće udaljenosti. Ovaj problem je riješen sa pojavom prenosa električne energije pri naizmjeničnom naponu gdje je moguće vršiti transformaciju naponskog nivoa i ovakav način prenosa električne energije je danas dominantan.

Veoma dinamičan razvoj sistema za prenos električne energije pri naizmjeničnom naponu doveo je do približavanja granicama njegovih mogućnosti gdje su neka od ograničenja: povišeni gubici zbog neizbježnog prenosa reaktivne snage, skin-efekat, problemi sa statičkom i dinamičkom stabilnošću itd [1]. Prema tome, kada je riječ o prenosu velikih opterećenja na velike udaljenosti, zbog svojih prednosti sve češće su u upotrebi HVDC sistemi.

U narednim poglavljima će se detaljnije opisati HVDC sistemi sa aspekta njihovog principa rada, sastavnih djelova i mogućih konfiguracija. Pored toga, izvršiće se i uporedna analiza sistema za prenos električne energije pri naizmjeničnom i jednosmjernom naponu gdje će se predstaviti prednosti i nedostaci ova dva rješenja.

2.1 Sastavni djelovi HVDC sistema

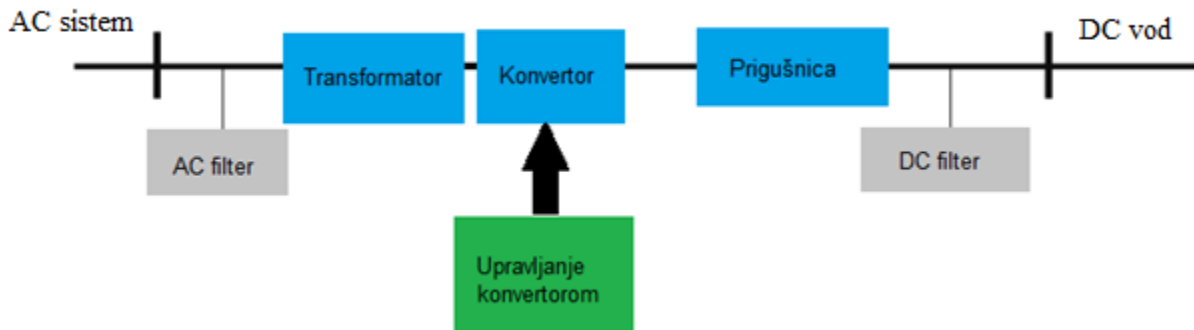
Principijelna šema HVDC sistema je prikazana na slici 1.



Slika 1. Principijelna šema HVDC sistema

Električna energija se sistemom prenosa pri naizmjeničnom naponu prenosi do konvertorske stanice HVDC sistema. Unutar konvertorske stanice se naizmjenični napon pretvara u jednosmjerni a zatim se električna energija kao takva prenosi DC vodom do druge konvertorske stanice. U drugoj konvertorskoj stanici se ponovo vrši konverzija jednosmjernog napona u naizmjenični i električna energija se dalje prenosi kroz sistem naizmjeničnog napona.

Dakle, glavni djelovi HVDC sistema su konvertorske stanice i DC vod. Na slici 2. je prikazana principijelna šema konvertorske stanice. U narednim poglavljima će se opisati pojedini dijelovi konvertorskih stanica.

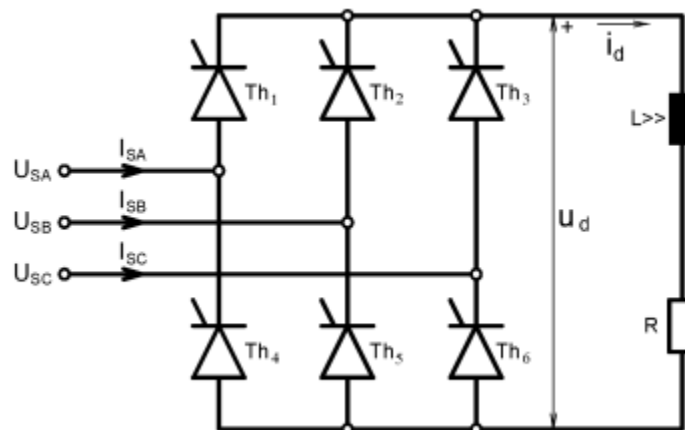


Slika 2. Principijelna šema konvertorske stanice

2.1.1 Konvertor

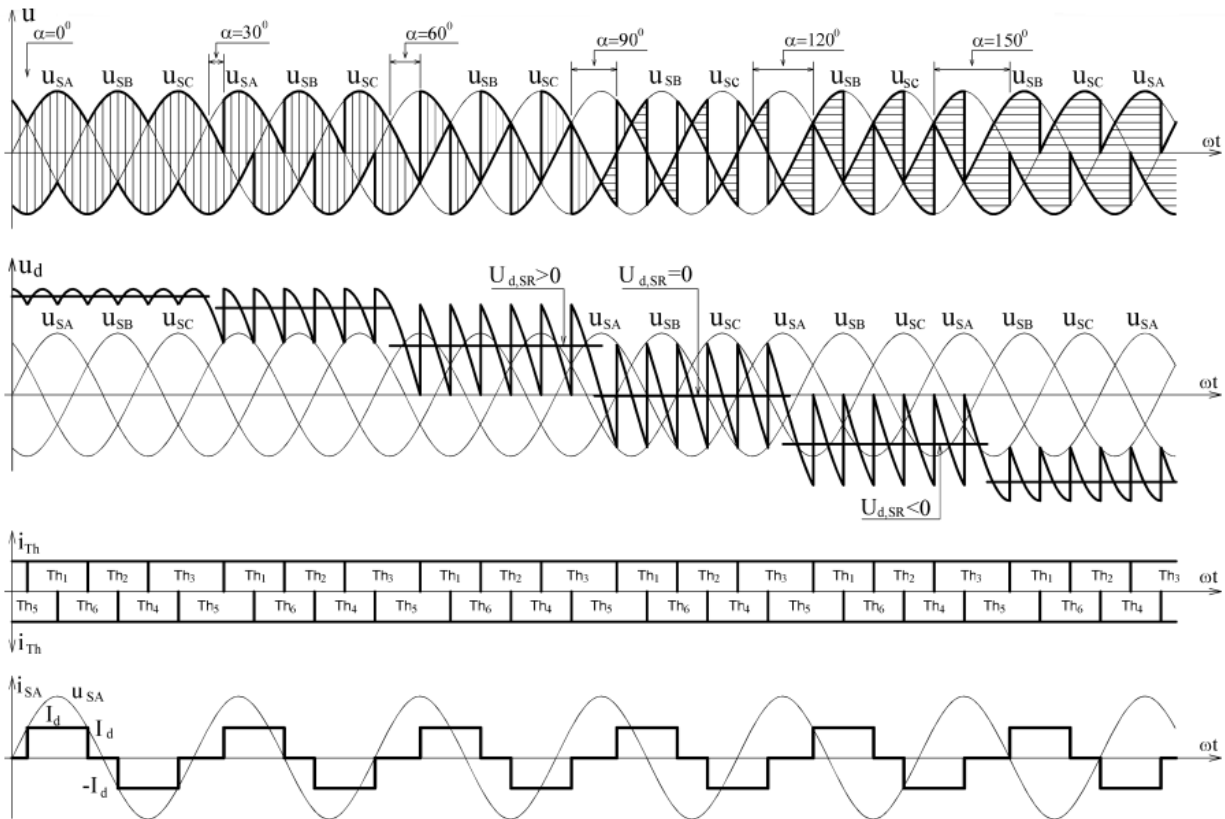
Danas su kod HVDC sistema dominantno u upotrebi dva tipa konvertora: LCC (line-commutated-converter) i VSC (voltage-sourced-converter) konvertori. Razlika između ova dva tipa konvertora je u primijenjenoj tehnologiji i tipu poluprovodničkih ventila koji se koriste.

Kod LCC konvertora se kao poluprovodnički ventili koriste tiristori. Ovaj tip konvertora se primjenjuje kod HVDC sistema kod kojih se ima prenos velikih snaga. LCC konvertor se sastoji iz dva redno vezana tiristorska 6-pulsna konvertora. Tiristorski 6-pulsni konvertor predstavlja punoupravljivi mostni ispravljač. Na slici 3. je prikazan jedan 6-pulsni konvertor gdje su fazni naponi AC mreže označeni sa U_{SA} , U_{SB} i U_{SC} dok su fazne struje označene sa I_{SA} , I_{SB} i I_{SC} [2]. Na slici 3. sa Th su označeni tiristori, i_d predstavlja jednosmjernu struju dok je na krajevima 6-pulsnog konvertora priključeno pretežno induktivno opterećenje sastavljeno od redne veze otpornosti i induktivnosti.



Slika 3. Tiristorski 6-pulsni konvertor

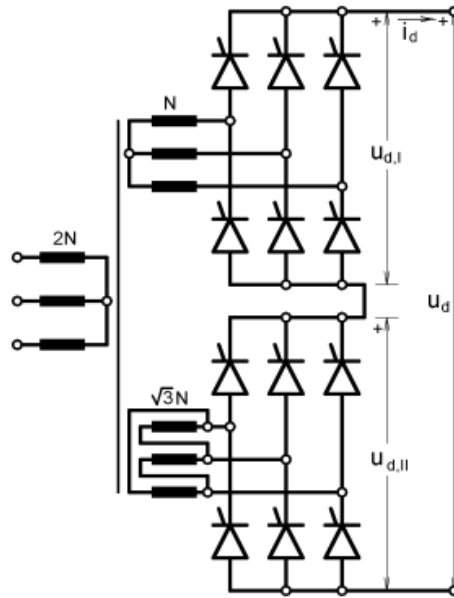
Vremenske promjene napona i struja tiristorskog 6-pulsnog konvertora su date na slici 4 [2]. Navedeni talasni oblici su dati za vrijednosti ugla ukljućivanja tiristora od 0° do 150° sa korakom od 30° . Sa promjenom ugla ukljućivanja tiristora, ugla α , može se mijenjati srednja vrijednost izlaznog DC napona $U_{d,SR}$. Za vrijednosti ugla α manje od 90° , na krajevima 6-pulsnog konvertora dobija se pozitivni napon pa konvertor radi u ispravljaćkom režimu rada, odnosno električna energija se prenosi iz AC mreže u DC mrežu. Za vrijednosti ugla α veće od 90° , na krajevima 6-pulsnog konvertora dobija se negativni napon pa konvertor radi u invertorskom režimu rada, odnosno električna energija se prenosi iz DC mreže u AC mrežu. Za $\alpha = 90^\circ$ izlazni napon konvertora je jednak nuli. Maksimalna vrijednost DC napona se dobija kada je ugao $\alpha = 0^\circ$, dok se minimalna vrijednost dobija za ugao $\alpha = 180^\circ$. Međutim, u praksi nije moguće postići ove krajnje vrijednosti ugla α pa tako nije moguće postići ni krajnje vrijednosti izlaznog DC napona [2].



Slika 4. Talasni oblici napona i struja 6-pulsnog konvertora

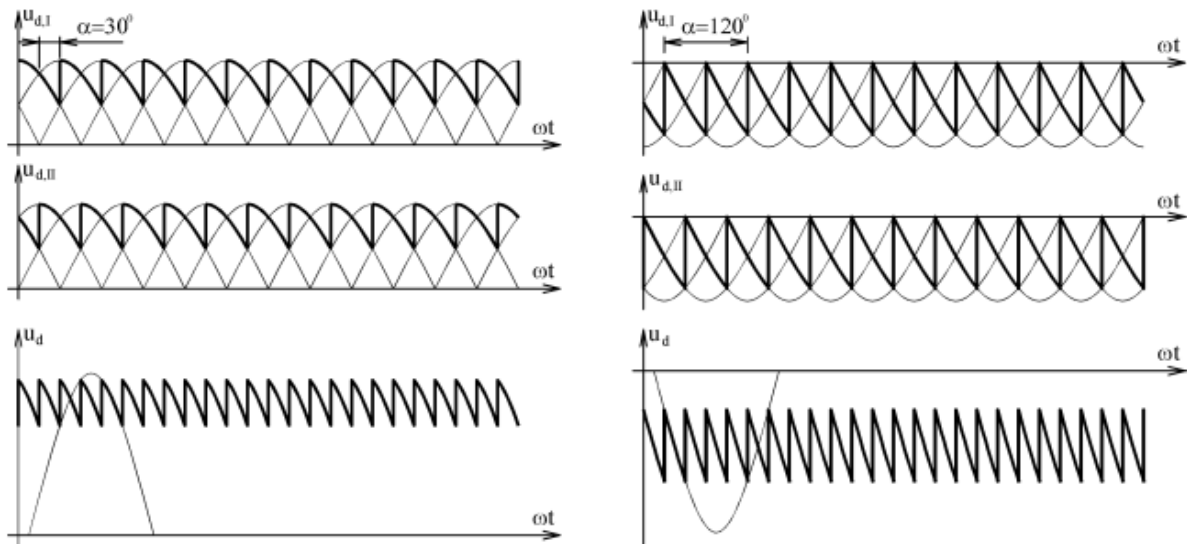
Pri promjeni ugla α ne dolazi do promjene talasnog oblika fazne struje već se on samo pomjera duž vremenske ose. Koliko će biti pomjeranje duž vremenske ose zavisi od vrijednosti ugla α . Sa pojavom određenog faznog stava fazne struje u odnosu na fazni napon dolazi i do pojave određenog faktora snage čija je vrijednost različita od 1 odnosno dolazi do pojave reaktivne snage. LCC konvertori u HVDC sistemima zahtijevaju veoma velike vrijednosti reaktivne snage koje iznose oko 50% aktivne snage koja se prenosi HVDC sistemom [3]. Kao izvor reaktivne snage se može koristiti: AC mreža, AC filtri, šant kondenzatori, sinhroni kondenzatori, statički VAR sistemi itd. Najjednostavniji način obezbijedenja reaktivne snage koji se koristi u praksi je pomoću AC filtera i uklopivih baterija kondenzatora [4].

LCC konvertor predstavlja 12-pulsni konvertor koji se dobija kao redna veza dva tiristorska 6-pulsna konvertora. 12-pulsni konvertor se napaja najčešće preko tronamotajnog trofaznog transformatora kod kojeg se sekundar korsiti za napajanje jednog 6-pulsnog konvertora a tercijer za napajanje drugog 6-pulsnog konvertora. Na slici 5. je prikazan 12-pulsni konvertor gdje su jednosmjerni naponi 6-pulsnih konvertora označeni sa $U_{d,I}$ i $U_{d,II}$ dok je ukupni jednosmjerni napon označen sa U_d [2].



Slika 5. LCC – tiristorski 12-pulsni konvertor

Talasnici napona $U_{d,I}$, $U_{d,II}$ i U_d pri uglu uključivanja tiristora od 30° i 120° su dati na slici 6 [2].



Slika 6. Talasni oblici napona na priključcima 12-pulsnog konvertora, za $\alpha = 30^\circ$ (a) i $\alpha = 120^\circ$ (b)

Fazni pomak od 30° između ulaznih trofaznih napona jednog 6-pulsnog konvertora i drugog 6-pulsnog konvertora se postiže tako što se sekundarni namotaj konvertorskog transformatora spreže u zvijezdu a tercijerni u trougao. Kako se kontrola oba 6-pulsna konvertora odvija u istom trenutku to će i izlazni DC naponi ova dva konvertora biti pomaknuti za 30° jedan u odnosu na drugi. Sa slike 6. se može vidjeti da se rednim vezivanjem dva 6-pulsna konvertora postiže mnogo manja valovitost izlaznog napona na DC strani nego u slučaju jednog konvertora.

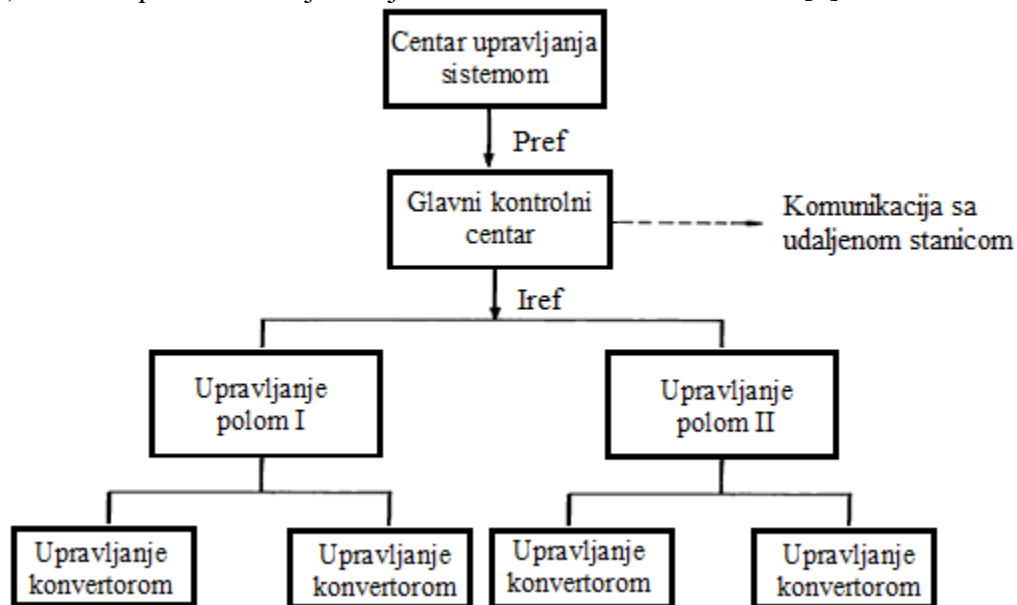
Pored LCC konvertora, kod HVDC sistema se koriste i VSC konvertori. Ovaj tip konvertora koristi ventile sa IGBT tehnologijom. Glavne prednosti VSC konvertora su: brz odziv na upravljanje, mogućnost nezavisnog upravljanja aktivnom i reaktivnom snagom, ne zahtijevaju reaktivnu snagu tako da nema potrebe za izvorima reaktivne snage itd [5]. S druge strane, ovaj tip konvertora ima i svoje nedostatke: visoka cijena, uži opseg izlaznog napona u odnosu na LCC konvertore kao i povišeni gubici [5]. Zbog manjeg opsega napona koji se može dobiti na izlazu iz ovog konvertora, VSC konvertori se primjenjuju kod HVDC sistema sa nižim naponima.

U ovom radu se analizira prenaponska zaštita kod HVDC sistema namijenjenih za prenos velikih snaga pri visokim naponima. Prema tome, HVDC sistemi analizirani u ovom radu koriste LCC tip konvertora.

2.1.2 Upravljanje konvertorom

HVDC sistemi vrše prenos velikih količina električne energije koji je moguće postići pod strogo kontrolisanim uslovima. Naime, kako bi se ostvario prenos odgovarajuće snage neophodno je precizno kontrolisati vrijednosti napona i struje. Iz toga razloga potrebno je konstantno i precizno pratiti različite parametre u sistemu kao što su DC struja i napon ispravljača, DC struja i napon invertora, ugao α ispravljača i ugao prigušivanja γ invertora.

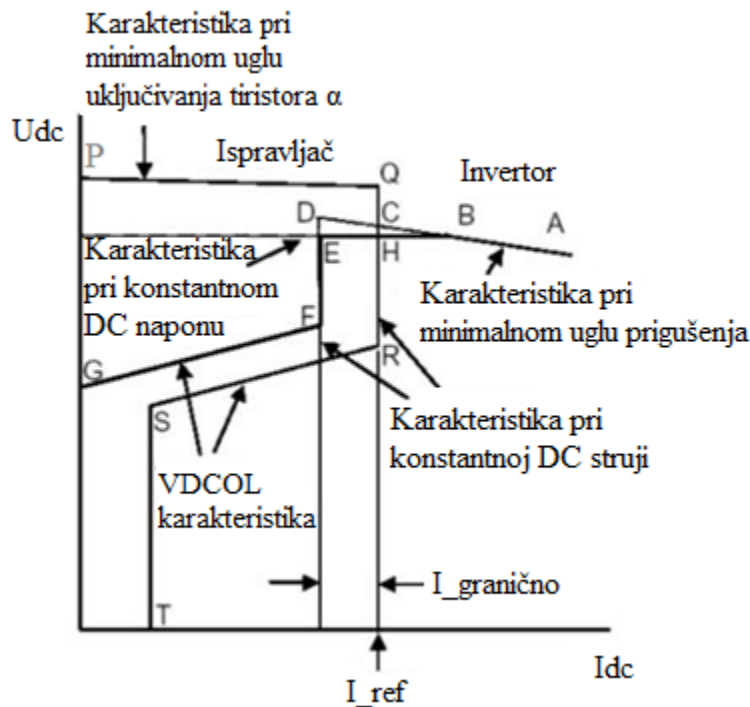
Sistem upravljanja bipolarnim HVDC sistemom (čiji će opis biti dat u nekom od narednih poglavlja) se može predstaviti hijerarhijskom strukturom kao na slici 7 [6].



Slika 7. Sistem upravljanja bipolarnim HVDC sistemom

Najviši nivo upravljanja na prethodnoj slici predstavlja centar upravljanja čitavim sistemom. Iz ovoga centra se glavnom kontrolnom centru prosljeđuje referentna vrijednost snage HVDC sistema koji obavlja funkcije kontrole frekvencije, AC napona i reaktivne snage [6]. U glavnom kontrolnom centru se kontinuirano prikupljaju informacije o vrijednostima AC i DC napona na sabirnicama konvertora kao i vrijednosti drugih parametara koji su od interesa za funkcionisanje glavnog kontrolnog centra [6]. Na osnovu ulaznih podataka, glavni kontrolni centar generiše referentnu vrijednost struje koju prosljeđuje jedinicama za upravljanje polovima u okviru kojih se nalazi i zaštitno upravljanje u slučaju kvara na DCvodu. Ove upravljačke jedinice imaju zadatak da na osnovu ulazne vrijednosti referentne struje generišu odgovarajuće signale koji se dalje dovode do sistema za upravljanje konvertorima. Sistemi upravljanja konvertorima posredstvom mrežne infrastrukture prikupljaju informacije o vrijednostima parametara od interesa. Pored toga, ovi sistemi posjeduju zaštitno upravljanje koje sprečava komutacione greške kod tiristora, upravljanje zaduženo za pokretanje i blokiranje konvertora itd [6].

Konvertori mogu raditi u različitim režimima rada. Na slici 8. je prikazana strujno-naponska karakteristika ispravljača i invertora [7].



Slika 8. Strujno-naponska karakteristika ispravljača i invertora

U normalnom pogonu, inverter ima zadatak da vrši kontrolu DC napona [7]. Inverter navedenu kontrolu vrši na način što ima konstantnu minimalnu vrijednost ugla prigušivanja γ [7]. Držanje ugla γ na konstantnoj minimalnoj vrijednosti ima za posljedicu pad DC napona sa porastom DC struje, kao što prikazuje karakteristika A-B-C-D. Pored ovoga režima, inverter može normalno raditi i u režimu gdje se održava konstantna vrijednost DC napona (karakteristika B-H-E), pri čemu u ovom režimu rada ugao prigušivanja invertora ima vrijednost iznad svoje minimalne vrijednosti.

Ukoliko inverter radi u jednom od prethodno opisanih režima, ispravljač mora raditi u režimu u kojem kontroliše DC struju i taj režim je opisan karakteristikom Q-C-H-R [7]. Presjek karakteristika invertora i ispravljača, tačka C ili tačka H, predstavlja radnu tačku HVDC sistema.

Referentna vrijednost struje se dovodi do oba konvertora, pri čemu se najčešće do invertora dovodi vrijednost koja je nešto niža od referentne ($I_{ref} - I_{granično}$) [7]. U normalnom pogonu, ova referentna vrijednost struje invertora nema značaja jer inverter radi u režimu u kojem kontroliše DC napon. Kontrola struje od strane invertora postaje aktivna tek kada ispravljač prestane da vrši kontrolu struje i pređe u režim rada sa minimalnim uglom uključivanja tiristora α (karakteristika P-Q) [7]. Iz različitih razloga, kao na primjer nizak AC napon na ulazu u ispravljač, može doći do spuštanja karakteristike P-Q ispod tačke D ili E [7]. U tom slučaju se ima nova radna tačka koja se dobija u presjeku karakteristika P-Q i D-E-F. Na ovaj način inverter prelazi u režim rada u kojem kontroliše DC struju dok ispravljač prelazi u režim rada u kojem kontroliše DC napon.

Tokom poremećaja pri kojima dolazi do pada naizmjeničnog napona na krajevima konvertora dolazi i do pada jednosmjernog napona. Sa strujno-naponske karakteristike se može vidjeti da u slučaju pada DC napona ispod određene vrijednosti dolazi i do smanjivanja vrijednosti referentne struje konvertora. Ova situacija je prikazana krivom R-S-T za ispravljač i krivom F-G za inverter. Kontroler koji smanjuje vrijednost referentne struje u slučaju pada DC napona se naziva „Voltage Dependent Current Order Limiter“ (VDCOL). Ovaj kontroler održava sniženu vrijednost DC struje tokom trajanja poremećaja, odnosno dok se bilježi pad jednosmjernog napona i na taj način značajno ubrzava oporavak sistema od poremećaja [7]. Nakon što se DC napon vrati unutar normalnih vrijednosti dolazi i do povratka početne vrijednosti referentne struje.

2.1.3 Konvertorski transformator

U sklopu LCC HVDC sistema, konvertorski transformator ima nekoliko funkcija. Osnovna funkcija ovog transformatora je da obezbijedi odgovarajući naizmjenični napon koji se dovodi na konvertor. Pored toga, transformator predstavlja galvansku barijeru između AC i DC sistema. Takođe, ovaj transformator je odgovoran za dio regulacije DC napona i omogućava regulaciju reaktivne snage. Na konvertorskim transformatorima se javljaju nepoželjni efekti usljed nelinearnog rada konvertora pa ovi transformatori moraju imati specijalan dizajn. Kako se HVDC sistemi koriste za povezivanje velikih AC sistema i prenos velikih količina električne energije to su konvertorski transformatori izloženi izuzetno nepovoljnim uslovima rada sa aspekta opterećenja.

Kod LCC HVDC sistema se koristi 12-pulsni konvertor koji predstavlja rednu vezu dva 6-pulsna konvertora. Konvertorski transformator je izveden najčešće kao tronamotajni i njegova funkcija je da za dva 6-pulsna konvertora obezbijedi naizmjenične napone pomjerene za 30° električnih. Fazni pomjeraj se postiže tako što je sekundarni namotaj transformatora spregnut u zvijezdu dok je tercijerni namotaj spregnut u trougao.

Kod LCC HVDC sistema, podešavanjem naizmjeničnog napona koji se dovodi na konvertor kao i ugla uključivanja tiristora moguće je regulisati količinu i smjer snage koja se prenosi DC vodom. Iz navedenog razloga, mora se vršiti kontrola naizmjeničnog napona koji se dovodi na konvertor. Naime, uprkos dozvoljenim varijacijama napona u AC mreži od 5-10%, podešavanjem regulacionog otcjepa konvertorskog transformatora mora se kontrolisati napon koji se dovodi na konvertor [8]. Ova kontrola se vrši uz pomoć podešavanja regulacionog otcjepa konvertorskog transformatora pri čemu transformatori koji se koriste kod LCC HVDC sistema

moraju ovo podešavanje vršiti pod opterećenjem. Pored toga, opseg podešavanja regulacionog otcjepa kod konvertorskog transformatora, zbog posebnih režima rada, mora biti značajno veći nego kod klasičnog energetskog transformatora.

Prilikom podešavanja količine snage koja se prenosi HVDC sistemom treba voditi računa da LCC konvertori imaju ograničenje u pogledu minimalne aktivne snage sa kojom mogu raditi [4]. Ukoliko se vrijednost struje spusti na vrijednosti koje su niže od 5-10% nominalne vrijednosti dolazi do pojave intermitencije struje na DC strani [9].

Takođe, prilikom promjene smjera prenosa snage u LCC HVDC sistemu dolazi do značajnih naprezanja izolacije konvertorskog transformatora [10], pa promjene smjera nijesu poželjne kod LCC HVDC sistema.

Tokom normalnog režima rada konvertori generišu više harmonike struje koji se prenose ka konvertorskom transformatoru. Kao posljedica tih harmonika imaju se povišeni gubici u transformatoru i povišena buka pri radu. Povećanje gubitaka u transformatoru usljed viših harmonika struje može iznositi od 25 do 30 % od ukupnih gubitaka u transformatoru i što za posledicu može imati pregrijavanje transformatora [11],[12].

2.1.4 Prigušnica

Na oba kraja DC voda je instalirana prigušnica (kalem). Nazivni napon i struja prigušnice se specificiraju na osnovu parametara DC mreže dok induktivnost prigušnice zavisi od dužine i konfiguracije HVDC sistema. Za veoma duge HVDC sisteme induktivnost prigušnice se kreće u opsegu od 100 do 300 mH dok se za back-to-back konfiguraciju (čiji će opis biti dat u nekom od narednih poglavlja) ta vrijednost kreće u opsegu od 30 do 80 mH [13]. U praksi su zastupljena dva tipa prigušnica i to prigušnice izolovane vazduhom i prigušnice sa izolacijom od ulja. Prigušnice u okviru HVDC sistema obavljaju više funkcija : preventivna zaštita od intermitentnih struja, ograničenje struje u slučaju kvara u DC mreži i smanjenje viših harmonika struje.

Intermitentna struja kao i varijacije struje mogu izazvati visoke prenapone na transformatoru i prigušnici [13]. Iz toga razloga, prigušnica se koristi kao preventivna zaštita od prekida struje pri prenosu minimalnog opterećenja HVDC sistemom.

Prigušnica može imati ulogu u smanjenju struje u slučaju komutacione greške konvertora ili u slučaju kvara na DC vodu [13]. Uloga ograničenja vrijednosti ovih struja posebno je od značaja kod veoma dugih vodova.

2.1.5 AC filtri

Filtri priključeni na AC strani konvertorske stanice imaju dvije osnovne funkcije:

- da apsorbiraju više harmonike struje generisane od strane konvertora i na taj način spriječe njihovo dalje prostiranje u AC mreži. Na ovaj način se smanjuje uticaj harmonika struje na distorziju AC napona i telefonsku interferenciju
- da obezbijedi dovoljnu količinu reaktivne snage neophodnu za rad konvertorske stanice.

Konvertori prilikom svog rada generišu više harmonike struje koji se prenose ka AC mreži. Ovi harmonici su reda: $n = (12 \cdot k) \pm 1$; ($k = 1, 2, 3, \dots$) [13]. AC filtri treba da budu dizajnirani tako da njihova impedansa ima dovoljno malu vrijednost za odgovarajuće harmonijske

komponente čije dalje širenje ka AC mreži treba zaustaviti. Kod HVDC sistema se koriste dva tipa AC filtera i to: „Tuned” i „High-pass” filtri. Filtri tipa „Tuned” su dizajnirani tako da imaju rezonantnu impedansu pri tačno određenoj frekvenciji. Sa druge strane, filtri tipa „High-pass” su dizajnirani tako da imaju rezonantnu impedansu za sve vrijednosti frekvencije koje su veće od neke granične vrijednosti.

Količina reaktivne snage koja je neophodna za rad konvertorske stanice zavisi od količine aktivne snage koja se prenosi DC vodom, reaktanse konvertorskog transformatora i ugla uključivanja tiristora. Sa porastom aktivne snage povećavaju se i zahtjevi za reaktivnom snagom.

2.1.6 DC filtri

Prilikom svog rada, konvertori generišu više harmonike napona koji se prenose ka DC mreži. Ovi harmonici napona dovode do pojave naizmjenične struje koja se superponira na jednosmjernu struju u DC vodu [13]. I pored upotrebe prigušnice, viši harmonici naizmjenične komponente struje mogu dovesti do pojave interferencije u okolnoj telekomunikacionoj mreži. Intenzitet interferencije zavisi i od konfiguracije HVDC sistema pa je tako taj intenzitet veći kod monopolarne nego kod bipolarne konfiguracije [13]. Kako bi se smanjio negativni uticaj HVDC sistema na telekomunikacionu infrastrukturu, potrebno je instalirati filtre na DC strani. Konfiguracija DC filtera je veoma slična onoj kod AC filtera. Postoji više tipova DC filtera od kojih su najčešće u primjeni „Tuned” i „High-pass” filtri.

2.2 Konfiguracije HVDC sistema

U praksi se nalaze primjeri tri tipa HVDC sistema sa aspekta načina na koji su povezane konvertorske stanice i to: „back-to-back”, „point-to-point” i „multiterminal” sistemi.

Izraz „Back-to-back” HVDC sistem potiče od činjenice da se kod ovih HVDC sistema i ispravljачka i invertorska stanica nalaze u jednom objektu. Ovaj tip HVDC sistema se koristi za razmjenu električne energije između susjednih sistema naizmjeničnog napona koji imaju različite frekvencije.

„Multiterminal” HVDC sistemi predstavljaju sisteme kod kojih su tri ili više konvertorskih stanica povezane na isti sistem prenosa pri jednosmjernom naponu. Upotrebom „multiterminal” HVDC sistema se omogućava međusobno povezivanje više sistema naizmjeničnog napona.

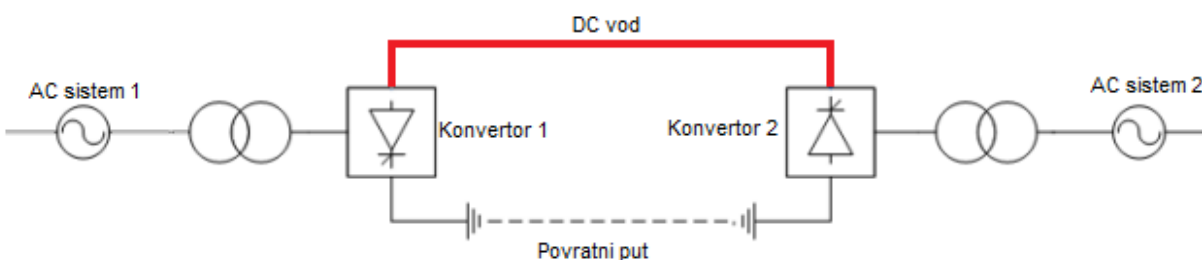
Treći, i ujedno najzastupljeniji u praksi, način povezivanja konvertorskih stanica jeste „point-to-point” sistem. Kod ovog tipa HVDC sistema postoje dvije konvertorske stanice koje se obično nalaze na rastojanju od više stotina kilometara. Između konvertorskih stanica se nalazi DC vod. U ovom radu će se analizirati prenaponska zaštita HVDC sistema koji imaju ovakav način povezivanja konvertorskih stanica. U narednim poglavljima su prikazane različite konfiguracije „point-to-point” HVDC sistema.

2.2.1 Monopolarna konfiguracija

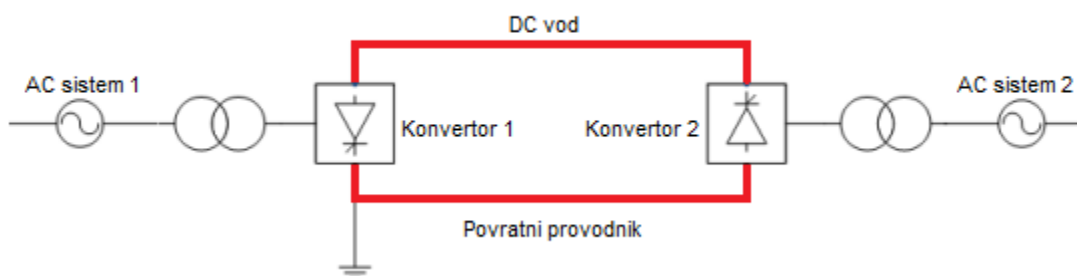
Za potrebe prenosa manjih snaga u upotrebi je monopolarna konfiguracija HVDC sistema koja se sastoji od dvije konvertorske stanice između kojih se nalazi DC vod. Kod ovog tipa HVDC sistema promjena smjera prenosa snage moguća je sa promjenom polariteta prenosnog

voda. S obzirom da je efekat korone značajno manje izražen kod provodnika koji je negativno naelektrisan, ovaj režim rada se najčešće i primjenjuje u praksi [6].

Kod monopolarne konfiguracije povratni put se može realizovati kroz zemlju (ili vodu) ili sa metalnim provodnikom. Koje će se rješenje koristiti zavisi od različitih faktora. U situacijama kada se vrši prenos električne energije na velike udaljenosti i kod podvodnih prenosnih kablova koristi se povratni put kroz zemlju odnosno more. Kod ovog tipa sistema kako bi se ostvario povratni put neophodna je upotreba anodne i katodne elektrode. Ove dvije elektrode se značajno razlikuju sa aspekta izvedbe. S druge strane, u mnogim slučajevima zbog izgrađene infrastrukture i ograničenja okoline nije moguće koristiti zemlju (vodu) kao povratni put. Naime, takva situacija se ima u naseljenim urbanim područjima, područjima gdje postoje problemi sa korozijom i harmonijskom interferencijom kao i u situacijama kada je otpornost zemlje prevelika da bi se mogla koristiti kao povratni put. U navedenim situacijama se koristi metalni provodnik za povratni put. Na slikama 9. i 10. su prikazane monopolarne konfiguracije sa povratnim putem kroz zemlju (ili vodu) i sa metalnim povratnim provodnikom, respektivno.



Slika 9. Monopolarna konfiguracija sa povratnim putem kroz zemlju (ili vodu)

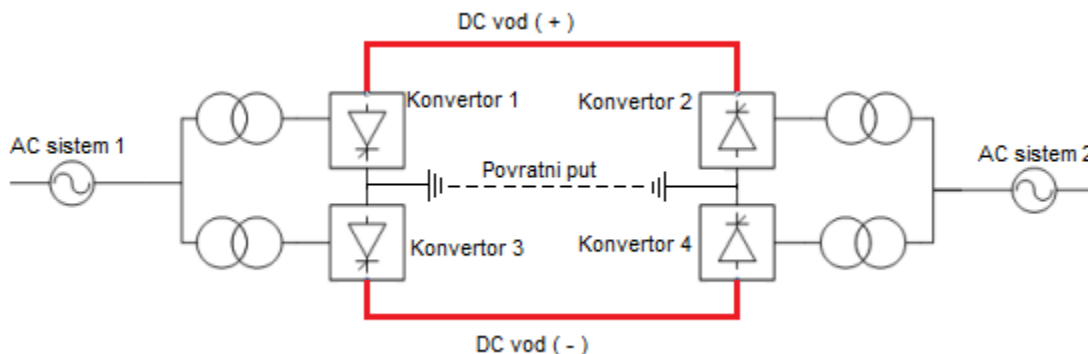


Slika 10. Monopolarna konfiguracija sa metalnim povratnim provodnikom

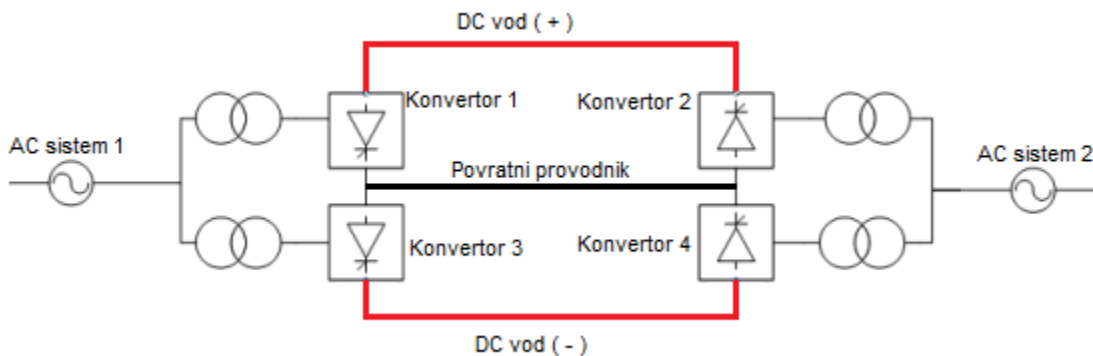
2.2.2 Bipolarna konfiguracija

U velikom broju slučajeva u praksi, zbog potreba prenosa većih snaga vrši se proširenje monopolarne konfiguracije i prelazak na bipolarnu konfiguraciju. Prelaskom na bipolarnu konfiguraciju dobija se dvostruko veći kapacitet za prenos snage. Kod bipolarne konfiguracije postoje dva DC prenosna voda pri čemu je jedan naelektrisan pozitivno a drugi negativno. Na oba kraja HVDC sistema postoje po dva 12-pulsna konvertora vezana redno na DC strani. U normalnom pogonu struja kroz povratni put je jednaka nuli iz razloga jer kroz oba provodnika

protiče ista vrijednost struje. Povratni put kod bipolarne konfiguracije ima značajnu ulogu u slučaju kvara na jednom od provodnika. U navedenoj situaciji bipolarna konfiguracija može nastaviti da radi u monopolarnoj konfiguraciji sa jednim zdravim provodnikom i povratnim putem. Na slikama 11. i 12. su prikazane bipolarne konfiguracije HVDC sistema sa povratnim putem kroz zemlju (ili vodu) i sa metalnim povratnim provodnikom, respektivno.



Slika 11. Bipolarna konfiguracija sa povratnim putem kroz zemlju (ili vodu)

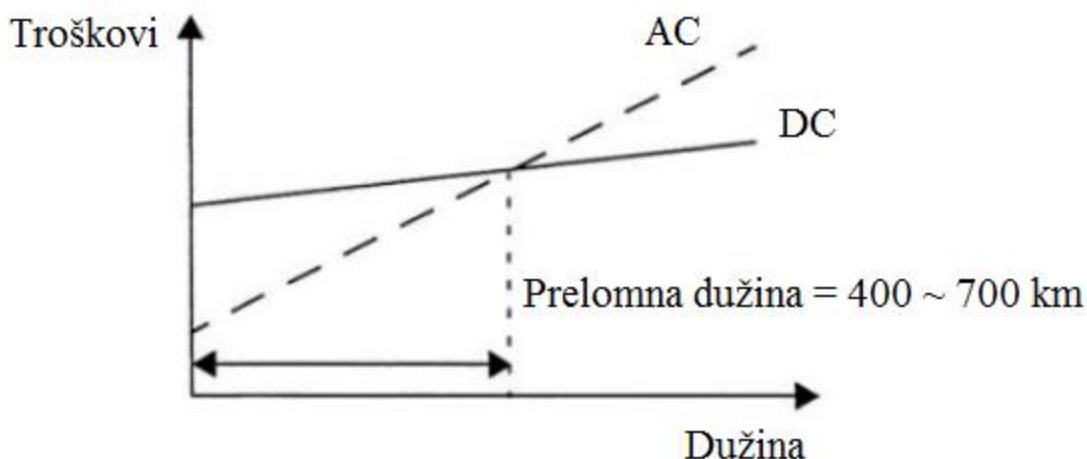


Slika 12. Bipolarna konfiguracija sa metalnim povratnim provodnikom

2.3 Uporedna analiza HVAC i HVDC sistema

Uporedna analiza HVAC i HVDC sistema se može izvršiti sa ekonomskog aspekta, aspekta tehničkih performansi, aspekta pouzdanosti itd.

Kada se vrši analiza sa ekonomskog aspekta može se reći da oba načina prenosa imaju svoje prednosti i nedostatke. Naime, kod prenosa električne energije pri jednosmjernom naponu se koristi manje provodnika u odnosu na prenos pri naizmjeničnom naponu. Pored toga, provodnici su manjeg presjeka jer je skin-efekat zanemariv pa se i na ovaj način smanjuju ukupni troškovi HVDC vodova. Međutim, ono što značajno povećava troškove izgradnje HVDC sistema jesu konvertorske stanice za kojima nema potrebe kod HVAC sistema. Na slici 13. je prikazan grafik zavisnosti ukupnih troškova izgradnje HVAC i HVDC sistema od dužine na kojoj je neophodno izvršiti prenos električne energije [6].



Slika 13. Zavisnost ukupnih troškova izgradnje HVDC i HVAC sistema od dužine na kojoj je neophodno izvršiti prenos električne energije

Dakle, na zaključak uporedne analize HVAC i HVDC sistema sa ekonomskog aspekta presudan uticaj ima dužina na kojoj se vrši prenos električne energije. Pri manjim dužinama dolazi do izražaja visoka cijena konvertorskih stanica kod HVDC sistema pa su HVAC sistemi ekonomski prihvatljiviji. Međutim, kako se povećava dužina vodova dolazi do bržeg rasta troškova izgradnje HVAC sistema u odnosu na HVDC sisteme zbog većeg broja provodnika. Na taj način se dolazi do pojma „prelomna dužina” koji predstavlja dužinu pri kojoj HVDC sistemi postaju ekonomski prihvatljiviji u odnosu na HVAC sisteme. Vrijednost ove dužine se kreće u opsegu od 400 – 700 km za nadzemne vodove i 25 – 50 km za kablovske vodove [14]. Veliki je broj parametara (kao npr. teren gdje se gradi prenosni sistem) koji imaju uticaj na troškove izgradnje prenosnog sistema. Iz toga razloga prelomna dužina nema jedinstvenu vrijednost već se ona daje u određenom opsegu. Takođe, u literaturi ne postoji saglasnost oko opsega vrijednosti prelomne dužine. Primjer je [15] gdje se za nadzemne vodove opseg vrijednosti prelomne dužine kreće od 800-1000 km.

Prednosti HVDC sistema u odnosu na HVAC sisteme se ogledaju u sposobnosti povezivanja AC sistema različitih frekvencija (i na taj način povećanju njihove stabilnosti) i kontrole smjera energije koja se prenosi što sa druge strane nije izvodljivo kod HVAC sistema [1]. Pored toga, kod HVDC sistema ne postoji prenos reaktivne snage pa ona ne može ograničavati prenosni kapacitet voda kao što je slučaj kod HVAC sistema [1]. Značajne prednosti HVDC sistema su vidljive i kod polaganja podmorskih kablova. Naime, prilikom prenosa električne energije pri naizmjeničnom naponu kao posljedica kapacitivnosti kabla imaju se veliki gubici dok sa druge strane kod prenosa pri jednosmjernom naponu ovi gubici ne postoje.

Pored navedenih prednosti HVDC sistema u odnosu na HVAC sisteme postoje i određeni nedostaci ovakvog načina prenosa električne energije. Naime, pri radu konvertora generišu se viši harmonici i to harmonici struje koji se prenose u AC sistem i harmonici napona koji se prenose u DC mrežu. Generisani viši harmonici značajno utiču na kvalitet električne energije, dovode do narušavanja izolacije itd [1]. Činjenica da se svi proizvodni kapaciteti i najveći broj potrošača zasnivaju na sistemu naizmjeničnog napona olakšava dalju primjenu HVAC sistema. Takođe, visoka cijena konvertora kao i gubici tokom rada konvertora dodatno ne idu u prilog primjeni HVDC sistema [1].

3. Prenaponi kod HVDC sistema

3.1 Prenaponi u elektroenergetskim sistemima

Osnovna funkcija izolacije opreme i provodnika predstavlja odvajanje djelova koji su pri normalnom pogonu na određenom potencijalu od djelova koji se nalaze na nultom potencijalu kao i za odvajanje djelova koji se nalaze na različitim potencijalima. Glavni parametar o kojem je neophodno voditi računa prilikom dimenzionisanja izolacije je najviši napon opreme pri kojem izolacija mora raditi neograničeno dugo vremena. Međutim, u elektroenergetskom sistemu iz različitih razloga može doći do pojave vrijednosti napona koje premašuju najviše napone opreme i takvi naponi se nazivaju prenaponima. Prilikom pojave prenapona dolazi do napreznja izolacije dok intenzitet napreznja zavisi od karakteristika prenaponskog talasa. Da li će izolacija podnijeti nailazak prenaponskog talasa bez oštećenja zavisi od definisanog izolacionog nivoa opreme. Osnovni parametri neophodni za definisanje izolacionih nivoa opreme su podnosivi naponi izolacije. Podnosivi napon izolacije predstavlja vrijednost napona koja neće dovesti do narušavanja karakteristika izolacije, odnosno do njenog oštećenja. U zavisnosti od vremena trajanja i frekvencije napona razlikuje se više tipova podnosivih napona.

Posmatrajući sa aspekta uzroka nastanka, svi prenaponi se mogu svrstati u jednu od sljedeće dvije grupe [16]:

- spoljašnji (atmosferski) prenaponi i
- unutrašnji prenaponi.

Do pojave spoljašnjih prenapona dolazi u slučaju atmosferskog pražnjenja u elemente elektroenergetskog sistema ili njihovu okolinu. U zavisnosti od mjesta gdje se vrši atmosfersko pražnjenje razlikuje se dva tipa atmosferskih prenapona. Ukoliko se atmosfersko pražnjenje odvija u same elemente elektroenergetskog sistema tada je riječ o direktnom udaru atmosferskog pražnjenja. Sa druge strane, u situaciji kada se ima udar atmosferskog pražnjenja u okolini određenog elektroenergetskog voda, na faznim provodnicima voda dolazi do pojave indukovanih prenapona. Posmatrano sa aspekta ugrožavanja izolacije, indukovani prenaponi predstavljaju opasnost jedino po izolaciju srednjenaponskih i niskonaponskih elektroenergetskih vodova [17]. Istraživanja u oblasti prenapona koji nastaju usljed direktnog atmosferskog pražnjenja predstavljaju daleko jednostavniji problem od istraživanja koja se odnose na indukovane prenapone. U nastavku će se detaljnije govoriti o direktnim atmosferskim pražnjenjima.

Atmosfersko pražnjenje predstavlja proces pražnjenja naelektrisanja akumuliranog u grmljavinskim oblacima. U najvećem broju slučajeva u nižim djelovima grmljavinskih oblaka je akumulirano naelektrisanje negativnog polariteta. Upravo iz navedenog razloga, u prirodi gotovo uvijek dolazi do atmosferskih pražnjenja negativnog polariteta dok pražnjenja pozitivnog polariteta predstavljaju rijetkost [17]. Mnogobrojna istraživanja su dovela do zaključka da su pražnjenja pozitivnog polariteta sastavljena samo od jednog udara [17]. Posmatrano sa aspekta negativnih posljedica po elemente elektroenergetskog sistema, pozitivna pražnjenja zahvaljujući

značajnim maksimalnim vrijednostima glavnog udara predstavljaju veću opasnost od atmosferskih pražnjenja negativnog polariteta [17].

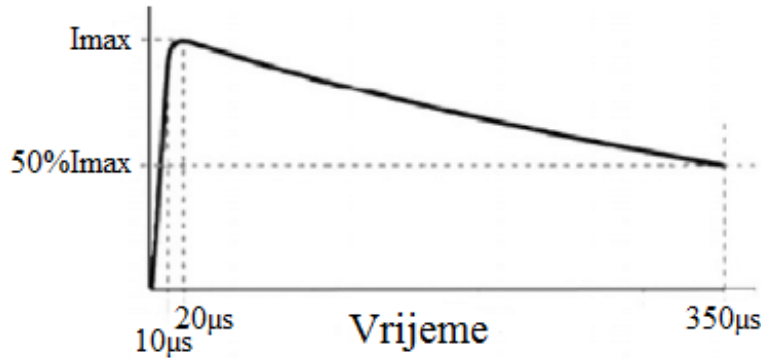
Proces atmosferskog pražnjenja se sastoji iz četiri faze: tačkasto pražnjenje, skokoviti lider, glavno pražnjenje i višestruki udari [17]. U zavisnosti od smjera u kojem se razvija skokoviti lider mogu se razlikovati dva tipa atmosferskog pražnjenja i to: uzlazno atmosfersko pražnjenje kada se skokoviti lider razvija od zemlje ka oblaku i silazno atmosfersko pražnjenje kod kojeg se skokoviti lider razvija od oblaka ka zemlji. Do kojeg od ova dva tipa atmosferskog pražnjenja će doći zavisi od visine objekta u koji se odvija pražnjenje. Kod niskih objekata kao što su kuće, zemlja i elektroenergetski objekti odvija se silazno atmosfersko pražnjenje dok je uzlazno pražnjenje moguće jedino kod veoma visokih objekata kao što su televizijski tornjevi.

Glavni električni parametri kojima se karakteriše atmosfersko pražnjenje su [17]:

- maksimalna vrijednost struje atmosferskog pražnjenja,
- oblik struje atmosferskog pražnjenja,
- strmina strujnog talasa,
- količina naelektrisanja,
- toplotni impuls ukupnog atmosferskog pražnjenja i
- broj pojedinačnih pražnjenja u okviru ukupnog pražnjenja.

Vrijednost pada napona na otpornicima, a posebno na otpornosti uzemljenja, dominantno zavisi od maksimalne vrijednosti struje atmosferskog pražnjenja. Maksimalna vrijednost struje atmosferskog pražnjenja se najčešće nalazi u opsegu od par kiloampera do 100 kA [17], s tim što se sa povećanjem vrijednosti amplitude smanjuje vjerovatnoća pojave takvih strujnih talasa. Naime, u približno 50% slučajeva se imaju struje koje dostižu maksimalne vrijednosti do 20 kA dok je kod manje od 1% slučajeva zabilježena struja čija maksimalna vrijednost premašuje 200 kA [18]. Za potrebe proračunavanja vjerovatnoće pojave određene maksimalne vrijednosti struje atmosferskog pražnjenja danas su u upotrebi eksponencijalni, logaritamsko-normalni i drugi zakoni raspodjele maksimalne vrijednosti.

Talasnog oblika struje atmosferskog pražnjenja se opisuje sa dvije karakteristične veličine: vrijeme trajanja čela talasa i vrijeme trajanja začelja talasa. Vrijeme potrebno strujnom talasu da postigne vrijednost koja je približno jednaka maksimalnoj vrijednosti predstavlja vrijeme trajanja čela talasa, dok vrijeme potrebno talasu da se nakon postizanja svog maksimuma spusti na vrijednost od 50% maksimalne vrijednosti predstavlja vrijeme trajanja začelja talasa [19]. Prilikom različitih simulacija i analiza, a prateći uputstva standarda IEC 62305-1, za osnovni udar atmosferskog pražnjenja se koristi standardizovani talasni oblik 10/350 μ s. Primjer ovog talasnog oblika je prikazan na slici 14 [19]. Takođe, u literaturi se mogu pronaći i drugi talasni oblici struje atmosferskog pražnjenja: eksponencijalni, uprošćeni eksponencijalni, talas linearnog čela i linearnog začelja, talas linearnog čela i konstantnog začelja itd.



Slika 14. Standardni 10/350 μs talasni oblik struje

Osnovni problem koji postoji kod ispitivanja rada elemenata sistema tokom procesa atmosferskog pražnjenja jesu ograničenja u vidu diskontinuiteta. U cilju prevazilaženja navedenog problema strujni talas atmosferskog pražnjenja se predstavlja uz pomoć Hajdlerove funkcije. Hajdlerova funkcija je definisana prema izrazu (1):

$$I(t) = \frac{I_{\max}}{\eta} * \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{nh}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{nh}} * e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (1)$$

gdje je :

- I_{\max} – amplituda struje,
- η – korekcionni faktor,
- τ_1 – vrijeme trajanja čela talasa,
- τ_2 – vrijeme trajanja začelja talasa,
- nh – Hajdlerov faktor rasta.

Korekcionni faktor je definisan izrazom (2):

$$\eta = e^{-\frac{\tau_1}{\tau_2} * \left(\frac{nh\tau_1}{\tau_2}\right) * \frac{1}{nh}} \quad (2)$$

Dva najznačajnija parametra sa aspekta prenapona koji se javljaju kao posljedica atmosferskih pražnjenja su strmina strujnog talasa i maksimalna vrijednost strujnog talasa [17]. Induktivni pad napona na elementima kroz koje protiče struja atmosferskog pražnjenja kao i naponi koji su indukovani u magnetski spregnutim kolima zavise dominantno od strmine struje atmosferskog pražnjenja. Slično kao i kod maksimalne vrijednosti, u upotrebi su eksponencijalni, logaritamsko-normalni i drugi zakoni raspodjele maksimalne strmine struje atmosferskog pražnjenja koji se koriste za određivanje vjerovatnoće pojave određene vrijednosti strmine struje atmosferskog pražnjenja.

Prilikom atmosferskog pražnjenja dolazi do zagrijavanja površine u koju se vrši atmosfersko pražnjenje odnosno dolazi do termičkih naprezanja na posmatranom mjestu. Kao posljedica ovih termičkih naprezanja može se imati oštećenje ili čak topljenje metalnih djelova.

Iz navedenog razloga je neophodno sprovesti termičke analize prilikom atmosferskog pražnjenja. Osnovni parametar atmosferskog pražnjenja koji je od značaja prilikom analiza termičkih efekata atmosferskog pražnjenja je količina naelektrisanja u grmljavinskom oblaku [17].

Još jedan parametar atmosferskog pražnjenja koji je od značaja kada su u pitanju analize termičkih i mehaničkih naprezanja je toplotni impuls ukupnog atmosferskog pražnjenja. Na osnovu ovog parametra moguće je proračunati količinu toplote otpuštenu prilikom proticanja struje groma kroz određeni element kao i mehanička naprezanja tog elementa [17].

Za razliku od atmosferskih prenapona, uzrok nastanka unutrašnjih prenapona su poremećaji unutar samog elektroenergetskog sistema. Naime, unutar elektroenergetskog sistema figuriše veliki broj induktivnosti i kapaciteta elemenata koji zajedno čine jedno veliko oscilatorno kolo. U ovim elementima dolazi do sakupljanja određenih količina elektromagnetne i elektrostatičke energije. Iz različitih razloga, kao npr. kvarovi u sistemu, može doći do prelaska energije između kapaciteta i induktiviteta pri čemu se ona pretvara iz elektrostatičke u elektromagnetnu i suprotno. Tokom navedenih oscilacija energije javljaju se povišene vrijednosti struja ili napona (prenaponi). Posmatrajući sa aspekta uzroka nastanka, svi unutrašnji prenaponi se mogu svrstati u jednu od sljedeće dvije grupe [17]:

- sklopni (komutacioni) prenaponi i
- privremeni (povremeni) prenaponi.

U okviru elektroenergetske mreže postoji veliki broj prekidača koji omogućavaju uključivanja ili isključenja pojedinih djelova mreže. Operacije prekidačima mogu biti izvršene tokom normalnog pogona, kada se uključuje ili isključuje dio opterećenja, ili tokom havarijskog pogona kada se isključuje kvar u mreži. Međutim, prilikom navedenih manipulacija prekidačima dolazi do pojave sklopnih prenapona. Manipulacije prekidačima pri kojima u najvećem broju slučajeva dolazi do pojave sklopnih prenapona su: uključivanje voda u praznom hodu, isključivanje voda u kratkom spoju i isključivanje transformatora pri praznom hodu. Tokom perioda trajanja sklopnih prenapona dolazi do naprezanja izolacije opreme pri čemu intenzitet tog naprezanja zavisi od velikog broja uticajnih parametara kao što su uklopno stanje u sistemu, brzina djelovanja prekidača itd. Učestanost sklopnih prenapona se kreće u opsegu od par stotina Hz do par desetina kHz. Izuzetak u pogledu učestanosti sklopnih prenapona postoji kod postrojenja u kojima se kao izolaciono sredstvo koristi sumpoheksafluorid. U slučaju manipulacija rastavljačima u ovakvim postrojenjima postoji mogućnost nastanka sklopnih prenapona učestanosti i do 50 MHz [17]! Vrijeme trajanja sklopnih prenapona se kreće u intervalu od djelova periode industrijske učestanosti do nekoliko perioda industrijske učestanosti [17]. Međutim, postoje određeni izuzeci i kada je u pitanju trajanje sklopnih prenapona. Naime, pri manipulacijama rastavljačima, kada dolazi do uzastopnog uspostavljanja i prekidanja električnog luka pri prekidanju ili uključivanju male kapacitivne struje, može doći do pojave ultrabrzih sklopnih prenapona [17]. Proračun sklopnih prenapona je daleko jednostavniji proces od proračuna atmosferskih prenapona. Jedan od najčešće korišćenih načina za proračunavanje sklopnih prenapona se zasniva na principu Laplasove transformacije.

Za razliku od sklopnih i atmosferskih prenapona, prilikom pojave privremenih prenapona postoji značajno manja opasnost po izolaciju opreme. Elementi elektroenergetskog sistema čiji je funkcionisanje najugroženije prilikom pojave privremenih prenapona su odvodnici prenapona i mjerni transformatori. Razlog za ovo se nalazi u karakteristikama privremenih prenapona. Naime, privremeni prenaponi imaju najduže trajanje od svih ostalih tipova prenapona i mogu

trajati do par sati. Takođe, amplituda privremenih prenapona nije značajno iznad vrijednosti najvišeg napona mreže. Svi privremeni prenaponi, posmatrano sa aspekta uzroka nastanka, se mogu svrstati u jednu od sljedeće četiri kategorije: prenaponi pri nesimetričnom radu sistema, rezonantni prenaponi, ferorezonantni prenaponi i prenaponi pri naglom umanjenju opterećenja u sistemu [17].

Do pojave privremenih prenapona pri nesimetričnom radu sistema najčešće dolazi usljed nastanka nesimetričnih poremećaja. Najznačajnije primjere nesimetričnog rada elektroenergetskog sistema predstavljaju zemljospoj u mreži i prekid jednog ili dva fazna provodnika.

U elektroenergetskim mrežama, iz različitih razloga, može doći do približavanja vrijednosti učestanosti mreže i učestanosti izvora. Sistem u kojem figurišu ovakvi parametri se nalazi u režimu linearne rezonanse. Najčešći uzroci nastanka ovakvog režima sistema predstavljaju uklopno stanje ili određeni poremećaj u sistemu. U električnim kolima je moguća pojava dvije vrste linearne rezonanse i to strujna i naponska. U situaciji kada nastupi strujna rezonansa dolazi do značajnog uvećanja maksimalnih vrijednosti struje, dok se kod naponske rezonanse pojavljuju uvećane vrijednosti napona odnosno dolazi do pojave rezonantnih prenapona. Omska otpornost koja figuriše u električnom kolu predstavlja osnovni parametar koji ograničava maksimalne vrijednosti napona i struje.

Pored linearne rezonanse, u elektroenergetskoj mreži moguća je i pojava tzv. nelinearne rezonanse. Naime, u slučaju kada u elektroenergetskoj mreži nastupi rezonansa između nelinearnih induktivnosti i kapacitivnosti elemenata mreže dolazi do pojave nelinearne rezonanse. Dakle, osnovni preduslov koji mora biti ispunjen u određenoj elektroenergetskoj mreži, u cilju nastanka nelinearne rezonanse, jeste figurisanje nelinearnih elemenata u toj mreži. Brojni su elementi elektroenergetske mreže koji se karakterišu nelinearnom induktivnošću: transformatori snage, čelične armature kablova, naponski mjerni transformatori itd. Sa druge strane, elementi sa najznačajnijom vrijednosti kapacitivnosti su elektroenergetski kablovi. Nelinearna rezonansa, između nelinearne induktivnosti magnećenja transformatora sa jedne strane i određene kapacitivnosti u mreži sa druge strane, se naziva ferorezonansom i praćenja je pojavom ferorezonantnih prenapona. Vjerovatnoća pojave ferorezonanse se značajno uvećava uzimajući u obzir činjenicu da se vrijednost induktivnosti grane magnećenja transformatora mijenja u širokom intervalu. Posmatrano sa aspekta konfiguracije električne mreže, mogu nastupiti redna ili paralelna ferorezonansa.

U slučaju naglog umanjenja opterećenja sistema dolazi do nagle promjene vrijednosti struje u djelovima električnog kola. Ova nagla promjena vrijednosti struje ima negativan efekat kod induktivnosti elemenata gdje se kao rezultat javljaju prenaponi. Elementi elektroenergetskog sistema na kojima su prenaponi usljed umanjenja opterećenja sistema najizraženiji su transformatori.

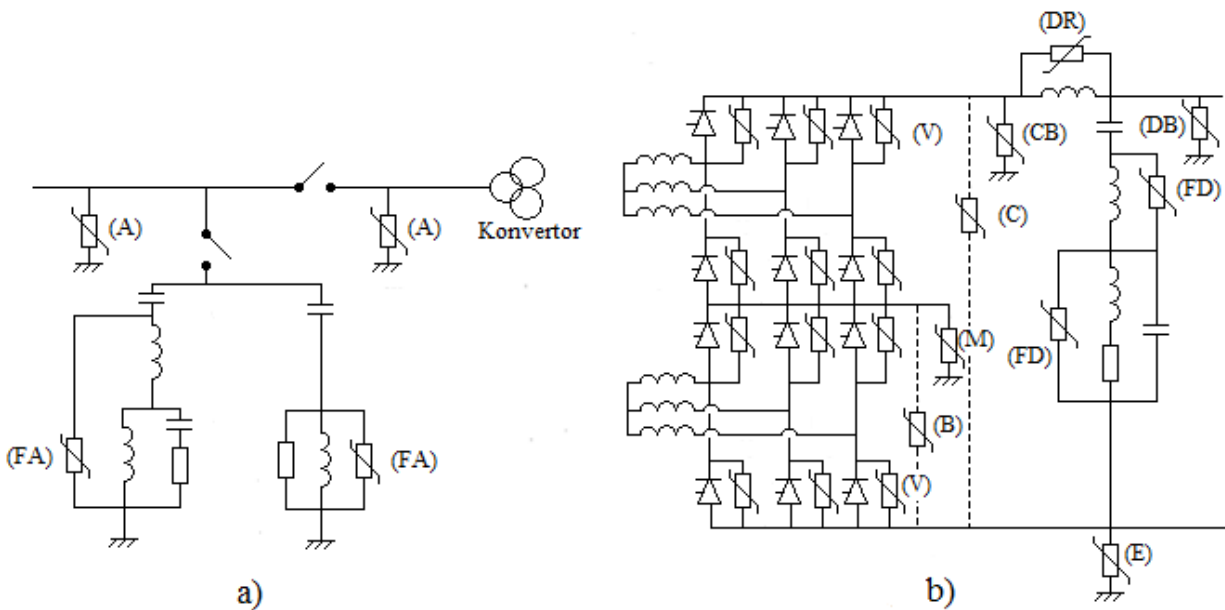
3.2 Prenaponi u HVDC sistemima

Kako bi se spriječilo naprezanje i oštećenje izolacije opreme i provodnika neophodno je ograničiti prenapone na odgovarajuću vrijednost. Kao zaštita od prenapona koriste se dvije grupe uređaja: zaštitna iskrišta i odvodnici prenapona. Takođe, za potrebe zaštite od atmosferskih prenapona u postrojenjima se koriste gromobranske instalacije i dok se kod nadzemnih vodova

upotrebljavaju zaštitna užad. Detaljnija analiza zaštitnih sredstava od prenapona, njihovih karakteristika kao i metodologija za njihov odabir je izložena u poglavlju 4.

Na slici 15. su prikazane šeme priključenja odvodnika prenapona na AC i DC strani u konvertorskoj stanici HVDC sistema [20]. Sa „A“ su označeni odvodnici prenapona priključeni između faznih provodnika i zemlje dok su sa „FA“ označeni odvodnici prenapona priključeni paralelno kalemima AC filtera. Odvodnici prenapona na slici 15. b) se mogu svrstati u jednu od sljedeće četiri grupe:

- odvodnici prenapona priključeni paralelno tiristorima, 6-pulsnom ili 12-pulsnom tiristorskom mostu (odvodnici V, M, B, CB, C),
- odvodnici prenapona priključeni između tačke pod jednosmjernim naponom i zemlje (DB),
- odvodnici prenapona koji se u normalnom pogonu nalaze pod naponom koji ima vrlo nisku vrijednost (DR, E) i
- odvodnici prenapona priključeni paralelno dijelu DC filtera koji se u normalnom pogonu nalaze pod naponom koji ima značajne vrijednosti (FD).



Slika 15. Šeme priključenja odvodnika prenapona u konvertorskoj stanici, na AC strani (a) i DC strani (b)

Osnovna razlika između odvodnika prenapona priključenih u AC sistemu i HVDC sistemu se ogleda u naponu kojem su izloženi odvodnici prenapona pri normalnom pogonu. Za razliku od radnog napona odvodnika prenapona u AC mreži koji se sastoji od harmonika osnovne učestanosti, radni napon kojem su izloženi odvodnici prenapona u HVDC sistemu se sastoji od jednosmjerne komponente, harmonika osnovne učestanosti i viših harmonika napona. Kada se analizira uticaj radnog napona na odvodnike prenapona, moraju se uzeti u obzir karakteristike tog napona. Posebna pažnja mora biti posvećena komponentama viših harmonika koje imaju veoma kratko vrijeme trajanja. Pojava takvih komponenti se ima na primjer pri komutacijama tiristorskih ventila kada se može imati neprihvatljivo velika količina energije koju je potrebno

apsorbovati u slučaju kada odvodnici prenapona nijesu pravilno dimenzionisani. Radni napon pojedinih odvodnika prenapona ima veća izobličenja dok su kod drugih ta izobličenja manja. Zbog navedenih karakteristika radnog napona kod HVDC sistema, pored referentnog napona odvodnika prenapona uvode se još dva pojma o kojima je potrebno voditi računa pri odabiru odvodnika prenapona [20]:

- PCOV (Peak Continuous Operating Voltage) – maksimalna vrijednost napona u slučaju kada se uzimaju u obzir komutacije trisitorskih ventila i
- CCOV (Crest value of Continuous Operatig Voltage) – maksimalna vrijednost napona u slučaju kada se ne uzima u obzir komutacija tristoriskih ventila.

3.2.1 Privremeni prenaponi u HVDC sistemima

Privremeni prenaponi u AC mrežama se definišu kao oscilatorni prenaponi veoma relativno dugog trajanja koji su prigušeni ili veoma slabo prigušeni. Privremeni prenaponi se najčešće javljaju kao posljedica prekidačkih operacija i kvarova u sistemu. Amplitude privremenih prenapona obično imaju uvećane vrijednosti zbog rezonanse i nelinearnosti u sistemu. Privremeni prenaponi se mogu pojaviti i na AC i na DC strani konvertorskih stanica HVDC sistema.

3.2.1.1 Privremeni prenaponi na AC strani konvertorskih stanica

Privremeni prenaponi na AC strani konvertorskih stanica su mnogo češći u odnosu na privremene prenapone na DC strani. Privremeni prenaponi dostižu najveće vrijednosti u slučaju iznenadnog potpunog rasterećenja sistema do kojeg može doći u slučaju kvara u AC sistemu ili DC sistemu [20]. Dodatno, ukoliko u slučaju kvara dođe do blokiranja konvertora prekida se potrošnja reaktivne snage pa se na taj način doprinosi naglom rasterećenju sistema. Kao rezultat toga dobijaju se još veće vrijednosti privremenih prenapona.

Blokiranje konvertora je moguće izvršiti na dva načina: sa by-pass parovima i bez njih [20]. Način blokiranja konvertora od velikog je značaja sa aspekta naprezanja odvodnika prenapona. Blokiranje konvertora uz pomoć by-pass parova se sprovodi na način što se u svakom 6-pulsnom tiristorskom mostu na dva tiristora vezana redno konstantno dovodi signal za provođenje struje, pri čemu se na taj način dobija kratak spoj konvertora na DC strani [20]. Prilikom ovakvog blokiranja konvertora odvodnici prenapona koji su priključeni paralelno tiristorskim ventilima na koje se ne dovodi okidni signal se nalaze pod djelovanjem faznog napona iz AC sistema. Sa druge strane, blokiranje konvertora bez by-pass parova se sprovodi na način što se prekida dovodenje okidnih signala svim tiristorskim ventilima [20]. U ovom slučaju se na odvodnicima prenapona priključenim paralelno tiristorskim ventilima pojavljuju naponi mnogo nižih vrijednosti.

Privremeni prenaponi na AC strani konvertorske stanice kod bipolarne konfiguracije HVDC sistema koji se javljaju kao posljedica kvara na DC vodu su obično veoma niskih vrijednosti [20]. Niske vrijednosti prenapona se imaju kao posljedica činjenice da se u najvećem broju slučajeva samo jedan DC pol nalazi u kvaru pri čemu se kompenzacija izgubljene snage vrši na način što se smanjuje snaga kroz neoštećeni DC pol [20].

Prilikom otklanjanja kvarova u AC sistemu i ponovnog uspostavljanja normalnog pogona dolazi do pojave privremenih prenapona na AC sabirnicama HVDC sistema [20]. Činjenica koja doprinosi povećanju vrijednosti ovih prenapona je blokiranje konvertora nakon kvara. Međutim,

vrijeme trajanja i amplitudu ovih privremenih prenapona je moguće smanjiti upotrebom konvertora koji imaju sposobnost brzog oporavka i ponovnog uspostavljanja normalnog pogona.

Odvodnici prenapona priključeni između faznih provodnika i zemlje na AC sabirnicama konvertorskih postrojenja, označeni sa „A“ (slika 15), su najviše izloženi naprezanjima prilikom pojave privremenih prenapona generisanih u AC mreži. Pored toga, naponi na tiristorskim ventilima su proporcionalni naponu u AC mreži pa privremeni prenaponi sa AC strane dovode do naprezanja odvodnika prenapona instaliranih paralelno tiristorskim ventilima, označenih sa „V“ (slika 15). Naprezanje ovih odvodnika prenapona postoji sve dok konvertor provodi struju odnosno do trenutka kada dođe do blokiranja konvertora.

3.2.1.2 Privremeni prenaponi na DC strani konvertorskih stanica

U slučaju određenih kvarova pri blokiranom invertoru moguće je privremeno povišenje napona na DC polu [20]. Primjer gdje se javlja povišenje napona na DC vodu se ima kada se vrši nekontrolisana energizacija ispravljača pri blokiranom invertoru na drugom kraju HVDC sistema. Teorijski posmatrano, kod kablovskog HVDC sistema prenaponi u ovom slučaju mogu dostići vrijednosti koje su iznad 2 p.u. [20]. Drugi slučaj kada je moguć nastanak prenapona sličnih vrijednosti je blokiranje invertora pri nominalnoj struji bez uključivanja by-pass parova [20]. U tom slučaju se na inverter dovodi napon osnovne učestanosti dok se najviše vrijednosti prenapona i najveća naprezanja odvodnika prenapona „DB“ (slika 15) imaju u slučaju kada rezonansa na DC strani nastupa pri učestanosti koja je jednaka ili bliska osnovnoj učestanosti [20]. Vrijednosti navedenih privremenih prenapona se mogu smanjiti na više načina. Jedan od načina je pravilno dizajniranje kontrolnog sistema ispravljača gdje se ograničava dozvoljeno smanjenje ugla uključivanja tiristora.

3.2.2 Prelazni prenaponi u HVDC sistemima

Prelazni prenaponi su prenaponi ograničenog trajanja. Prelazni prenaponi se mogu podijeliti na sljedeći način [20]:

- prelazni prenaponi sporog porasta čela talasa,
- prelazni prenaponi brzog porasta čela talasa i
- vrlo brze prelazne prenapone.

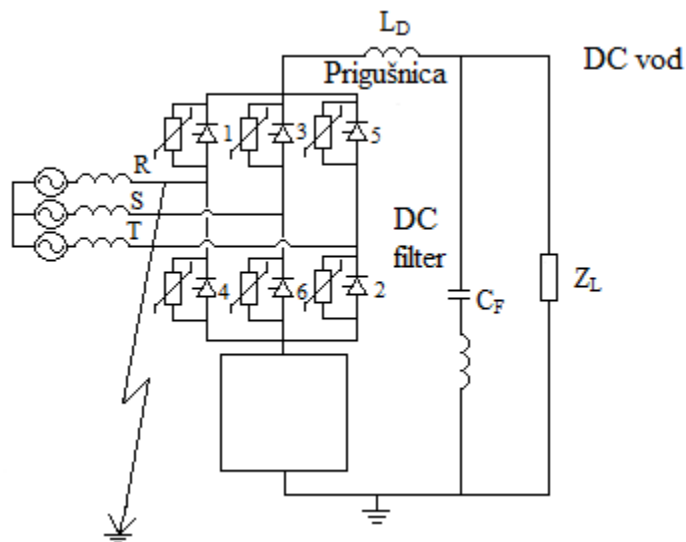
U grupu prelaznih prenapona sporog porasta čela talasa se svrstavaju sklopni prenaponi dok se u grupu prelaznih prenapona brzog porasta čela talasa svrstavaju atmosferski prenaponi. Atmosferski prenaponi obično nijesu od značaja kada je riječ o kordinaciji izolacije i naprezanjima odvodnika prenapona instaliranim u konvertorskim stanicama HVDC sistema. Izuzetak predstavljaju odvodnici prenapona priključeni na DC vodovima, elektrodama HVDC sistema i sabirnicama AC sistema. Tiristorski ventili kao i prigušnice na krajevima DC vodova predstavljaju efikasne prepreke za prostiranje atmosferskih prenapona unutar konvertorskih postrojenja. Međutim, u slučaju kvara između transformatora i tiristorskog mosta odvodnici prenapona priključeni paralelno tiristorima su izloženi prenaponima talasnog oblika sličnog onom koji se ima kod atmosferskih pražnjenja [20]. U nastavku će se pojedinačno za odvodnike prenapona instalirane u konvertorskoj stanici navesti kritični poremećaji u sistemu koji na njima izazivaju najveća naprezanja.

Kritični poremećaji za odvodnike prenapona priključene paralelno tiristorskim ventilima su [20]:

- kratki spojevi prema zemlji u AC sistemu, isključenje kvarova u AC mreži i prekidačke akcije u AC mreži,
- jednofazni kratki spoj između konvertorskog transformatora i 6-pulsnog tiristorskog mosta koji se nalazi na višem potencijalu i
- prekid struje u jednoj komutacionoj grupi.

Na vrijednosti prenapona koji se pojavljuju na odvodnicima prenapona „V“ (slika 15) u slučaju poremećaja u AC sistemu presudni uticaj ima režim rada konvertora. Ukoliko nakon poremećaja dođe do blokiranja konvertora u tom slučaju dolazi do pojave prenapona pri čemu su ti prenaponi najveće vrijednosti kada su konvertori blokirani sa by-pass parovima [20]. Međutim, ukoliko ne dođe do blokiranja konvertora već tiristori nastave da provode struju i nakon poremećaja u tom slučaju su prenaponi značajno prigušeni.

Jednofazni kratki spoj između konvertorskog transformatora i 6-pulsnog tiristorskog mosta koji se nalazi na višem potencijalu je prikazan na slici 16 [20], gdje se kratki spoj dogodio na fazi R u ispravljačkoj konvertorskoj stanici. U ovom slučaju dolazi do značajnih vrijednosti prenapona na odvodnicima prenapona priključenim u gornjoj komutacionoj grupi, odnosno na odvodnicima prenapona koji štite tiristore 1, 3 i 5 [20].



Slika 16. Jednofazni kratki spoj između konvertorskog transformatora i 6-pulsnog tiristorskog mosta koji se nalazi na višem potencijalu. Kratki spoj se ima na fazi R u ispravljačkoj konvertorskoj stanici.

Poremećaj koji takođe može ugroziti rad odvodnika prenapona „V“ (slika 15) se ima kada dođe do iznenadnog prekida struje u sva tri tiristora u jednoj komutacionoj grupi dok tiristori u drugoj komutacionoj grupi koja je vezana redno prvo nastavljaju da provode struju. U tom slučaju dolazi do prinudnog proticanja struje kroz jedan od odvodnika prenapona koji su vezani paralelno tiristorima koji ne provode struju. U tom odvodniku prenapona se oslobađa velika

količina energije pa je neophodno izvršiti prekidanje struje u što kraćem vremenu. Do navedenog poremećaja može doći iz više razloga pri čemu je najčešći razlog greška u upravljačkom sistemu.

Odvodnik prenapona „M“ (slika 15) koji je priključen u tački između dva 6-pulsna tiristorska mosta izložen je naprezanjima pri sljedećim poremećajima [20]:

- prekidačke operacije u AC mreži i
- prekid struje u donjem 6-pulsnom tiristorskom mostu.

Pri prekidu struje u donjem 6-pulsnom tiristorskom mostu odvodnik prenapona „M“ (slika 15) je izložen prenaponskom talasu sporog porasta čela talasa [20].

Odvodnik prenapona „CB“ (slika 15) je izložen naprezanjima prilikom prekidačkih operacija u AC mreži. Odvodnik prenapona „CB“ (slika 15) mora izdržati djelovanje radnog napona nakon prolaska prelaznih procesa izazvanih sklopnim operacijama u AC sistemu. Ukoliko se u konvertorskoj stanici nalazi redna veza dva 12-pulsna tiristorska mosta u tom slučaju je neophodno zaštititi oba 12-pulsna mosta na način što se paralelno njima priključuje po jedan odvodnik prenapona. U ovom slučaju odvodnici prenapona su izloženi naprezanjima pri sljedećim poremećajima [20]:

- prekid struje u jednom 12-pulsnom tiristorskom mostu i
- kratki spoj na jednom 12-pulsnom mostu.

Odvodnici prenapona koji se priključuju na krajevima DC voda („DB“ (slika 15)) su izloženi naprezanjima pri sljedećim poremećajima [20]:

- kratki spoj između DC voda i zemlje i
- atmosfersko pražnjenje na DC vodu.

Nakon nestanka navedenih poremećaja odvodnici prenapona „DB“ (slika 15) moraju imati sposobnost nastavka normalnog pogona pri radnom naponu mreže.

Odvodnik prenapona priključen na elektrodama HVDC sistema, označen sa „E“ (slika 15), se najčešće sastoji od većeg broja odvojenih odvodnika prenapona koji su priključeni u različitim tačkama elektrode. Odvodnici prenapona su realizovani tako da jedan od njih ima ulogu zaštite od prenaponskih talasa sporog porasta čela talasa dok su ostali odvodnici prenapona namijenjeni zaštititi od atmosferskih prenapona. Podešavanje načina djelovanja odvodnika prenapona prema strmini prenaponskog talasa je objašnjeno u poglavlju 4.2.1. Poremećaji pri kojima dolazi do generisanja prenaponskih talasa sporog porasta čela talasa su [20]:

- kratki spoj između DC voda i zemlje,
- jednofazni kratki spoj između konvertorskog transformatora i konvertora i
- prekid povratnog puta kod monopolarne konfiguracije.

Odvodnici prenapona „FD“ (slika 15) koji su priključeni paralelno kalemima kod DC filtera su izloženi naprezanjima pri sljedećim poremećajima [20]:

- kratki spoj na DC sabirnicama pri kojem dolazi do pražnjenja kondenzatora filtera i
- prekidačke operacije (uključenje i isključenje opterećenja) na DC sabirnicama.

Pri prvom poremećaju dolazi do pojave prenapona talasnog oblika sličnog obliku atmosferskih prenapona. Prilikom dimenzionisanja odvodnika prenapona treba voditi računa da prenaponski talas može biti pozitivnog ili negativnog polariteta.

Poremećaji pri kojima je odvodnik prenapona „DR“ (slika 15), koji se priključuje paralelno prigušnici, izložen najvećim naprezanima i prema kojima se dimenzioniše su kratki spoj između DC voda i zemlje i atmosfersko pražnjenje na DC vodu [20].

Odvodnici prenapona označeni sa „A“ (slika 15) koji se priključuju između faznih provodnika i zemlje imaju ulogu sniženja vrijednosti prenapona u slučaju kvarova u AC sistemu, prekidačkih operacija u AC sistemu kao i atmosferskih pražnjenja u AC mreži. Posebno kritičan slučaj za odvodnike prenapona „A“ (slika 15) se može imati prilikom ponovnog uspostavljanja normalnog pogona nakon otklanjanja kvara u AC mreži [20]. Naime, prilikom kratkog spoja prema zemlji u blizini AC sabirnica konvertorskog postrojenja dolazi do pojave zaostalog magnetnog fluksa u jezgru konvertorskog transformatora. Vrijednost zaostalog magnetskog fluksa zavisi od trenutka u kojem se dogodio kvar. Prilikom ponovnog uspostavljanja normalnog pogona jezgro transformatora se može nalaziti u zasićenju i kao rezultat toga generisati struje viših harmonika [20]. Kao posljedica ovoga u nekim slučajevima se mogu imati prenaponi veoma visokih amplituda. Kolika će biti vrijednost ovih prenapona zavisi od trenutka u kojem dolazi do ponovnog uspostavljanja normalnog pogona kao i od polariteta zaostalog magnetskog fluksa u jezgru transformatora. Ovaj tip prenapona može biti izbjegnuto na dva načina [20]: promjenom mrežne konfiguracije i povećanjem prigušenja u sistemu. Povećanje prigušenja se postiže sa ubrzavanjem ponovnog pokretanja konvertora.

Odvodnici prenapona „FA“ (slika 15) priključeni paralelno kalemima AC filtera su izloženi naprezanjima prilikom [20]:

- kratkog spoja prema zemlji na sabirnicama filtera i
- prekidačke operacije na sabirnicama gdje je priključen filter.

Prilikom kratkog spoja između sabirnica na kojima je priključen filter i zemlje dolazi do pražnjenja kapacitivnosti filtera i do pojave prenaponskih talasa koji imaju oblik sličan obliku atmosferskih prenapona.

4. Metodologija za odabir odgovarajuće prenaponske zaštite

U ovom poglavlju će biti riječi o uređajima za zaštitu izolacije od negativnog uticaja prenapona kao i o metodologiji za njihov adekvatan odabir. Naime, ukoliko vrijednost prenapona premašuje podnosivi napon izolacije dolazi do narušavanja karakteristika izolacije. U cilju ograničavanja vrijednosti prenapona i sprečavanja navedene situacije primjenjuju se dvije osnovne grupe uređaja: zaštitna iskrišta i odvodnici prenapona. Kako bi se izvršila efikasna zaštita izolacije od prenapona veoma je važno odabrati odgovarajuću prenaponsku zaštitu.

4.1 Zaštitna iskrišta

Ograničenje vrijednosti prenapona pomoću zaštitnih iskrišta predstavlja najjeftinije rješenje zaštite. Zaštitna iskrišta predstavljaju uređaje koji se priključuju paralelno šticelem elementu i kod kojih je preskočni napon manji od preskočnog napona šticelem elementa u sistemu. Prema tome, na iskrištima se pojavljuje preskok prije nego što dođe do preskoka na elementima u sistemu čime je obezbijedena njihova zaštita od prenapona. Konstrukcija zaštitnih iskrišta je veoma jednostavna. Osnovni dijelovi svakog zaštitnog iskrišta predstavljaju dvije metalne elektrode gdje se jedna elektroda nalazi pod naponom dok se druga elektroda nalazi na nultom potencijalu. Metalne elektrode mogu biti šiljastog oblika, kuglastog oblika ili u obliku štapova. Između elektroda zaštitnog iskrišta se nalazi izolator gdje se najčešće upotrebljava vazduh ali su u upotrebi i drugi gasovi i tečnosti. Međutim, rješenje sa iskrištima ima mnoge nedostatke među kojima su: neprecizna koordinacija izolacije zbog zavisnosti preskočnog napona od strmine prenaponskog talasa, obavezna upotreba uređaja za zaštitu od kratkih spojeva iz razloga što preskok na iskrištu predstavlja kratak spoj u mreži itd. Zbog navedenih nedostataka značajno je umanjena upotreba zaštitnih iskrišta. Zaštitna iskrišta su pronašla svoju primjenu jedino kod elektroenergetskih vodova gdje se ne primjenjuju samostalno već zajedno sa odvodnicima prenapona.

4.2 Odvodnici prenapona

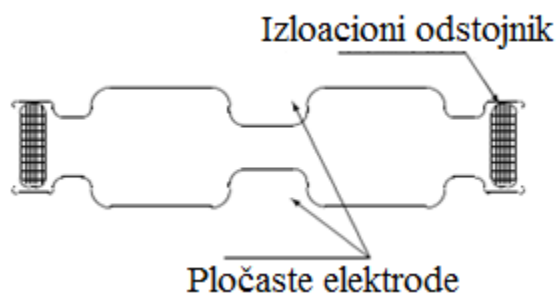
Odvodnici prenapona su uređaji čiji je zadatak da ograniče prenapone na vrijednosti koje ogovaraju izolacionom nivou opreme i na taj način spriječe oštećenje izolacije opreme. Konstrukcija odvodnika prenapona je znatno složenija od konstrukcije zaštitnih iskrišta. Odvodnici prenapona su uređaji koji se sastoje od nelinearnih otpornika koji su vezani prema zemlji. Nelinearni otpornici mijenjaju svoju otpornost u zavisnosti od primijenjenog napona. Prilikom pojave prenapona dolazi do smanjenja otpornosti ovih otpornika i kao rezultat toga se dio energije prenapona odvodi ka zemlji. Nakon nestanka prenapona otpornost odvodnika prenapona se vraća na početnu vrijednost i prekida se protok struje prema zemlji. Prema svojoj

konstrukciji, odvodnici prenapona koji su danas u upotrebi se mogu svrstati u jednu od sljedeće dvije grupe: silicijum-karbidni (SiC) i cink-oksadni (ZnO) odvodnici prenapona.

4.2.1 Silicijum-karbidni odvodnici prenapona

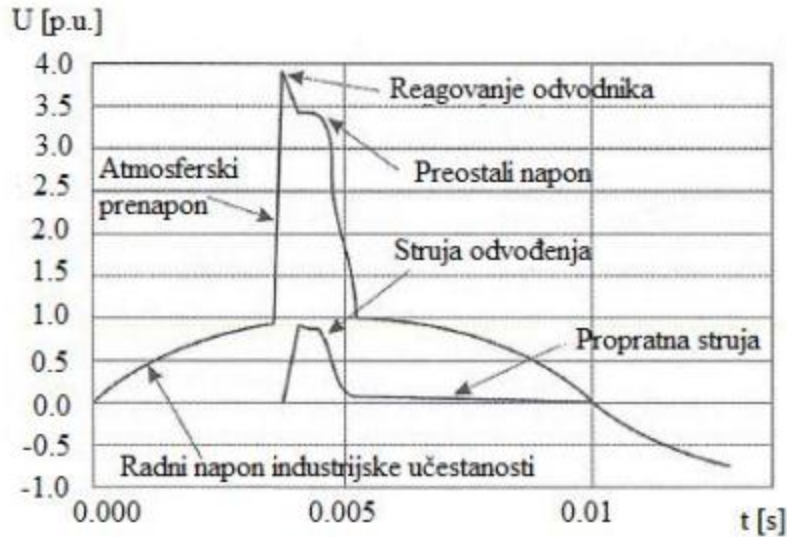
Silicijum-karbidni odvodnici prenapona u svojoj konstrukciji sadrže rednu vezu nelinearnih otpornika od silicijum-karbida i iskrišta. U trenutku kada napon premaši unaprijed definisanu vrijednost dolazi do preskoka na iskrištu i odvodnik prenapona počinje da provodi struju. Međutim, osnovni nedostatak silicijum-karbidnih odvodnika prenapona se ogleda u nemogućnosti isključenja električnog luka i struje sve do trenutka prolaska struje kroz nultu vrijednost. Na ovaj način silicijum-karbidni odvodnici prenapona nastavljaju da provode struju i nakon prolaska prenaponskog talasa a usljed djelovanja radnog napona na mjestu gdje su priključeni. Kako bi se umanjila vrijednost ove propratne struje redno sa iskrištem su vezani nelinearni otpornici od silicijum-karbida.

Iskrište kod silicijum-karbidnih odvodnika prenapona može biti realizovano na nekoliko načina. Najjednostavnije rješenje konstrukcije iskrišta je tanjirasto iskrište koje je prikazano na slici 17 [16].



Slika 17. Tanjirasto iskrište

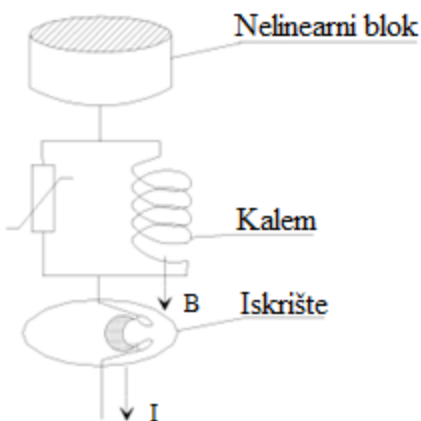
Tanjirasto iskrište se sastoji iz dvije pločaste elektrode koje su postavljene na određenom rastojanju uz pomoć izolatora koji se nalaze na njihovim krajevima. Osnovni princip na kojem se zasniva ovaj tip iskrišta je da se na mjestu gdje su dvije elektrode najbliže ima homogeno polje. Nakon nailaska prenaponskog talasa na tanjirastom iskrištu dolazi do preskoka i iskrište počinje da provodi struju. Provođenje struje traje sve dok postoji prenaponski talas. Međutim, nakon nestanka prenapona iskrište i dalje nastavlja da provodi struju industrijske učestanosti pod dejstvom radnog napona. Ova propratna struja je ograničena nelinearnim silicijum-karbidnim otpornicima i protiče sve do prolaska te struje kroz nultu vrijednost. Kao posljedica proticanja ove struje dolazi do degradacije pločastih elektroda i narušavanja homogenosti polja između dvije elektrode [16]. Sa povećavanjem broja djelovanja ovog iskrišta postepeno se i uvećava degradacija elektroda pa na taj način dolazi i do narušavanja parametara iskrišta gdje se mijenja preskočni napon iskrišta. Iz toga razloga neophodna je redovna kontrola karakteristika instaliranih tanjirastih iskrišta. Vremenska promjena napona i struja silicijum-karbidnog odvodnika prenapona u slučaju pojave atmosferskog prenapona prikazana je na slici 18 [16].



Slika 18. Vremenski dijagram napona i struja silicijum-karbidnog odvodnika prenapona pri nailasku atmosferskog prenapona.

Zadatak silicijum-karbidnih odvodnika prenapona može biti reagovanje u slučaju pojave atmosferskih prenapona ali ne i u slučaju pojave dugotrajnih prenapona kao što su sklopni prenaponi ili naponi industrijske učestanosti. Ovo je moguće postići zahvaljujući zavisnosti napona reagovanja iskrišta od strmine prenaponskog talasa [16]. Prema tome, iskrišta se konstruišu tako da napon reagovanja ima minimalnu vrijednost pri nailasku prenaponskih talasa čija je strmina čela jednaka strmini čela atmosferskih prenapona. Sa druge strane, napon reagovanja u slučaju nailaska prenapona manje strmine ima veću vrijednost pa se na taj način onemogućava njihovo djelovanje.

Glavni nedostatak tanjirastog iskrišta je provođenje propratne struje pod dejstvom radnog napona sve do prolaska te struje kroz nulu. Ovaj problem se može djelimično riješiti upotrebom iskrišta sa magnetskim oduvavanjem luka umjesto tanjirastog iskrišta. Silicijum-karbidni odvodnici prenapona sa iskrištem sa magnetskim oduvavanjem luka u svojoj konstrukciji sadrže komoru za gašenje električnog luka. U ovoj komori se stvara električno polje uz pomoć kojeg se vrši razvlačenje električnog luka pri čemu na taj način dolazi do povećavanja pada napona na električnom luku. Kao rezultat toga dolazi do umanjivanja vrijednosti propratne struje i prekidanja električnog luka prije trenutka prolaska propratne struje kroz nultu vrijednost. Na slici 19. je prikazana konstrukcija SiC odvodnika prenapona sa iskrištem sa magnetskim oduvavanjem luka [16]. Elektrode kod skoro svih iskrišta sa oduvavanjem električnog luka su u obliku jezička. Kao što se može vidjeti sa slike 19. unutar odvodnika prenapona figuriše redna veza komore za gašenje električnog luka sa nelinearnim otpornikom i kalemom koji su međusobno vezani paralelno.



Slika 19. Konstrukcija SiC odvodnika prenapona sa iskrištem sa magnetskim oduvavanjem luka

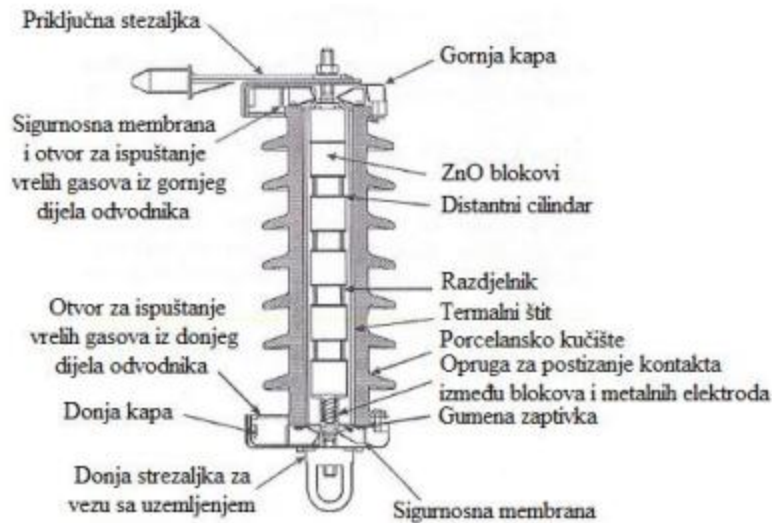
U slučaju atmosferskog pražnjenja dolazi do uspostavljanja značajne vrijednosti struje kroz odvodnik prenapona, pri čemu ova struja dominantno protiče kroz granu u kojoj se nalazi nelinearni otpornik. Objašnjenje za ovakvo ponašanje udarne struje se pronalazi u činjenici da u ovom slučaju kalem predstavlja veliku induktivnu impedansu. Na ovaj način se energija atmosferskog pražnjenja prenosi ka zemlji. Nakon prolaska atmosferskog prenapona ne dolazi do prekidanja struje kroz odvodnik prenapona. Naime, kroz odvodnik prenapona nastavlja da protiče propratna struja pod dejstvom radnog napona. Međutim, za razliku od udarne struje ova struja je sporo promjenljiva pa ona dominantno protiče kroz kalem i tom prilikom stvara magnetsko polje koje djeluje u pravcu električnog luka. Na ovaj način dolazi do razvlačenja električnog luka, povećanja pada napona na luku, smanjivanja propratne struje i konačno do njenog gašenja prije prolaska kroz nultu vrijednost.

Za razliku od atmosferskih prenapona, sklopni prenaponi se karakterišu strujom daleko manje učestanosti. Kao rezultat toga, u slučaju pojave sklopnog prenapona struja dominantno protiče kroz kalem formirajući magnetsko polje koje dovodi do uvećavanja pada napona na električnom luku. Sa uvećavanjem pada napona na električnom luku dolazi do smanjenja vrijednosti struje koja protiče kroz odvodnik prenapona. Na ovaj način spriječena su nedozvoljena velika energetska naprezanja nelinearnih silicijum-karbidnih otpornika.

U prošlosti je postojala značajna proizvodnja silicijum-karbidnih odvodnika prenapona da bi danas oni bili zamijenjeni savremenijim rješenjima. Naime, zbog velikog broja prednosti, danas su dominantno u upotrebi cink-oksadni odvodnici prenapona [17]. Iz gore navedenog razloga, u nastavku će se detaljnije govoriti isključivo o cink-oksadnim odvodnicima prenapona.

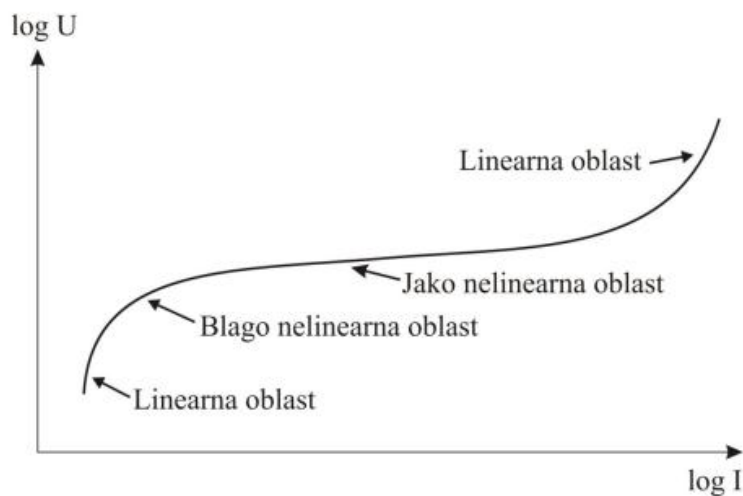
4.2.2 Cink-oksadni (metal-oksadni) odvodnici prenapona

Dvije osnovne i najznačajnije prednosti ZnO odvodnika prenapona u odnosu na SiC odvodnike prenapona se ogledaju u strukturi i načinu rada. Zahvaljujući ovim prednostima ZnO odvodnici prenapona u posljednje vrijeme pronalaze sve češću primjenu. Suštinska razlika u odnosu na SiC odvodnike prenapona se ogleda u odsustvu zaštitnog iskrišta kod ZnO odvodnika prenapona. Strukturu ZnO odvodnika prenapona čini kućište u obliku cilindra unutar kojeg su smješteni nelinearni otpornici u obliku diskova. Osnovne komponente ZnO odvodnika prenapona su prikazane na slici 20 [21].



Slika 20. Poprečni presjek ZnO odvodnika prenapona

Cink-oksadni odvodnici prenapona su opisani sa električnim i termičkim karakteristikama. Funkcionisanje svakog ZnO odvodnika prenapona je opisano volt-amperskom karakteristikom i ona predstavlja osnovnu električnu karakteristiku tog odvodnika prenapona. Druga značajna prednost ZnO odvodnika prenapona u odnosu na SiC odvodnike prenapona, pored prednosti sa aspekta strukture, se ogleda u pogodnijem obliku volt-amperske karakteristike. Na slici 21. je data volt-amperska karakteristika metal-oksidnog odvodnika prenapona [17].



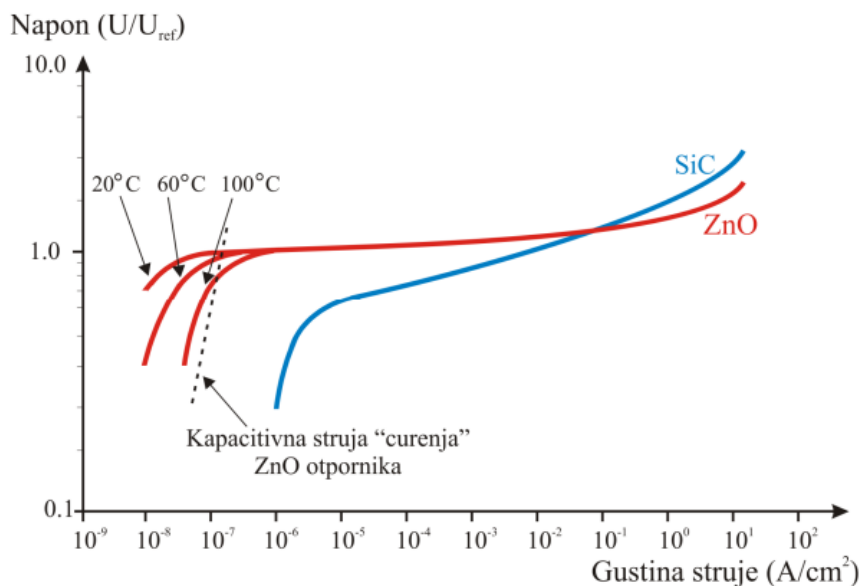
Slika 21. Volt-amperska karakteristika ZnO odvodnika prenapona

Analizirajući oblik volt-amperske karakteristike prikazane na slici 21, za različite opsege struje moguće je izdvojiti različite regione karakteristike. U prvom regionu, koji odgovara vrijednostima struje reda μA , napon linearno raste sa porastom struje pa ovaj region predstavlja linearnu oblast karakteristike. Sljedeći region volt-amperske karakteristike odgovara vrijednostima napona koje su iznad vrijednosti trajnog radnog napona. Ovaj region karakteristike

odgovara trenutku uključenja silicijum-karbidnih odvodnika prenapona, jer se u ovom opsegu vrijednosti napona uočava brže uvećanje vrijednosti struje kroz odvodnik prenapona. Treći region karakteristike, nazvan jako nelinearna oblast, odgovara veoma širokom opsegu vrijednosti struje kroz odvodnik prenapona. Međutim, iako se u ovom regionu radi o veoma širokom opsegu vrijednosti struje njemu odgovara jako uzak opseg vrijednosti napona. Četvrti region volt-amperske karakteristike odgovara izuzetno visokim vrijednostima struje kroz odvodnik prenapona. Sa slike 21. se može konstatovati da karakteristika u ovom regionu bilježi rast sličan onom iz prvog regiona karakteristike.

Parametar koji ZnO odvodnicima prenapona obezbjeđuje daleko bolje performanse u radu u odnosu na ostale tipove odvodnika prenapona jeste koeficijent nelinearnosti otpornika. Naime, vrijednost ovog koeficijenta kod ZnO odvodnika prenapona je daleko iznad vrijednosti kod ostalih tipova odvodnika prenapona.

U cilju poređenja performansi ZnO i SiC odvodnika prenapona, na slici 22. su date njihove strujno-naponske karakteristike [17]. Na apcisi su prikazane vrijednosti gustine struje koja protiče nelinearnim otpornikom dok je na ordinati prikazan napon u jediničnim vrijednostima. Za referentnu vrijednost napona je uzeta vrijednost trajnog radnog napona.

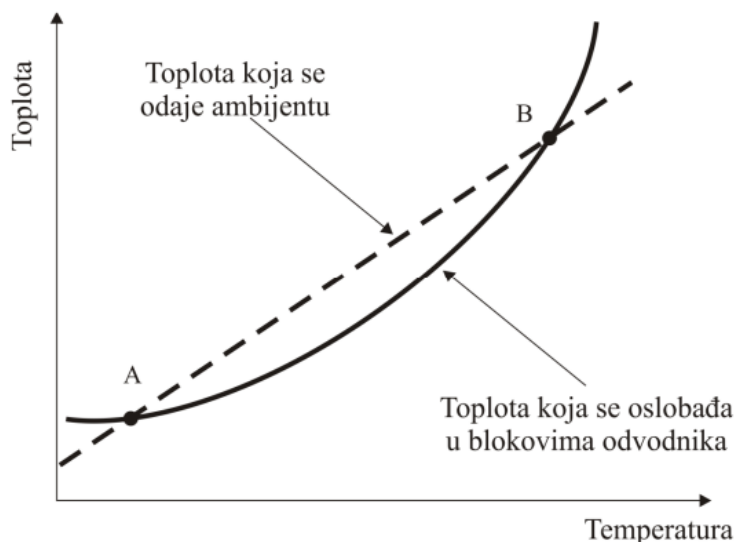


Slika 22. Volt-amperske karakteristike ZnO i SiC odvodnika prenapona

Posmatrajući prethodnu sliku moguće je dati objašnjenje neophodnosti postojanja zaštitnog iskrišta kod SiC odvodnika prenapona. Naime, riječ je o vrijednosti struje koja bi proticala kroz silicijum-karbidni odvodnik prenapona pri jediničnom naponu. Sa slike se vidi da pri toj vrijednosti napona gustina struje kroz odvodnik prenapona iznosi par mA/cm². Uzimajući u obzir činjenicu da se ovdje radi o trajnom naponu kojem je izložen odvodnik prenapona, može se doći do zaključka da bi neprekidno proticanje ove struje dovelo do neprihvatljivo velikih termičkih naprezanja odvodnika prenapona. Iz navedenog razloga SiC odvodnici prenapona u svojoj konstrukciji moraju sadržati zaštitno iskrište. Sa druge strane, sa slike 22. se može vidjeti da je pri istoj vrijednosti napona gustina struje kroz metal-oksadni odvodnik prenapona daleko manja. Zahvaljujući ovakvom obliku strujno-naponske karakteristike, kod cink-oksadnih odvodnika prenapona ne postoji potreba za postojanjem zaštitnog iskrišta.

Pored električnih karakteristika metal-oksidnih odvodnika prenapona veoma su značajne i termičke karakteristike. Naime, prilikom proticanja struje kroz nelinearne otpornike dolazi do pojave Džulovih gubitaka odnosno do oslobađanja toplote koja se nakon toga širi u okolni prostor. Kolika će biti generisana toplota u nelinearnim otpornicima zavisi od režima rada odvodnika prenapona, odnosno od vrijednosti struje kroz odvodnik prenapona. S obzirom da kod ZnO odvodnika prenapona ne postoji zaštitno iskrište, kroz ove odvodnike prenapona u slučaju normalnog napona prolazi struja jako niske vrijednosti. Količina toplote generisana u ovom slučaju ima malu vrijednost. Međutim, toplota koja se oslobađa u slučaju kada je odvodnik prenapona izložen djelovanju prenaponskog talasa je mnogostruko veća.

Značaj uspostavljanja ravnotežnog termičkog stanja odvodnika prenapona se može objasniti kroz sljedeći proces. Do postepenog zagrijavanja nelinearnih otpornika može doći ako se u okolni prostor odaje manje toplote od vrijednosti koja se oslobađa u otpornicima. Kako je vrijednost otpornosti nelinearnih otpornika zavisna od njihove temperature, to će sa zagrijavanjem otpornika doći do opadanja vrijednosti otpornosti. Opadanje otpornosti nelinearnih otpornika će uzrokovati dodatni porast vrijednosti struje a to će omogućiti nastavak procesa zagrijavanja otpornika. Dakle, na ovaj način se postiže kumulativan efekat koji se naziva termički pobjeg [16]. Iz navedenog razloga, termički pobjeg se mora spriječiti postizanjem ravnotežnog termičkog stanja odvodnika prenapona u kojem postoji balans između toplote koja se oslobađa u otpornicima i toplote koja se odvodi u okolni prostor. Termička ravnoteža kod cink-oksidnih odvodnika prenapona je opisana na slici 23 [17].



Slika 23. Termička ravnoteža cink-oksidnih odvodnika prenapona

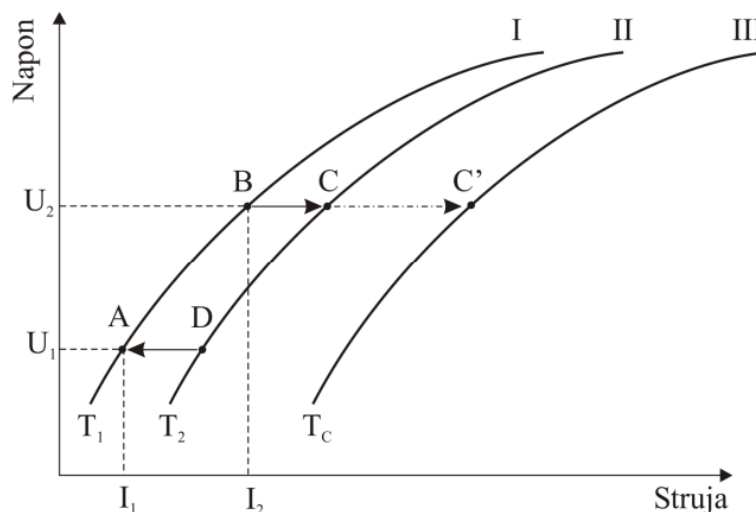
Na slici 23. su prikazane funkcije zavisnosti toplote koja se odaje ambijentu i toplote koja se oslobađa u otpornicima od temperature otpornika. Takođe, prikazane su dvije karakteristične tačke, tačke A i B, koje se dobijaju u presjeku ove dvije funkcije. Posmatrano sa aspekta termičke ravnoteže odvodnika prenapona između ove dvije tačke postoji velika razlika. Naime, kada se odvodnik prenapona nalazi u tački A, sa povećanjem temperature otpornika funkcija koja odražava toplotu predatu okolini bilježi veći rast od funkcije koja se odnosi na razvijenu toplotu. Drugim riječima, dolazi do procesa hlađenja odvodnika prenapona. Sa druge strane, kada se

odvodnik prenapona nalazi u tački B, pri povećavanju temperature otpornika postoji suprotan odnos dvije funkcije što kao posljedicu ima postepeno zagrijavanje odvodnika prenapona.

Kao što je rečeno ranije, proticanje struje jako malog intenziteta kroz ZnO odvodnike prenapona u normalnom pogonu je uslovljeno nepostojanjem zaštitnog iskrišta. S obzirom da ova struja, iako se radi o veoma maloj vrijednosti, dovodi do blagog zagrijavanja odvodnika prenapona veoma je važno obezbijediti stanje termičke ravnoteže odvodnika u normalnom pogonu. S tim u vezi, osnovna veličina koju je neophodno uzeti u obzir prilikom utvrđivanja termičke ravnoteže odvodnika je trajni radni napon koji se definiše kao efektivna vrijednost radnog faznog napona industrijske učestanosti na koji se odvodnik prenapona može trajno priključiti.

U situacijama kada vrijednost napona premaši određenu vrijednost pri kojoj dolazi do termičkog pobjega, dolazi do postepenog uvećavanja temperature odvodnika prenapona. Sa druge strane, ukoliko se po završetku prelaznog procesa vrijednost napona vrati na vrijednost trajno dozvoljenog napona, dolazi do postepenog hlađenja odvodnika prenapona i ponovnog uspostavljanja njegove termičke ravnoteže. Na osnovu prethodnog se može reći da proces termičkog pobjega odvodnika ima ograničeno trajanje koje zavisi od primijenjenog napona na odvodniku.

Jedna od karakteristika ZnO odvodnika prenapona je i toplotna inercija koja im obezbjeđuje sporiju promjenu temperature. Ova toplotna inercija ima veoma važnu ulogu sa aspekta izdržljivosti odvodnika prenapona u situacijama kada dođe do pojave privremenih prenaponskih talasa. Toplotna inercija cink-oksidnih odvodnika prenapona je opisana na slici 24 [16].



Slika 24. Toplotna inercija cink-oksidnih odvodnika prenapona

Na slici 24. sa T_1, T_2 i T_c su označene različite temperature odvodnika prenapona dok su sa I, II i III označene funkcije zavisnosti preostalog napona odvodnika prenapona od struje kroz odvodnik. Kao što se može vidjeti funkcija koja odražava preostali napon na odvodniku prenapona veoma zavisi od temperature odvodnika. Dakle, shodno opisanom kumulativnom efektu, povećanju struje odgovara povećanje temperature odvodnika što je praćeno odgovarajućim pomjeranjem karakteristike. Normalni radni režim odvodnika prenapona u kojem je nad njim primijenjen trajni radni napon U_1 , kroz njega protiče struja I_1 i u kojem je njegova

temperatura T_1 opisan je radnom tačkom A koja se nalazi na krivoj I. U situaciji kada dođe do promjene napona primijenjenog nad odvodnikom, kao posljedica pojave prenapona, sa vrijednosti U_1 na vrijednost U_2 dolazi do promjene vrijednosti struje kroz odvodnik koja sada iznosi I_2 . Zbog toplotne inercije odvodnika, njegova temperatura se ne može trenutno mijenjati, pa je odvodnik i dalje opisan krivom I pri čemu se sada nalazi u radnoj tački B. S obzirom da sada kroz odvodnik protiče struja veće vrijednosti dolazi do postepenog zagrijavanja odvodnika, odnosno do izmještanja krive preostalog napona. Kao posljedica povećanja temperature odvodnika dolazi do smanjenja njegove otpornosti što kao rezultat ima dalje povećanje vrijednosti struje kroz odvodnik. Nakon određenog vremena odvodnik prenapona postiže temperaturu T_2 pri kojoj sada važi kriva zaostalog napona II i odvodnik prenapona se nalazi u radnoj tački C. Vrijeme trajanja ovakvog kumulativnog procesa je određeno postojanjem napona U_2 . Naime, ukoliko se nastavi izloženost odvodnika prenapona naponu U_2 dolazi do daljeg zagrijavanja odvodnika. Prelomni trenutak u ovom procesu predstavlja postizanje kritične temperature odvodnika prenapona T_c pri kojoj se ima njegov termički pobjeg. Sa druge strane, ukoliko se vrijednost napona vrati na prvobitnu vrijednost to će biti praćeno smanjenjem vrijednosti struje kroz odvodnik i na taj način proces zagrijavanja odvodnika se zaustavlja. Zbog termičke inercije odvodnika, njegova radna tačka ostaje na krivoj II ali sada ona odgovara naponu U_1 (radna tačka D). Odvodnik prenapona ne ostaje da radi u radnoj tački D iz razloga što je došlo do smanjenja vrijednosti struje kroz odvodnik i dolazi do njegovog postepenog hlađenja. Sa promjenom temperature odvodnika mijenja se i kriva zaostalog napona pa se kao rezultat ovoga dobija početna kriva I i radna tačka A.

Prilikom odabira metal-oksidnih odvodnika potrebno je proći kroz sljedeće faze [17]:

- Utvrđivanje sistemskih parametara,
- analiza rada u posebnim uslovima i
- odabir naznačenog napona odvodnika.

S obzirom da elektroenergetski sistem predstavlja veoma dinamičan sistem u kojem su neprekidno prisutne promjene pogonskih uslova, za radni napon se definiše dopušteni opseg u kojem se može mijenjati njegova vrijednost. Shodno tome, za svaku elektroenergetsku mrežu se definiše najviši dopušteni radni napon mreže. Posmatrano sa aspekta odabira cink-oksidnih odvodnika prenapona ovaj napon predstavlja najznačajniji sistemski parametar. Njegova vrijednost je najčešće 5-10 % veća od vrijednosti naznačenog napona mreže.

Amplituda privremenog prenapona predstavlja drugi sistemski parametar koji je od interesa prilikom odabira ZnO odvodnika prenapona. Takođe, kod odabira odgovarajućeg ZnO odvodnika prenapona neophodno je uzeti u obzir i vrijeme trajanja prenapona. Vrijeme trajanja privremenog prenapona kojem će biti izložen odvodnik prenapona je određeno djelovanjem zaštite koja je instalirana u mreži. Međutim, ukoliko nije poznato na koji način djeluje prenaponska zaštita u tom slučaju se koriste vremena trajanja privremenih prenapona koja su propisana standardima.

Drugi korak u procesu odabira cink-oksidnih odvodnika prenapona predstavlja analizu rada u posebnim uslovima. Naime, u mreži se mogu dogoditi situacije kod kojih se dobijaju veće vrijednosti napona u odnosu na očekivane. Iz toga razloga neophodno je razmatrati različite moguće poremećaje u sistemu kako bi se napravio ispravan izbor odvodnika prenapona. Primjer ovih situacija se ima u uzemljenim mrežama gdje je na fazama provodnika koje nijesu pogođene kvarom moguća pojava prenapona vrijednosti veće od očekivane. Pored toga, u sistemu je

moгуća pojava razliĉitih tipova kvarova kao i njihovih kombinacija kada se pojavljuju izuzetno visoke vrijednosti prenapona. Ovakve poremećaje u sistemu je takođe neophodno uzeti u obzir prilikom odabira odvodnika prenapona. Primjer ovakve situacije predstavlja pojava zemljospoja i prekida napajanja konzuma u istom vremenskom intervalu [16]. Sa druge strane, neophodno je voditi računa i o vjerovatnoći pojave određenih situacija u elektroenergetskom sistemu jer je ekonomski neopravdano razmatrati situacije ĉija je vjerovatoća pojave izuzetno mala.

Kako bi se izvršio pravilan izbor odvodnika prenapona potrebno je proraĉunati dvije vrijednosti naznaĉenog napona i to [16]:

- naznaĉeni napon zasnovan na trajnom radnom naponu i
- naznaĉeni napon zasnovan na prenaponu koji se javlja prilikom zemljospoja.

Prvi naĉin proraĉuna koji se zasniva na trajnom radnom naponu je dat prema relaciji (3):

$$U_{Ro} = \frac{U_c}{K_o} \quad (3)$$

gdje je :

U_c – trajni radni napon,
 K_o – faktor izrade ĉiju vrijednost daje proizvođaĉ.

Vrijednost trajnog radnog napona zavisi od naĉina uzemljenja mreže kao i od dužine trajanja zemljospoja u posmatranoj mreži.

Drugi naĉin koji se zasniva na prenaponu koji se javlja prilikom zemljospoja je dat prema relaciji (4):

$$U_{Rt} = \frac{U_t}{K_t} \quad (4)$$

gdje je :

U_t – prenapon koji se javlja pri zemljospoju,
 K_t – koeficijent pomoću kojeg se uzima u obzir izdržljivost odvodnika prenapona na djelovanje prenapona.

Prenapon koji se javlja prilikom zemljospoja se proraĉunava kao proizvod trajnog radnog napona i faktora zemljospoja. Vrijednost faktora zemljospoja zavisi od naĉina uzemljenja mreže i kod direktno uzemljenih mreža ima vrijednost od 1.4 dok kod izolovanih mreža ima vrijednost 1.73 [16].

Od dva prethodno proraĉunata naznaĉena napona od interesa je onaj koji ima veću vrijednost. Dobijena vrijednost najĉešće odstupa od vrijednosti naznaĉenih napona odvodnika koje nude proizvođaĉi. Iz toga razloga, neophodno je odabrati odvodnik prenapona koji ima prvu veću vrijednost naznaĉenog napona.

5. Softverski alat Simulink

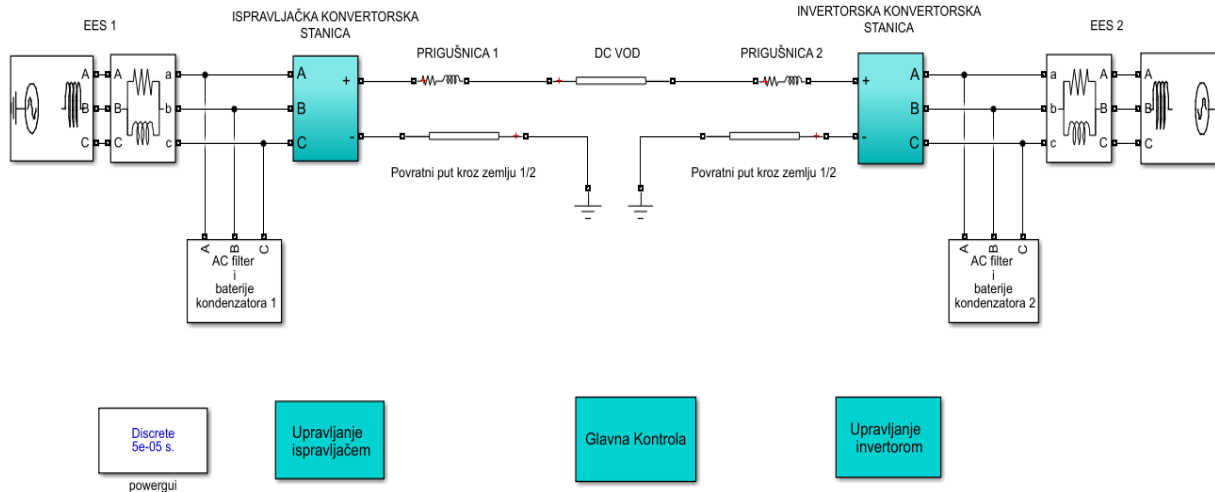
Za potrebe proračuna u ovom radu će se koristiti Matlab-Simulink. Matlab predstavlja programski paket, namijenjen prvenstveno studentima i istraživačima, koji omogućava analizu podataka, razvoj algoritama i kreiranje različitih tipova modela. Matrice čine osnovnu strukturu za sve numeričke proračune koji se sprovode u Matlab-u. Ovaj program nudi fleksibilno okruženje, veliki broj prethodno ugrađenih funkcija kao i mogućnost programiranja. Sve prethodno navedeno je dovelo do toga da milioni ljudi širom svijeta koriste upravo ovaj programski paket za rješavanje različitih inženjerskih problema.

U okviru Matlab-a ugrađen je Simulink Toolbox. Simulink Toolbox predstavlja programski alat koji nudi grafičko okruženje u kojem je moguće opisno skicirati željeni sistem i izvršiti njegovu simulaciju. U Simulink-u se mogu modelovati različiti tipovi sistema među kojima su i elektroenergetski sistemi ili njegovi djelovi.

Pokretanje Simulink-a se vrši naredbom „Simulink” u komandnom prozoru Matlab-a. Nakon što je pokrenut Simulink moguće je kreirati odgovarajući model sistema. Jedan model sistema je predstavljen kao blok dijagram sastavljen od blokova i linija. Blokovi u modelima se mogu iskoristiti za generisanje, modifikovanje i kombinovanje signala dok linije prenose signale od jednog ka drugom bloku. U Simulink-u postoje odgovarajuće biblioteke u kojima se nalazi veliki broj već formiranih blokova i koji se mogu iskoristiti u kreiranju modela. Do tih biblioteka je moguće doći pomoću ikone „Library Browser” u komandnom prozoru Simulinka. Najvažnije među dostupnim bibliotekama su : Simulink, Control System Toolbox i Simscape. Nakon odabira potrebnih blokova iz biblioteka moguće je izvršiti podešavanje njihovih parametara i na taj način ih prilagoditi potrebama sistema koji se kreira. Nakon formiranja modela, neophodno je odabrati metodu integracije (Solver). Takođe, moguće je izvršiti dodatna podešavanja parametara simulacije kao što je korak odabiranja tokom simulacije, vrijeme trajanja simulacije itd. Pokretanje simulacije se izvršava pomoću ikone „Run” u komandnom prozoru Simulink-a.

5.1 Modelovanje HVDC sistema u Simulink-u

Kao što je već rečeno, u Simulink-u je moguće modelovati elektroenergetske sisteme ili njihove dijelove. Fizičke komponente elektroenergetskog sistema kao što su generatori, transformatori, vodovi i potrošači su predstavljeni odgovarajućim blokovima čije je parametre moguće podešavati. Modeli osnovnih dijelova elektroenergetskog sistema se nalaze u biblioteci „Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Fundamental Blocks/Elements”. Svaki od ovih blokova ima svoje priključke preko kojih se povezuje sa ostalim blokovima u sistemu. Ti priključci mogu biti energetska ili signalna. Preko energetska priključaka se realizuju fizičke veze između elemenata kojim se prenosi električna energija u oba smjera. Sa druge strane, signalni portovi služe za prenos signala između elemenata, pri čemu je taj prenos samo u jednom smjeru. U ovom radu Simulink će se koristiti za modelovanje HVDC sistema. Primjer modela HVDC sistema u Simulink-u dat je na slici 25 [22].



Slika 25. Model monopolarnog HVDC sistema u Simulink-u

U narednim poglavljima će biti objašnjeno modelovanje dijelova sistema prikazanog na prethodnoj slici.

5.1.1 Model elektroenergetskog sistema

Elektroenergetski sistem je modelovan rednom vezom trofaznog naponskog izvora i RL grane u kojoj su otpornost i induktivnost paralelno vezane.

Trofazni naponski izvor se sastoji od tri jednofazna naponska izvora spregnuta u zvijezdu. Zvezdište posmatranog trofaznog naponskog izvora je direktno uzemljeno. U simulacijama analiziranim u radu pretpostavlja se simetrični trofazni sistem pa je iz toga razloga dovoljno definisati nominalni linijski napon izvora kao i fazni stav napona faze A. Impedansa trofaznog naponskog izvora se može definisati direktno, unošenjem vrijednosti za unutrašnju otpornost i induktivnost izvora, ili indirektno kroz definisanje parametara kratkog spoja. Za potrebe ovog rada ovi parametri su definisani direktno. Bazna vrijednost napona za posmatrani izvor je po pravilu jednaka nominalnoj vrijednosti linijskog napona izvora. Parametri trofaznih naponskih izvora koji se koriste u simulacijama su prikazani u tabeli 1.

Tabela 1. Parametri trofaznih naponskih izvora

PARAMETRI	JEDINICA	VRIJEDNOST
Linijski napon	kV	400
Fazni stav napona faze A	deg	0
Frekvencija	Hz	50
Unutrašnja otpornost izvora	Ω	0
Unutrašnja induktivnost izvora	mH	98.03
Bazni napon	kV	400

Prethodno definisani parametri trofaznog naponskog izvora se koriste samo pri inicijalizaciji simulacionog modela sistema. Referentne vrijednosti modula i faznih stavova napona se definišu u zavisnosti od režima rada trofaznog naponskog izvora. Dostupna su tri

režima rada i to : „swing”, „PV” i „PQ” režim rada. Odabirom na „swing” režim rada dobija se balansni način rada izvora. U ovom režimu se na sabirnicama na kojima je priključen izvor kontroliše moduo i fazni stav napona na osnovu proračuna tokova snaga. Za potrebe svih simulacija u radu se koristi trofazni naponski izvor koji radi u balansnom režimu rada.

Redna RL grana predstavlja paralelnu vezu otpornosti i induktivnosti. Sa ovom RL granom se modeluje elektroenergetska mreža koja se nalazi između trofaznog naponskog izvora i odgovarajuće konvertorske stanice. Vrijednosti ovih parametara su date u tabeli 2.

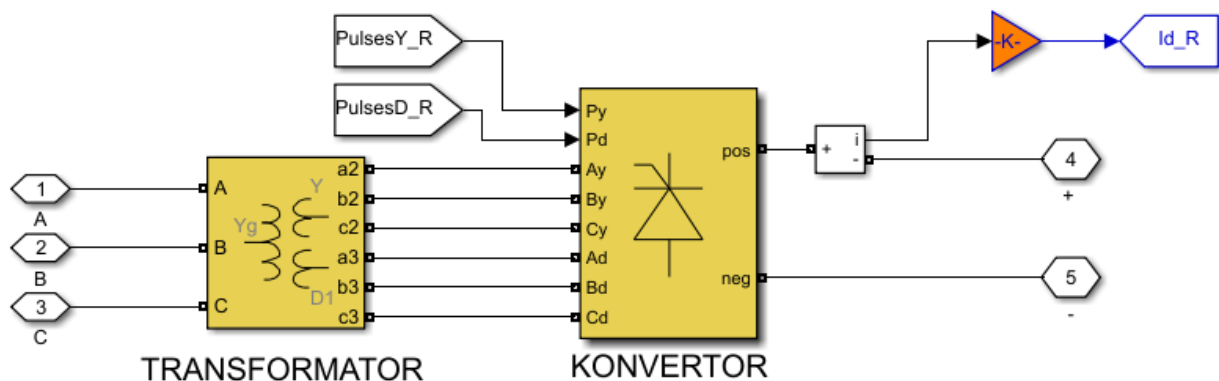
Tabela 2. Parametri paralelne RL grane

PARAMETRI	JEDINICA	VRIJEDNOST
Otpornost	Ω	6.205
Induktivnost	mH	13.96

5.1.2 Model konvertorske stanice

U konfiguraciji svakog HVDC sistema egzistiraju najmanje dvije konvertorske stanice od kojih jedna radi u ispravljačkom dok druga radi u invertorskom režimu rada. U modelu HVDC sistema prikazanog na slici 25. konvertorske stanice su predstavljene kao „SubSystem” blokovi.

SubSistem „ISPRAVLJAČKA KONVERTORSKA STANICA” je prikazan na slici 26 [22].



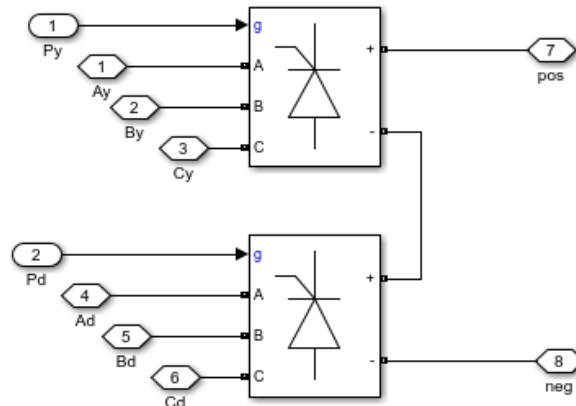
Slika 26. SubSistem „ISPRAVLJAČKA KONVERTORSKA STANICA”

U sklopu ispravljačke konvertorske stanice se nalaze konvertorski transformator i konvertor. Konvertorski transformator je modelovan trofaznim tronamotajnim transformatorom koji je izveden u formi tri jednofazna transformatora. Primarni namotaj je spregnut u uzemljenu zvijezdu (Yg), sekundarni u zvijezdu (Y) dok je tercijerni spregnut u trougao (D). Nominalna snaga transformatora iznosi 885 MVA dok je nominalna frekvencija 50 Hz. Ostali parametri konvertorskog transformatora su dati u tabeli 3.

Tabela 3. Parametri konvertorskog transformatora

PARAMETRI	JEDINICE	VRIJEDNOST
Linijski napon primara	kV	400
Otpornost primarnog namotaja	p.u.	0.0025
Induktivnost primarnog namotaja	p.u.	0
Linijski napon sekundara	kV	200
Otpornost sekundarnog namotaja	p.u.	0.0025
Induktivnost sekundarnog namotaja	p.u.	0.24
Linijski napon tercijera	kV	200
Otpornost tercijernog namotaja	p.u.	0.0025
Induktivnost tercijernog namotaja	p.u.	0.24
Otpornost magnećenja	p.u.	500
Induktivnost magnećenja	p.u.	500

Na slici 26. na kojoj je prikazana ispravljačka konvertorska stanica konvertor je predstavljen kao SubSystem koji je prikazan na slici 27. [22].



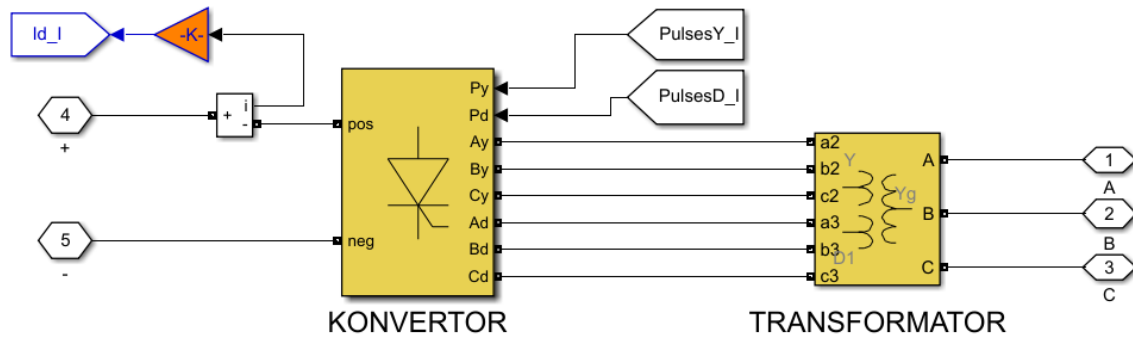
Slika 27. SubSystem „KONVERTOR” u ispravljačkoj konvertorskoj stanici

Na slici 27. je prikazano modelovanje 12-pulsnog LCC konvertora. Ovaj konvertor se realizuje kao redna veza dva 6-pulsna konvertora. 6-pulsni konvertor je modelovan sa univerzalnim mostom koji je realizovan kao trofazni konvertor sa šest tiristora u Grecovom spoju. Parametri 6-pulsnog konvertora su dati u tabeli 4.

Tabela 4. Parametri 6-pulsnog konvertora

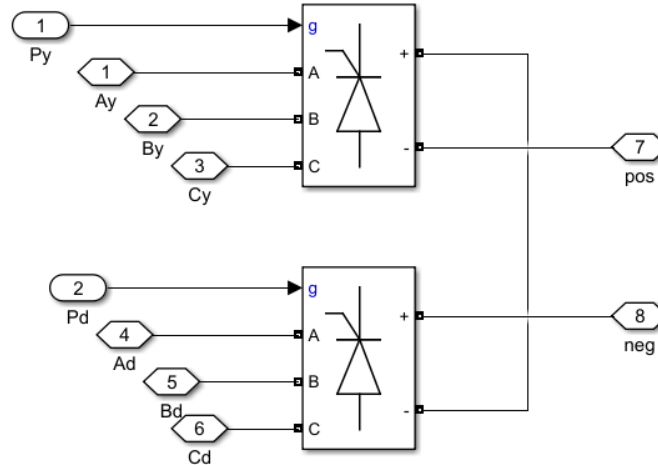
PARAMETRI	JEDINICE	VRIJEDNOSTI
Otpornost „Snubber”-a	Ω	2000
Induktivnost „Snubber”-a	μH	0.1
Otpornost tiristora	$\text{m}\Omega$	1
Induktivnost tiristora	H	0

SubSistem invertorske konvertorske stanice sa slike 25. je prikazan na slici 28 [22].



Slika 28. SubSystem „INVERTORSKA KONVERTORSKA STANICA”

Parametri konvertorskog transformatora i 12-pulsnog konvertora unutar invertorske konvertorske stanice su identični parametrima elemenata u ispravljačkoj konvertorskoj stanici. Razlika između ove dvije konvertorske stanice je u načinu povezivanja 12-pulsnog konvertora sa DC vodom. Naime, pozitivni pol DC voda se priključuje na negativni pol 12-pulsnog konvertora dok se negativni pol voda priključuje na pozitivni pol konvertora. Povezivanjem na ovakav način i uz primjenu odgovarajućeg ugla uključivanja tiristora dobija se invertorski režim rada. Na slici 29. je prikazan SubSystem „KONVERTOR” sa slike 28 [22]. Upravljanje konvertorima HVDC sistema je objašnjeno u posebnom poglavlju.



Slika 29. SubSystem „KONVERTOR” u invertorskoj konvertorskoj stanici

5.1.3 Model DC voda

U zavisnosti od konfiguracije HVDC sistema, DC vod može sadržati različite komponente. Provodnici DC voda kao i povratni put kroz zemlju su modelovani vodom sa distribuiranim parametrima. Model voda sa distribuiranim parametrima se zasniva na Beržeronovoj metodi prostiranja talasa duž voda. U ovom modelu distribuirani LC vod, bez gubitaka, je okarakterisan sa dva parametra i to: karakterističnom impedansom i brzinom prostiranja talasa. U modelima

analiziranim u radu provodnici su modelovani jednom fazom ovog voda čija je nominalna frekvencija 50 Hz. Frekvencija definisana za ovaj vod se koristi za proračunavanje otpornosti, induktivnosti i kapacitivnosti voda po jedinici dužine. Iako kapacitivnost i induktivnost DC voda ne utiču na prenos električne energije pri jednosmjernom naponu, ove parametre je neophodno unijeti radi samog proračuna koji se sprovodi u Simulink-u. Za potrebe ovog rada dovoljno je definisati direktne komponente ovih parametara i njihove vrijednosti su date u tabeli 5. Dužina voda se u simulacijama analiziranim u radu mijenja u odgovarajućem opsegu pa se iz toga razloga ovaj parametar neće direktno definisati već će se njegova vrijednost podešavati unutar odgovarajućeg pomoćnog programa.

Tabela 5. Parametri voda

PARAMETRI	JEDINICA	VRIJEDNOST
Direktna otpornost voda	Ω/km	0.015
Direktna induktivnost voda	mH/km	0.792
Direktna kapacitivnost voda	$\mu\text{F}/\text{km}$	14.4

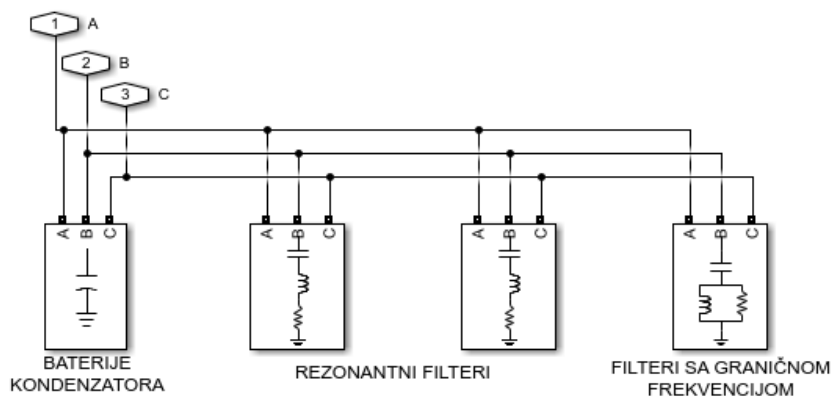
Prigušnice koje se nalaze na krajevima DC voda su modelovane radnim RLC granama. Redna RLC grana predstavlja rednu vezu otpornosti, induktivnosti i kapacitivnosti. Redne RLC grane koje se koriste u radu za modelovanje prigušnica su RL tipa, odnosno sastoje se iz otpornosti i induktivnosti. Vrijednosti ovih parametara su date u tabeli 6.

Tabela 6. Parametri redne RL grane

PARAMETRI	JEDINICE	VRIJEDNOSTI
Otpornost	Ω	1
Induktivnost	H	0.5

5.1.4 Model filtera i baterija kondenzatora

AC filteri i baterije kondenzatora su u modelu prikazanom na slici 25. predstavljeni kao „SubSystem”. Taj SubSystem je prikazan na slici 30 [22].

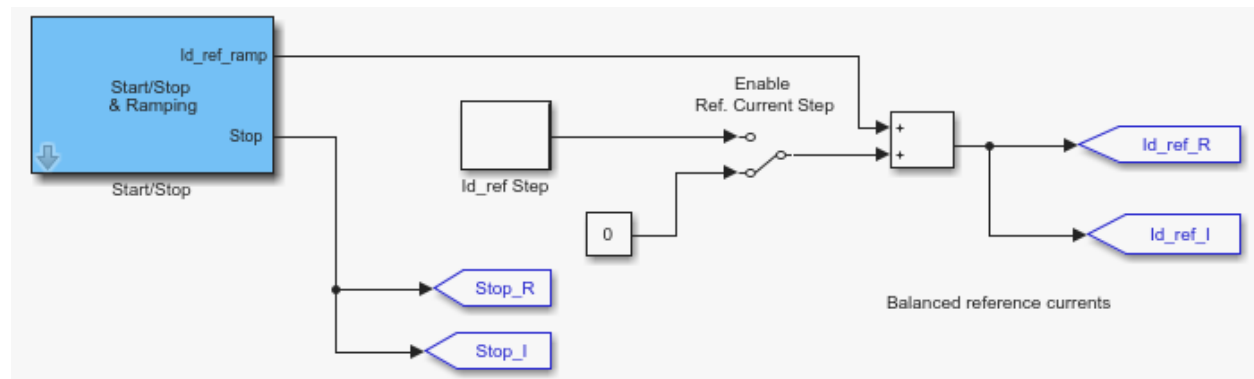


Slika 30. SubSystem „AC filter i baterije kondenzatora”

Reaktivna snaga neophodna za rad HVDC sistema, koja iznosi oko 60 % aktivne snage koja se prenosi vodom, se ravnomjerno obezbjeđuje iz četiri prikazane komponente SubSystema. Baterije kondenzatora su modelovane trofaznim rednim RLC potrošačem sa konstantnom impedansom. Aktivna i induktivna reaktivna snaga su jednake nuli dok je kapacitivna reaktivna snaga određena režimom rada HVDC sistema. Rezonantni filteri su modelovani „Single-tuned” filterima harmonika pri čemu je jedan filter podešen na rezonantni 11-ti a drugi filter na rezonantni 13-ti harmonik [22]. Filter sa graničnom frekvencijom je modelovan „High-pass” filterom harmonika pri čemu je granični harmonik 24-ti [22].

5.1.5 Model upravljanja konvertorima

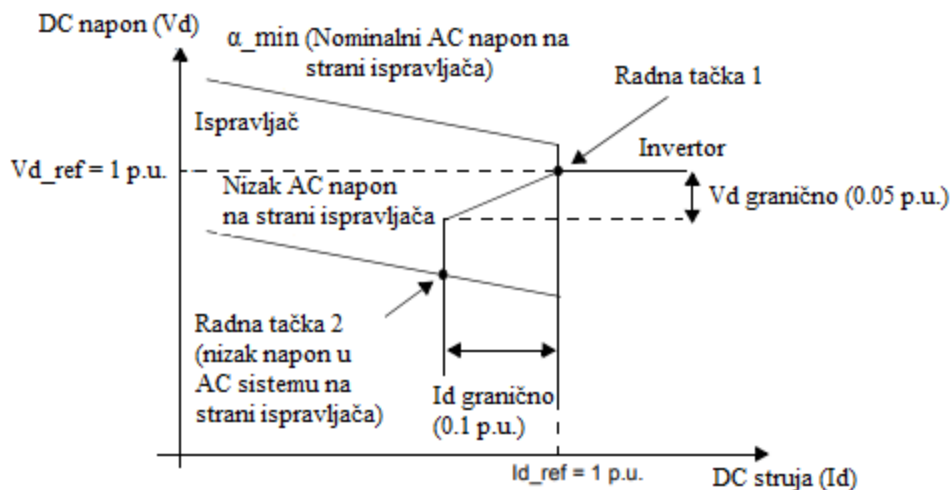
Upravljanje konvertorima je realizovano pomoću subsystem-a: „Glavna Kontrola“, „Upravljanje ispravljačem“ i „Upravljanje inverterom“. Subsystem „Glavna Kontrola“ je prikazan na slici 31 [22].



Slika 31. SubSystem „Glavna Kontrola”

U okviru subsystem-a „Start/Stop” moguće je podešavati vremenski trenutak kada dolazi do uvećavanja referentne vrijednosti struje sa nulte vrijednosti (uključivanje HVDC sistema), vrijednost referentne struje kao i vremenski trenutak kada dolazi do umanjivanja referentne struje do nulte vrijednosti (isključivanje HVDC sistema). Izlazni parametri iz subsystem-a „Glavna Kontrola” su željene vrijednosti referentnih struja „Id_ref_R” i „Id_ref_I” koje se dovode na upravljačke sisteme ispravljača i invertera, respektivno. Dakle, ove vrijednosti referentne struje se dovode kao ulazni podaci subsystem-ima „Upravljanje ispravljačem” i „Upravljanje inverterom”.

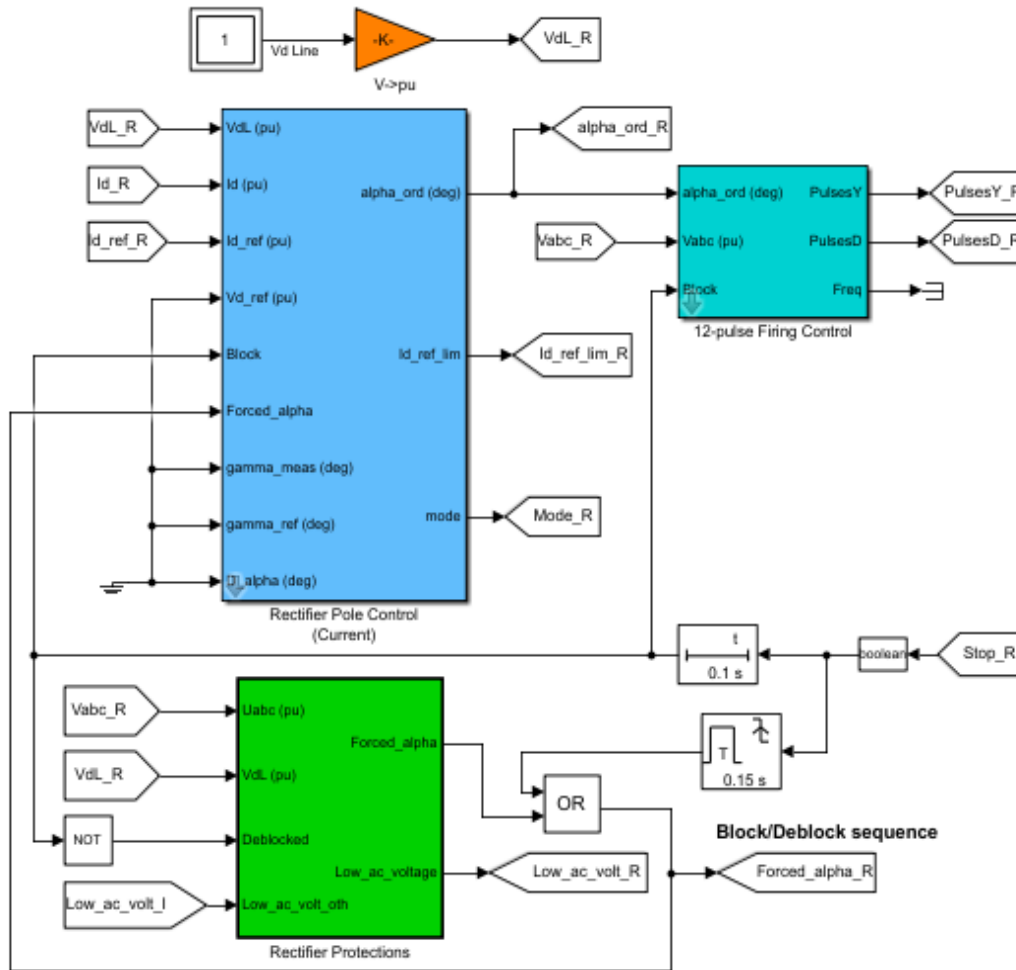
Funkcionisanje subsystem-a „Upravljanje ispravljačem” i „Upravljanje inverterom” se zasniva na karakteristici prikazanoj na slici 32 [22].



Slika 32. Strujno-naponska karakteristika konvertora

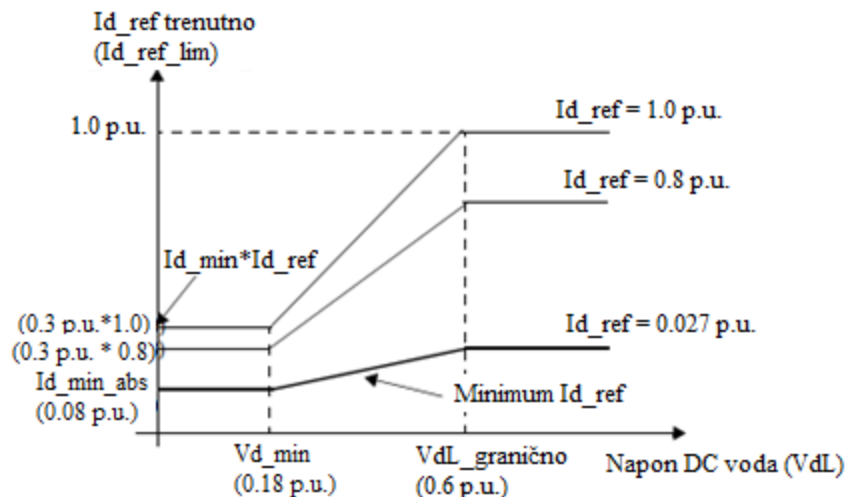
U normalnom pogonu ispravljač kontrolira struju na DC strani i održava je na referentnoj vrijednosti I_{d_ref} . S druge strane, inverter kontrolira napon na DC strani i održava ga na referentnoj vrijednosti V_{d_ref} . U presjeku karakteristika ispravljača i invertora se dobija radna tačka u normalnom pogonu koja je na slici 32. označena sa 1. Međutim, u slučaju kada dođe do pada napona u AC sistemu sa strane ispravljača, dolazi do premještanja radne tačke iz tačke 1 u tačku 2. U ovom radnom režimu ispravljač radi sa minimalnim uglom uključenja tiristora α dok inverter radi u režimu u kojem vrši kontrolu struje [22].

SubSystem „Upravljanje ispravljačem” je prikazan na slici 33 [22]. U okviru subsystem-a „Upravljanje ispravljačem” se uočavaju tri subsystem-a. Prvi subsystem „Rectifier Pole Control” kao ulazne parametre ima napon i struju na kraju DC voda gdje je ispravljač, željenu vrijednost referentne struje kao i referentnu vrijednost napona. Svi navedeni ulazni parametri su predstavljeni u jediničnim vrijednostima. Pored toga, ovaj subsystem posjeduje priključak preko kojeg se dovodi logički signal za naredbu o blokiranju ispravljača. Takođe, poseban ulaz „Forced_alpha” je ostavljen za potrebe zaštitnog upravljanja u slučaju kvara u sistemu. Na osnovu ulaznih podataka posmatrani subsystem na izlazu daje: vrijednost ugla uključivanja tiristora ispravljača „alpha_ord_R”, stvarnu referentnu vrijednost ispravljača „Id_ref_lim_R” i režim rada ispravljača „Mode_R”. Stvarna vrijednost referentne struje se dobija na osnovu željene vrijednosti referentne struje uz ograničenje funkcije „VDCOL” koja će biti objašnjena u nastavku.



Slika 33. SubSystem „Upravljanje ispravljačem”

Osnovna uloga kontrolera „VDCOL” implementiranog u okviru subsystem-a „Rectifier Pole Control” je korigovanje vrijednosti referentne struje na osnovu izmjerene vrijednosti napona na DC vodu. Naime, pomoću ove funkcije se vrši umanjivanje referentne vrijednosti struje u slučaju kada je detektovana niska vrijednost napona u DC mreži, koja može biti izazvana kvarovima i u DC i u AC sistemu. Umanjivanjem vrijednosti referentne struje smanjuju se zahtjevi za reaktivnom snagom iz AC mreže, pa se na ovaj način ubrzava oporavak sistema od poremećaja. Strujno-naponska karakteristika kontrolera „VDCOL” je prikazana na slici 34 [22]. Sa slike 34. se uočava da referentna struja smanjuje svoju vrijednost kada napon padne ispod određene granične vrijednosti $VdL_{granično}$ (0.6 p.u.) [22].

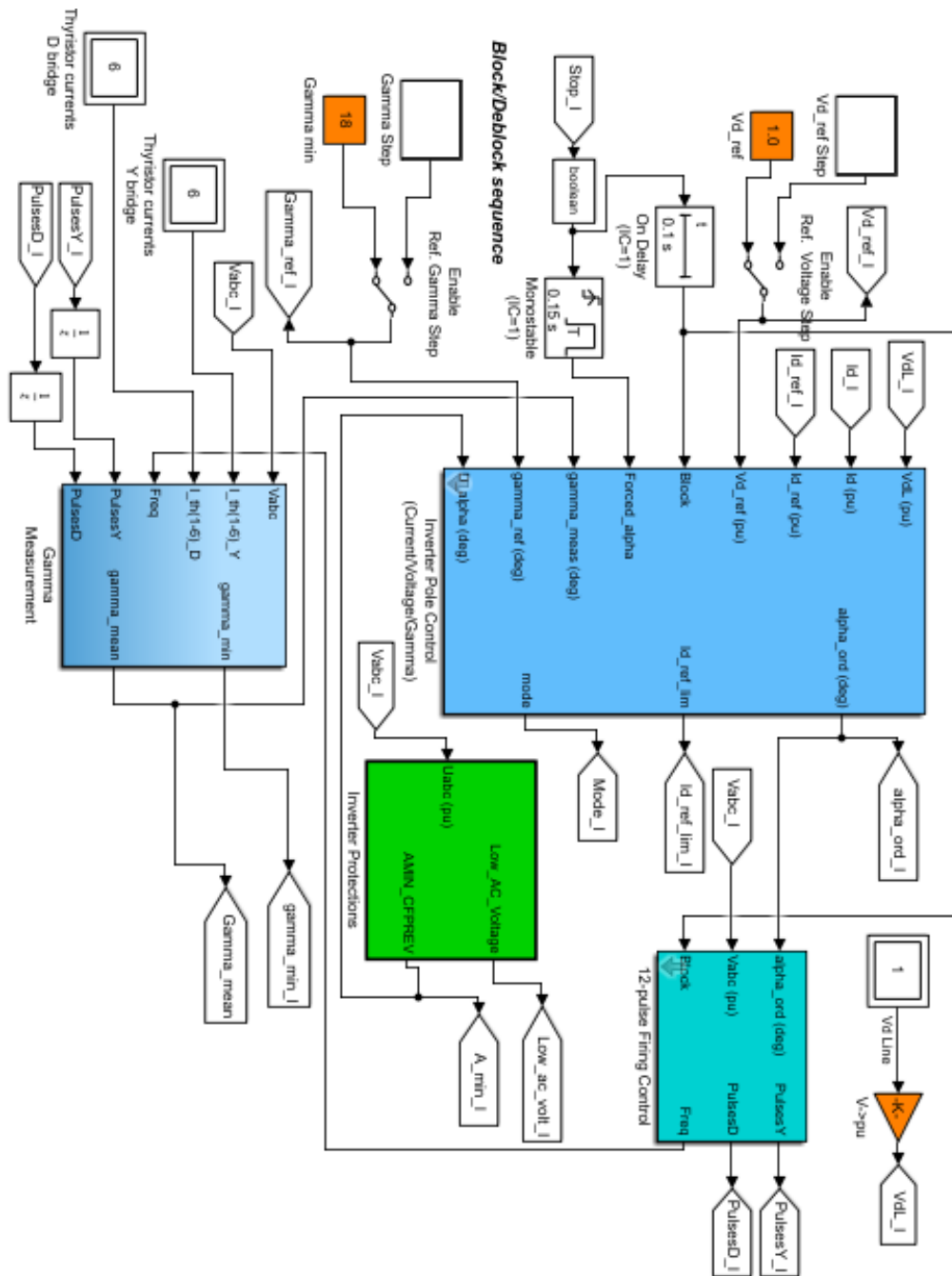


Slika 34. Strujno-naponska karakteristika VDCOL kontrolera

Drugi subsystem sa slike 33. je označen kao „12-pulse Firing Control”. Ulazni podaci ovog subsystem-a su: naredba za vrijednost ugla α generisana iz prethodnog subsystem-a, vrijednost napona na AC sabirnicama ispravljača „Vabc_R” kao i signal preko kojeg se dovodi naredba o blokiranju konvertora. Napon mjeran na AC strani ispravljačke stanice se koristi za sinhronizaciju signala koji se dovode na ispravljački most i napona u AC mreži. Kao izlazni parametri iz posmatranog subsystem-a se imaju signali za uključivanje tiristora (koji se dovode na gejt tiristora) u 12-pulsnom tiristorskom mostu. Signali „PulsesY_R” se dovode na 6-pulsni konvertor koji se napaja sa namotaja transformatora spregnutog u zvijezdu, dok se signali „PulsesD_R” dovode na 6-pulsni konvertor napajan preko namotaja transformatora spregnutog u trougao. Ovi signali su prikazani na slikama 26. i 27.

Pomoću subsystem-a „Rectifier Protections” je implementirano zaštitno upravljanje koje se primjenjuje na ispravljaču u slučaju kvara u sistemu [23]. Naime, ovaj blok ima funkciju da detektuje kvar u DC sistemu i preduzme upravljačke akcije. Detekcija kvara na DC vodu se vrši konstantnim mjerenjem napona na DC vodu. U slučaju kada se detektuje kvar na DC vodu zaštitno upravljanje podešava vrijednost ugla α ispravljača i to tako da ovaj konvertor prelazi iz ispravljačkog u invertorski režim rada [23]. Drugim riječima, energija se preuzima iz DC sistema i predaje se u AC mrežu. Na ovaj način se značajno umanjuje vrijednost struje kvara. Takođe, ovdje je implementiran i dio upravljanja koji u slučaju detekcije niske vrijednosti napona u nekom od AC sistema sa kojima je povezan HVDC sistem dovodi signal na prethodno opisano upravljanje čime se obezbjeđuje njegovo blokiranje [23]. Na ovaj način se jasno vrši selekcija zaštitnog upravljanja u slučaju kvara na DC vodu i u AC mrežama.

SubSystem „Upravljanje inverterom” je prikazano na slici 35 [22]. Principi na kojima se vrši upravljanje inverterom, u smislu ulaznih i izlaznih parametara, su slični onima kod upravljanja ispravljačem. Osnovna razlika se ogleda u tome što se kod ovog upravljanja mora voditi računa o vrijednosti ugla prigušivanja γ . Kako bi se izbjegle komutacione greške kod konvertora, mora se kontrolisati vrijednost ovog ugla pa se iz toga razloga vrši njegovo mjerenje [22]. Za ova mjerenja je zadužen subsystem „Gamma Measurement”. Takođe, kod invertora je implementirano zaštitno upravljanje koje u slučaju detekcije niske vrijednosti napona u AC sistemu na strani invertora ograničava promjenu ugla γ unutar određenih granica sigurnosti [23].



Slika 35. Subsystem „Upravljanje invertorom”

5.2 Prateće „script” datoteke

Rad u komandnom prozoru i korišćenje Matlab-a kao kalkulatora je osnovni i najjednostavniji način upotrebe ovog programa. Naime, u komandnom prozoru se mogu sprovesti složeni matematički proračuni zahvaljujući prethodno ugrađenim funkcijama. Međutim, kada je neophodno sprovesti veći broj naredbi, ponavljati i mijenjati izraze, tada rad u

komandnom prozoru otkriva svoja ograničenja. Navedeni problem se može prevazići formiranjem tekstualnih (skript) datoteka koje imaju ekstenziju „.m”.

U ovim datotekama se nalazi više naredbi koje kada se izvrše daju isti rezultat kao da su pojedinačno unošene u komandni prozor. Na ovaj način se značajno pojednostavljuje praćenje izvršenja programa. Kako bi se upravljalo tokom izvršavanja naredbi u programu dominantno se koriste sljedeće tri naredbe: „while”, „for” i „if”. Naredbe „while” i „for” se koriste u slučaju kada je određenu naredbu ili skup naredbi potrebno izvršiti više puta, sve dok je ispunjen odgovarajući uslov. Naredba „while” se koristi kada nije poznat broj ponavljanja, dok sa druge strane, kada se tačno zna koliko puta je potrebno izvršiti određene naredbe, tada se koristi naredba „for”. Naredba „if” se koristi u slučaju kada je određenu naredbu ili skup naredbi potrebno izvršiti samo ako je ispunjen odgovarajući uslov. Sve tri navedene naredbe se moraju završavati naredbom „end”. Jedna od prednosti tekstualnih datoteka je mogućnost komunikacije sa modelima formiranim u Simulinku.

Simulacije formirane u Simulink-u moguće je pokretati pomoću ikone “Run” u komandnom prozoru Simulink-a. Za potrebe ovog rada izvršen je veliki broj pojedinačnih simulacija modela formiranih u Simulink-u. Naime, razmatran je širok opseg dužine HVDC sistema od 200 km do 800 km sa korakom od 10 km. Takođe, za svaku od dužina HVDC sistema razmatran je opseg aktivne snage koja se prenosi sistemom i to od 10% nominalne snage do 100% nominalne snage sa korakom od 10% nominalne snage. Na ovaj način se za jedan tip poremećaja u sistemu dobija veoma veliki broj simulacija. Ukoliko bi se pokretanje ovako velikog broja simulacija vršilo pojedinačno za svaku simulaciju, to bi iziskivalo veoma dugo vrijeme. Kako bi se riješio ovaj problem svakom modelu razmatranom u ovom radu je pridružen odgovarajući prateći program u vidu “script” datoteke. Dakle, simulacije su pokretane iz odgovarajućeg pratećeg programa pridruženom svakom od modela. Takođe, na kraju svakog od programa se dobijaju odgovarajući rezultati.

Formirani prateći programi sadrže dvije petlje realizovane uz pomoć naredbe “for”. Prva petlja je spoljašnja petlja uz pomoć koje se mijenjaju dužine HVDC sistema u opsegu od 200 km do 800 km sa korakom od 10 km. Unutar ove spoljašnje petlje smještena je unutrašnja petlja sa kojom se u okviru svake dužine HVDC sistema mijenja aktivna snaga koja se prenosi sistemom i to u opsegu od 10 % nominalne snage do 100 % nominalne snage sa korakom od 10 % nominalne snage. Po ulasku u unutrašnju petlju, odnosno za svaku kombinaciju dužine i snage, izvršena je simulacija odgovarajućeg modela. U nastavku unutrašnje petlje učitavani su rezultati iz simulacije. Rezultati su talasni oblici napona na mjernim mjestima koji su ovdje predstavljeni u vidu vektora. Vrijednosti ovih talasnih oblika na intervalu koji je od interesa (od trenutka nastanka poremećaja pa do uspostavljanja normalnog pogona) su prepisivane u nove vektore. Sljedeći korak u unutrašnjoj petlji predstavlja pronalaženje maksimalnih vrijednosti u ovim novoformiranim vektorima. Na ovaj način se za svako mjerno mjesto pronalazi maksimalna vrijednost napona za svaku od mogućih kombinacija dužina i prenosnih snaga. Ovako dobijene vrijednosti su upisivane u odgovarajuće matrice. Na kraju svakog od programa je izvršeno grafičko prikazivanje vrijednosti u matricama.

U Matlab-u postoji veliki broj funkcija koje omogućavaju crtanje grafika u dvodimenzionalnom i trodimenzionalnom prostoru. Takođe, moguća su različita podešavanja i manipulacije sa graficima kao što su skaliranje osa, davanje naziva osa, notacija pojedinih djelova grafika itd. Najčešće korišćene funkcije za crtanje u dvodimenzionalnom prostoru su „plot”, „histogram” i „bar” dok se za crtanje grafika u trodimenzionalnom prostoru koriste

„surf” i „mesh”. Za potrebe ovog rada je upotrebljena naredba “surf” za crtanje grafika u trodimenzionalnom prostoru.

U tekstualnim datotekama koje prate svaki od modela u Simulnk-u postoji odgovarajući korak promjene dužine HVDC sistema i aktivne snage koja se prenosi. Ukoliko se smanji korak promjene ovih veličina dolazi do povećanja broja mogućih kombinacija dužina i snaga a samim tim i broja simulacija. Na ovaj način se dobija veoma dugo vrijeme potrebno za izvršavanje programa. Nedostatak koji se ogleda u ograničenom broju simulacija moguće je prevazići upotrebom neke od metoda interpolacije. U ovom radu je primijenjena po djelovima kubna interpolacija koja se u Matlabu poziva tako što se kao jedan od argumenata funkciji za interpolaciju proslijedi i naredba “cubic”.

6. Analiza prenaponske zaštite HVDC sistema različitih konfiguracija

U ovom poglavlju će se izvršiti analiza prenaponske zaštite HVDC sistema različitih konfiguracija. Naime, prvo će se analizirati prenaponi koji se kod različitih konfiguracija HVDC sistema pojavljuju u slučaju određenih poremećaja u sistemu. Nakon toga će se za najkritičnije slučajeve koji su dobijeni u prethodnoj analizi izvršiti koordinacija izolacije.

Koordinacija izolacije predstavlja složen zadatak usklađivanja broja, mjesta ugradnje i karakteristika odvodnika prenapona i drugih zaštitnih uređaja sa izolacionim nivoom električne opreme. Procedure za koordinaciju izolacije u različitim djelovima elektroenergetskog sistema su definisane u različitim standardima. U standardu IEC 60071-1 su definisane procedure i pravila za koordinaciju izolacije u trofaznim mrežama naizmjeničnog napona u kojima najviši napon opreme prelazi vrijednost od 1 kV. Takođe, u ovom standardu su date tabele za standardizovane vrijednosti podnosivih napona izolacije koja se instalira na različitim mjestima u sistemu. U standardu IEC 60071-5 su definisane procedure koordinacije izolacije unutar konvertorskih stanica HVDC sistema. Međutim, osnovni nedostatak ovog standarda se ogleda u tome što ne postoje definisane standardne vrijednosti podnosivih napona izolacije. Sa druge strane, u ovom standardu je prikazan primjer koordinacije izolacije za HVDC sistem naponskog nivoa 500 kV koji je povezan sa mrežama naizmjeničnog napona naponskih nivoa 400 kV. Vrijednosti zaštitnih nivoa odvodnika prenapona i podnosivih napona izolacije date u ovom primjeru će biti iskorišćene za potrebe proračuna u ovom radu. Prema IEC 60071-5, zaštitni nivo odvodnika prenapona se definiše kao zaostali napon koji se pojavljuje između krajeva odvodnika prenapona prilikom proticanja odgovarajuće struje odvođenja. Zaostali napon se definiše kao maksimalna vrijednost napona koja se pojavljuje između priključaka odvodnika prenapona prilikom proticanja struje odvođenja.

6.1 Analiza prenapona kod različitih konfiguracija HVDC sistema za različite tipove poremećaja u sistemu

U ovom potpoglavlju će se analizirati prenaponi kod različitih konfiguracija HVDC sistema i to za različite tipove poremećaja. Naime, prvo će se posmatrati monopolarna konfiguracija a zatim bipolarna konfiguracija HVDC sistema. Za obje konfiguracije će biti simulirani različiti tipovi poremećaja u sistemu pri čemu će se izvršiti mjerenje napona na tačno određenim mjestima. Za svaki posmatrani slučaj formiran je odgovarajući model u Simulink-u. Takođe, za svaki posmatrani slučaj razmatran je širok opseg dužine DC voda u HVDC sistemu kao i snage koja se prenosi HVDC sistemom. Kako se radi o velikom broju simulacija, za svaki posmatrani slučaj formirani su odgovarajući programi u Matlab-u koji značajno olakšavaju proračun. Na kraju svakog programa se dobija grafički prikaz zavisnosti maksimalne vrijednosti napona u posmatranoj tački od dužine HVDC sistema i snage koja se prenosi HVDC sistemom.

Vrijednost podnosivog napona izolacije instalirane na AC strani konvertorskih transformatora (prema standardizovanim vrijednostima iz standarda IEC 60071-1) iznosi 1050

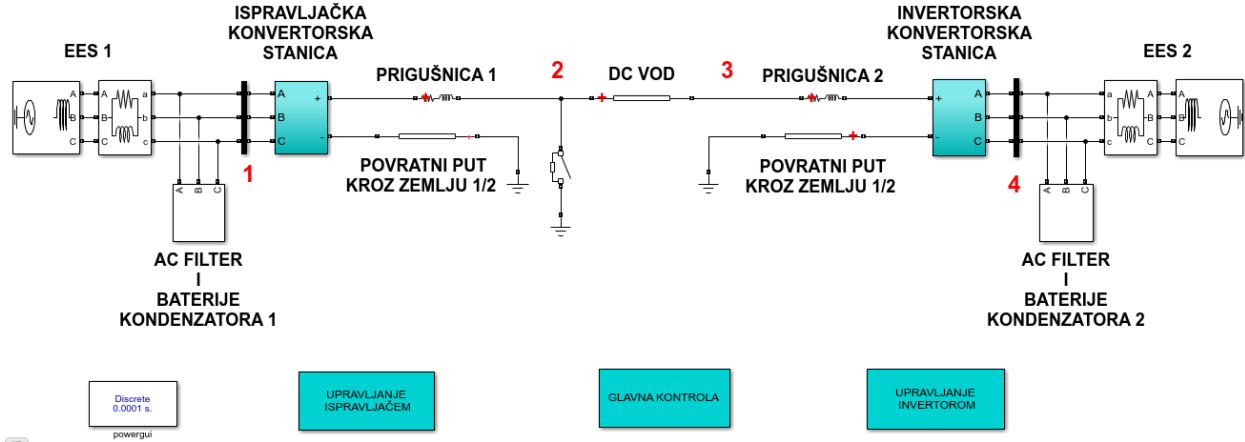
kV. Prema primjeru iz standarda IEC 60071-5, podnosivi napon izolacije na krajevima DC vodova ima vrijednost od 1300 kV. Ukoliko se u nekom od primjera na određenom mjestu pojave vrijednosti napona koje su iznad podnosivog napona izolacije to znači da je na tom mjestu ugrožena izolacija i neophodna je ugradnja odvodnika prenapona. Kako bi se jasno označili naponi čija vrijednost premašuje podnosive napone izolacije, na grafičkim prikazima rezultata odgovarajuće vrijednosti napona su prikazane različitim bojama. Naime, naponi čija je vrijednost unutar dozvoljenog opsega odstupanja, $\pm 5\%$ od nominalne vrijednosti napona, označeni su zelenom bojom. Sa žutom bojom su označeni naponi čija vrijednost izlazi iz dozvoljenog opsega odstupanja, ali ne premašuje vrijednosti podnosivih napona izolacije na posmatranom mjestu u sistemu. Konačno, sa crvenom bojom su označeni naponi čija vrijednost premašuje podnosive napone izolacije, odnosno pri tim naponima je ugrožena izolacija.

6.1.1 Analiza prenapona kod monopolarne konfiguracije

U primjerima koji slijede su analizirani prenaponi koji se kod monopolarne konfiguracije pojavljuju na određenim mjestima prilikom prolaznog kratkog spoja. Vrijeme trajanja prolaznog kratkog spoja iznosi 50 ms dok se u različitim primjerima posmatraju različita mjesta nastanka kratkog spoja kao i različiti tipovi kratkih spojeva. Na slikama na kojima su prikazani odgovarajući modeli sistema u Simulink-u sa brojevima 1,2,3 i 4 su označena mjesta na kojima se vrši mjerenje napona. U svakom primjeru razmatrane su dužine HVDC sistema u opsegu od 200 km do 800 km. Takođe, za svaku dužinu HVDC sistema posmatrane su različite vrijednosti snage koja se prenosi DC vodom i to u opsegu od 60 MW do 600 MW. Zbog ograničenja u pogledu broja simulacija koje je potrebno izvršiti kao i vremena potrebnog za njihovo izvršenje, promjena dužine HVDC sistema i snage koja se prenosi sistemom je vršena u koracima od 10 km i 60 MW, respektivno. Kao rezultati svakog primjera prikazani su grafici zavisnosti maksimalnih vrijednosti napona na mjernim mjestima od dužine DC voda u HVDC sistemu i snage koja se prenosi HVDC sistemom. Naponi su izraženi u jediničnim vrijednostima pri čemu bazna vrijednost napona na mjernim mjestima 1 i 4 iznosi 326.011 kV, dok bazna vrijednost na mjernim mjestima 2 i 3 iznosi 500 kV. Zbog ograničenog broja simulacija, odnosno kombinacija dužina HVDC sistema i snaga kroz HVDC sistem izvršena je interpolacija dobijenih rezultata.

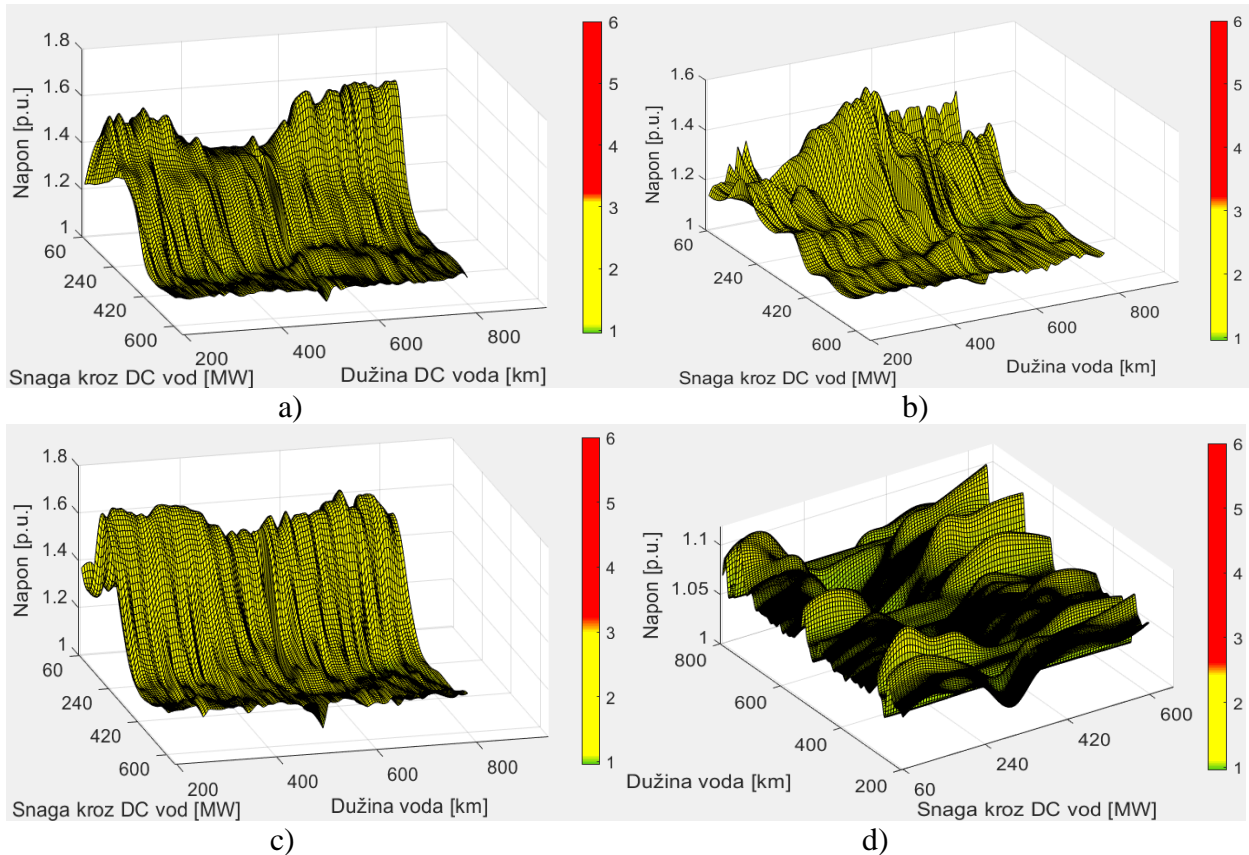
Primjer 1: Prolazni kratki spoj na kraju DC voda na strani ispravljača

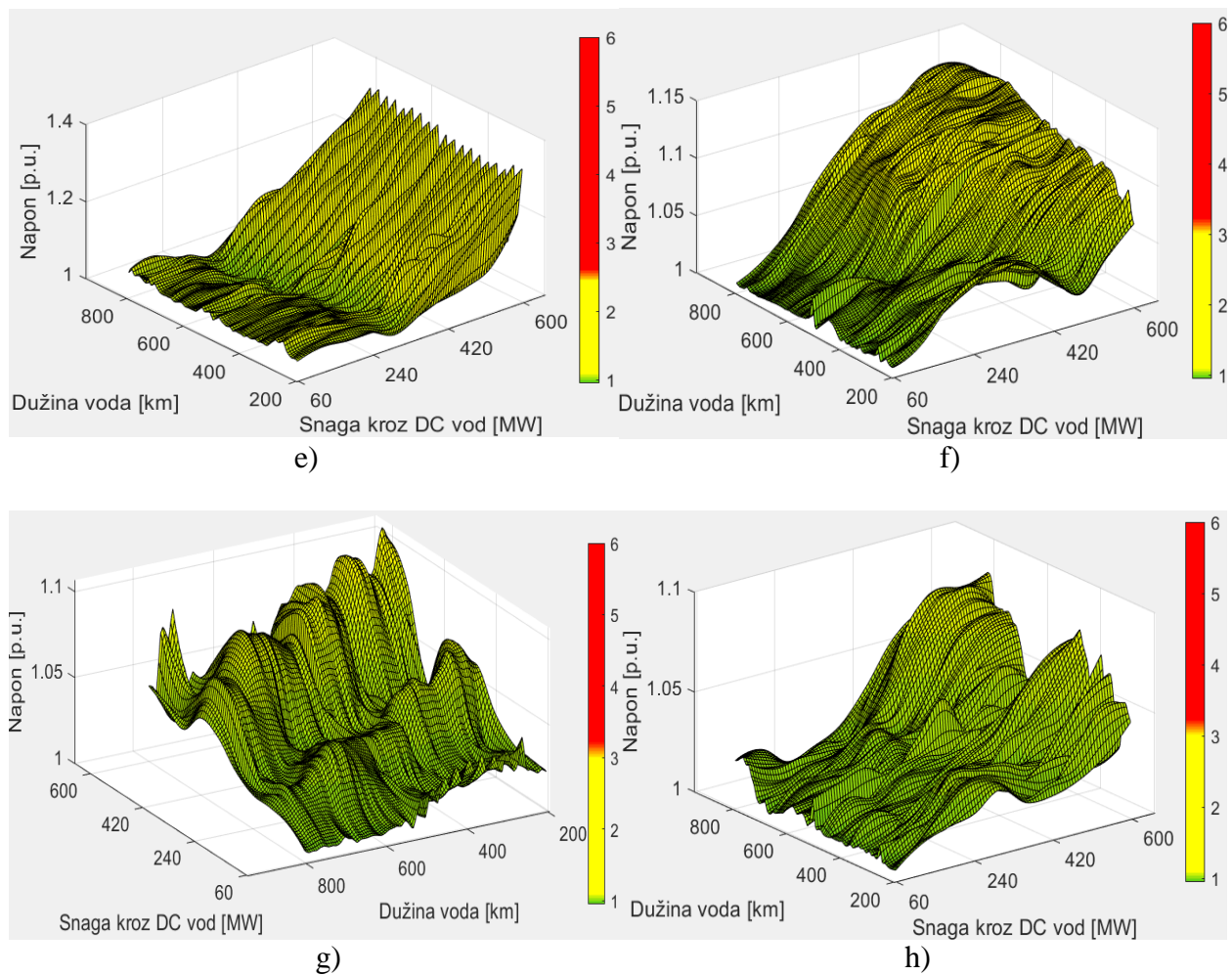
Na slici 36. je prikazan odgovarajući model sistema u Simulink-u. Kratki spoj je modelovan u tački 2.



Slika 36. Model sistema u Simulink-u formiran za potrebe analize prenapona u slučaju prolaznog kratkog spoja na kraju DC voda na strani ispravljača

Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona u tačkama 1,2,3 i 4 od dužine HVDC sistema i snage koja se prenosi HVDC sistemom je prikazana na slici 37.



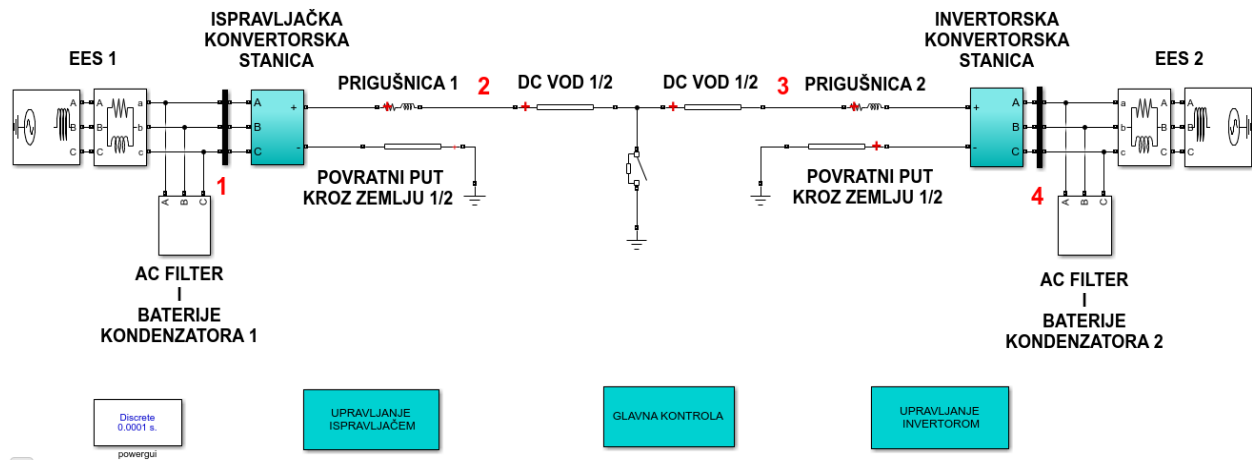


Slika 37. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog kratkog spoja na kraju DC voda na strani ispravljača i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B), c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4 (Faza A), g) mjernom mjestu 4 (Faza B), h) mjernom mjestu 4 (Faza C)

Sa grafika prikazanih na slici 37. se može zaključiti da u slučaju prolaznog kratkog spoja, u trajanju od 50 ms na kraju DC voda na strani ispravljača, na mjernim mjestima ne dolazi do pojave prenapona čija vrijednost ugrožava izolaciju.

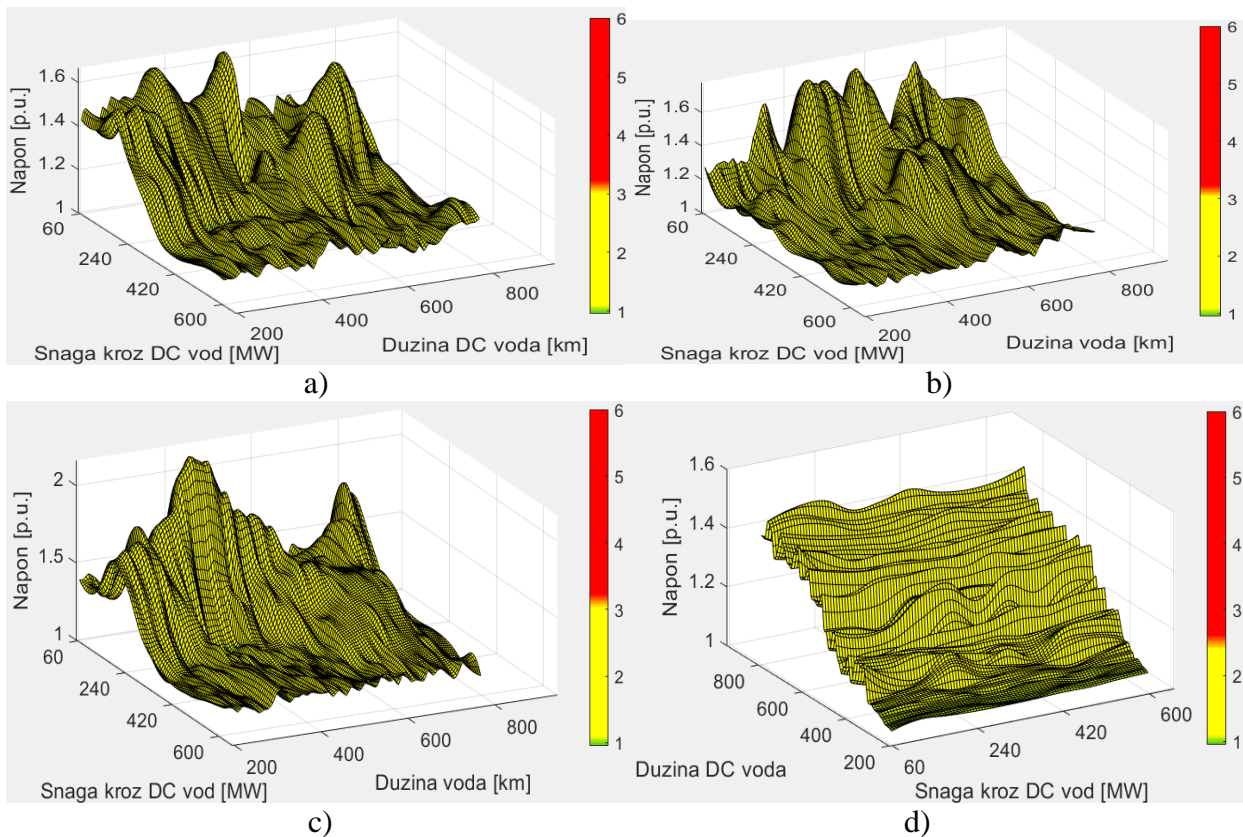
Primjer 2: Prolazni kratki spoj na sredini DC voda

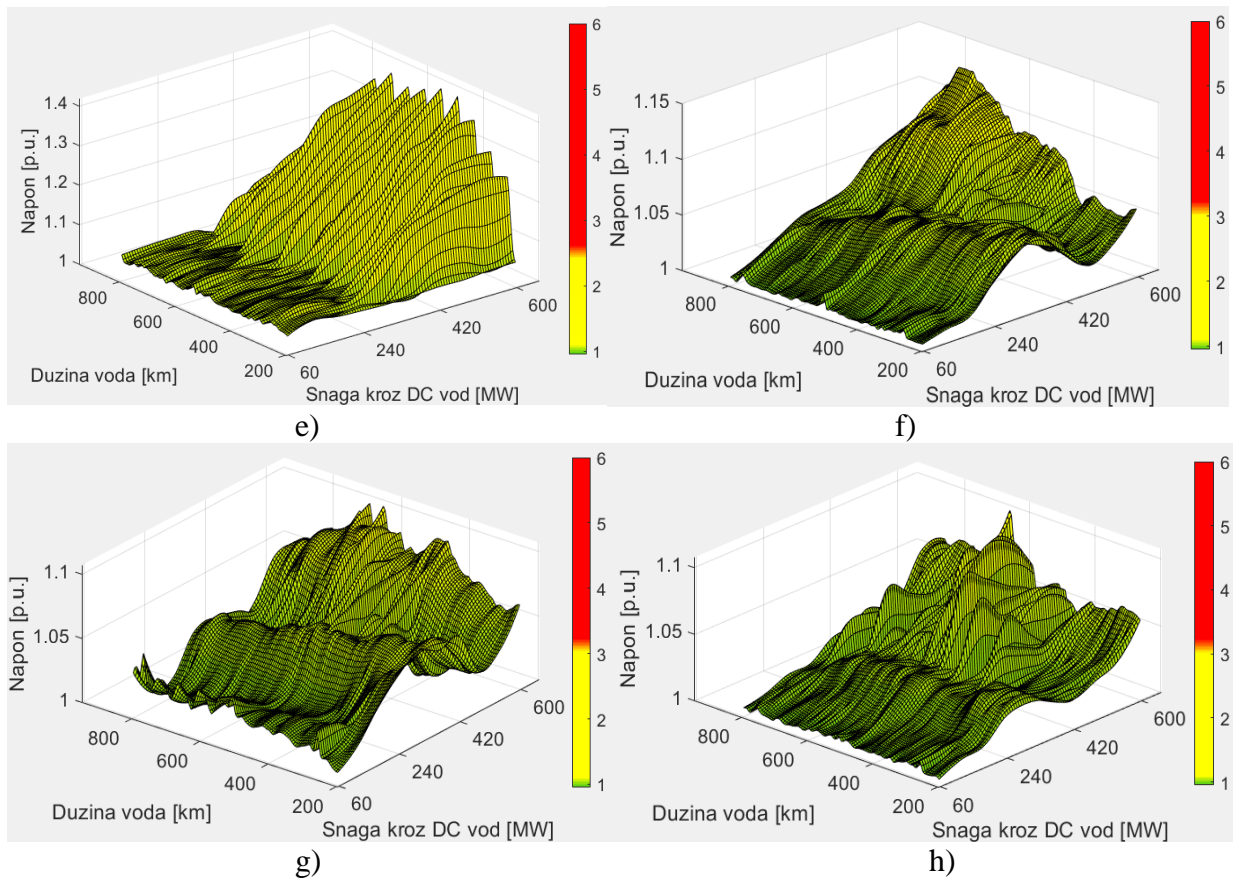
Na slici 38. je prikazan odgovarajući model sistema u Simulink-u.



Slika 38. Model sistema u Simulink-u formiran za potrebe analize prenapona u slučaju prolaznog kratkog spoja na sredini DC voda

Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona u tačkama 1,2,3 i 4 od dužine HVDC sistema i snage koja se prenosi HVDC sistemom je prikazana na slici 39.



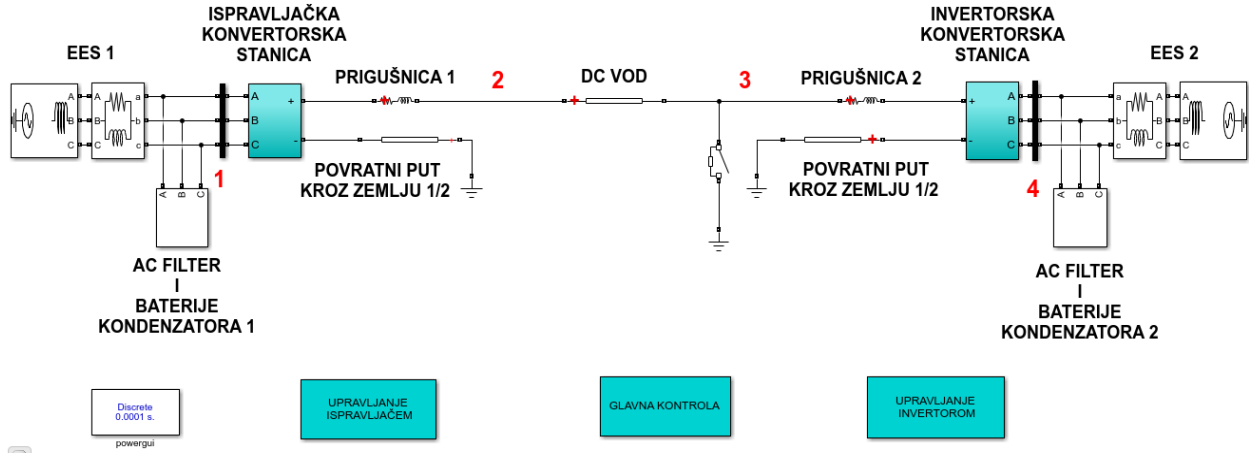


Slika 39. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog kratkog spoja na sredini DC voda i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B), c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4 (Faza A), g) mjernom mjestu 4 (Faza B), h) mjernom mjestu 4 (Faza C)

Sa grafika prikazanih na slici 39. se može zaključiti da u slučaju prolaznog kratkog spoja, u trajanju od 50 ms na sredini DC voda, na mjernim mjestima ne dolazi do pojave prenapona čija vrijednost ugrožava izolaciju.

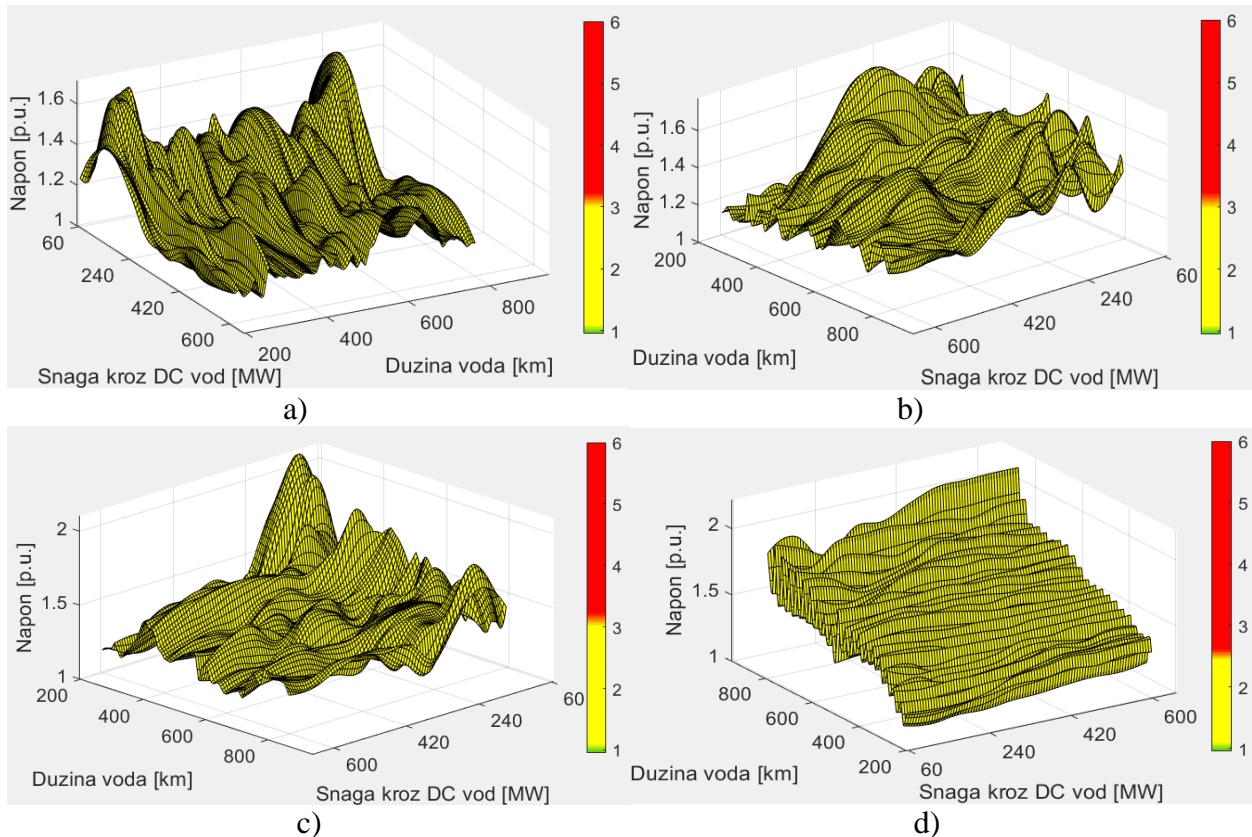
Primjer 3: Prolazni kratki spoj na kraju DC voda na strani invertora

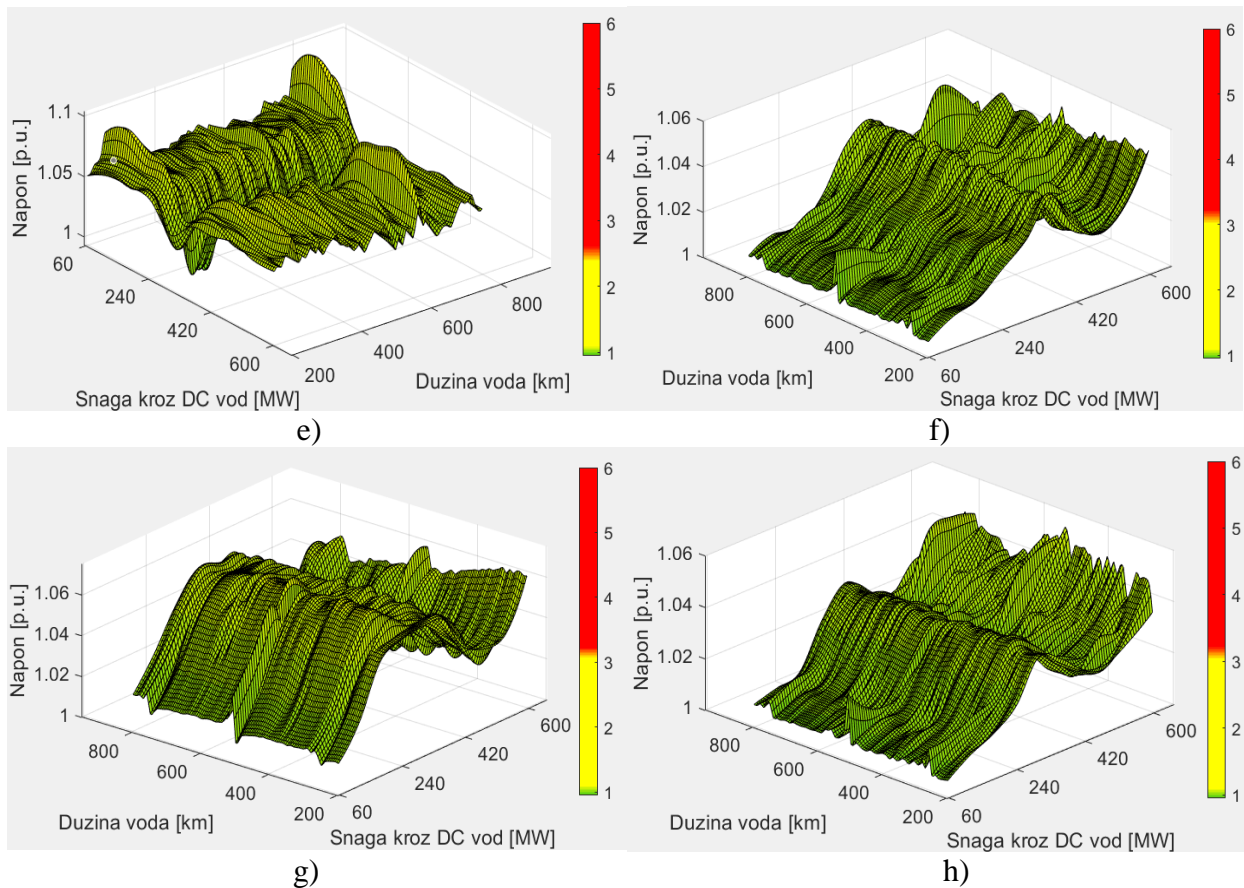
Na slici 40. je prikazan odgovarajući model sistema u Simulink-u. Kratki spoj je modelovan u tački 3.



Slika 40. Model sistema u Simulink-u formiran za potrebe analize prenapona u slučaju prolaznog kratkog spoja na kraju DC voda na strani invertora

Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona u tačkama 1,2,3 i 4 od dužine HVDC sistema i snage koja se prenosi HVDC sistemom je prikazana na slici 41.



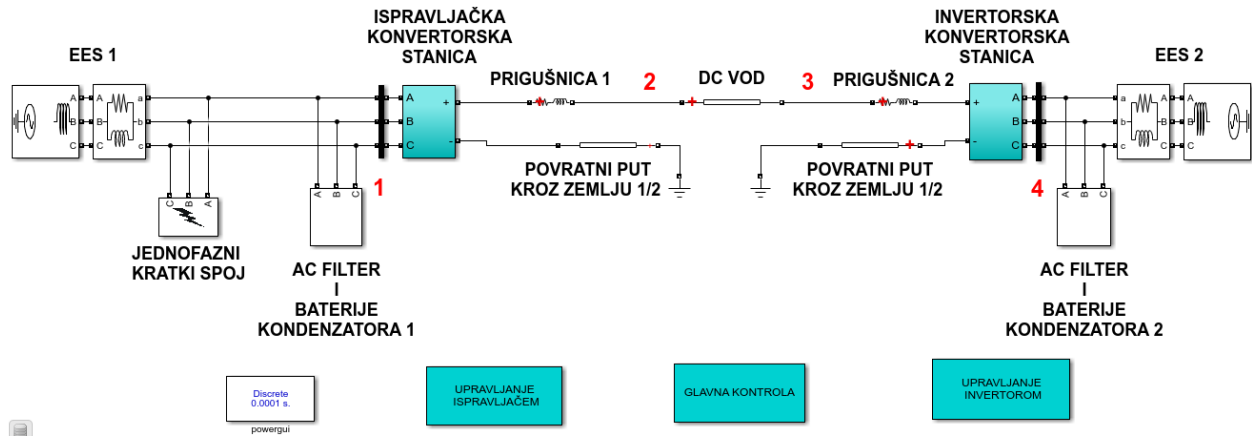


Slika 41. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog kratkog spoja na kraju DC voda na strani invertora i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B), c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4 (Faza A), g) mjernom mjestu 4 (Faza B), h) mjernom mjestu 4 (Faza C)

Sa grafika prikazanih na slici 41. se može zaključiti da u slučaju prolaznog kratkog spoja, u trajanju od 50 ms na kraju DC voda na strani invertora, na mjernim mjestima ne dolazi do pojave prenapona čija vrijednost ugrožava izolaciju.

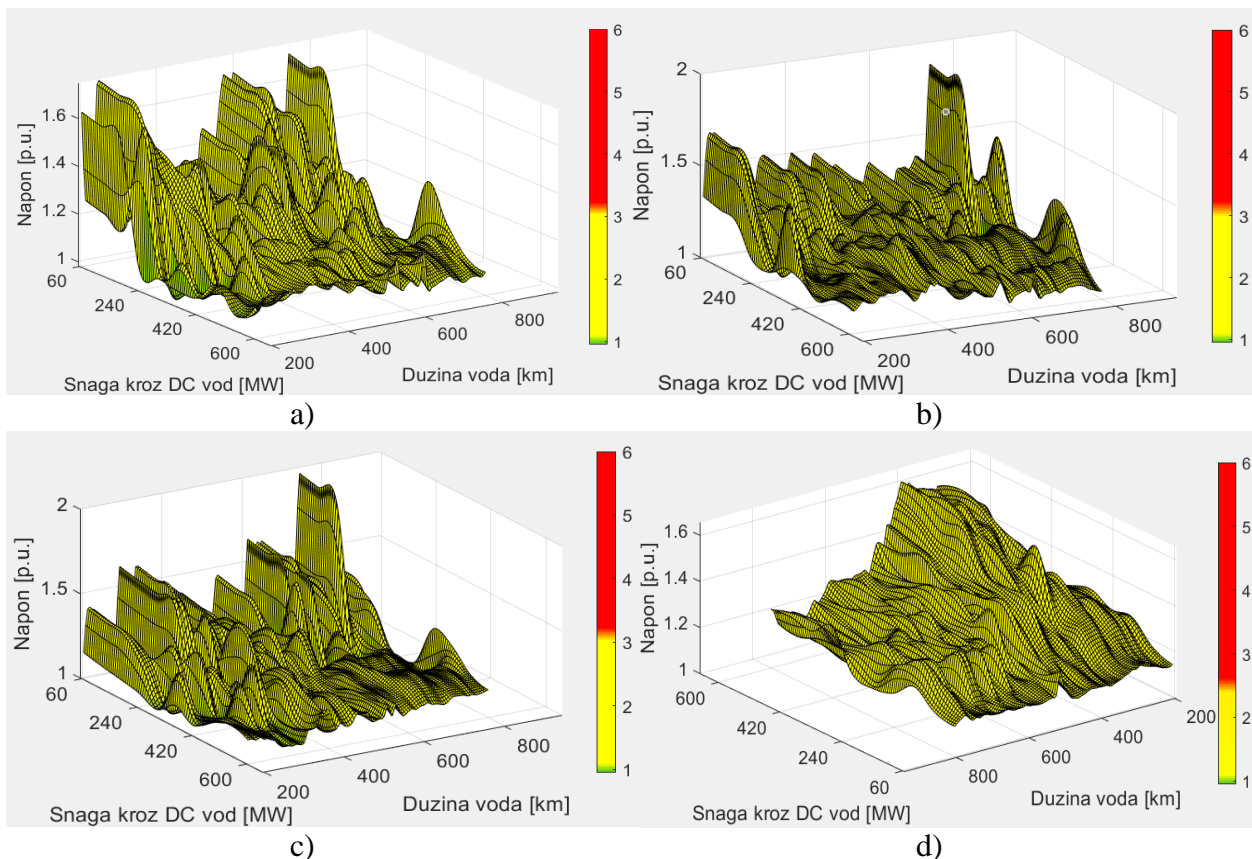
Primjer 4: Prolazni jednofazni kratki spoj u AC sistemu na strani ispravljača

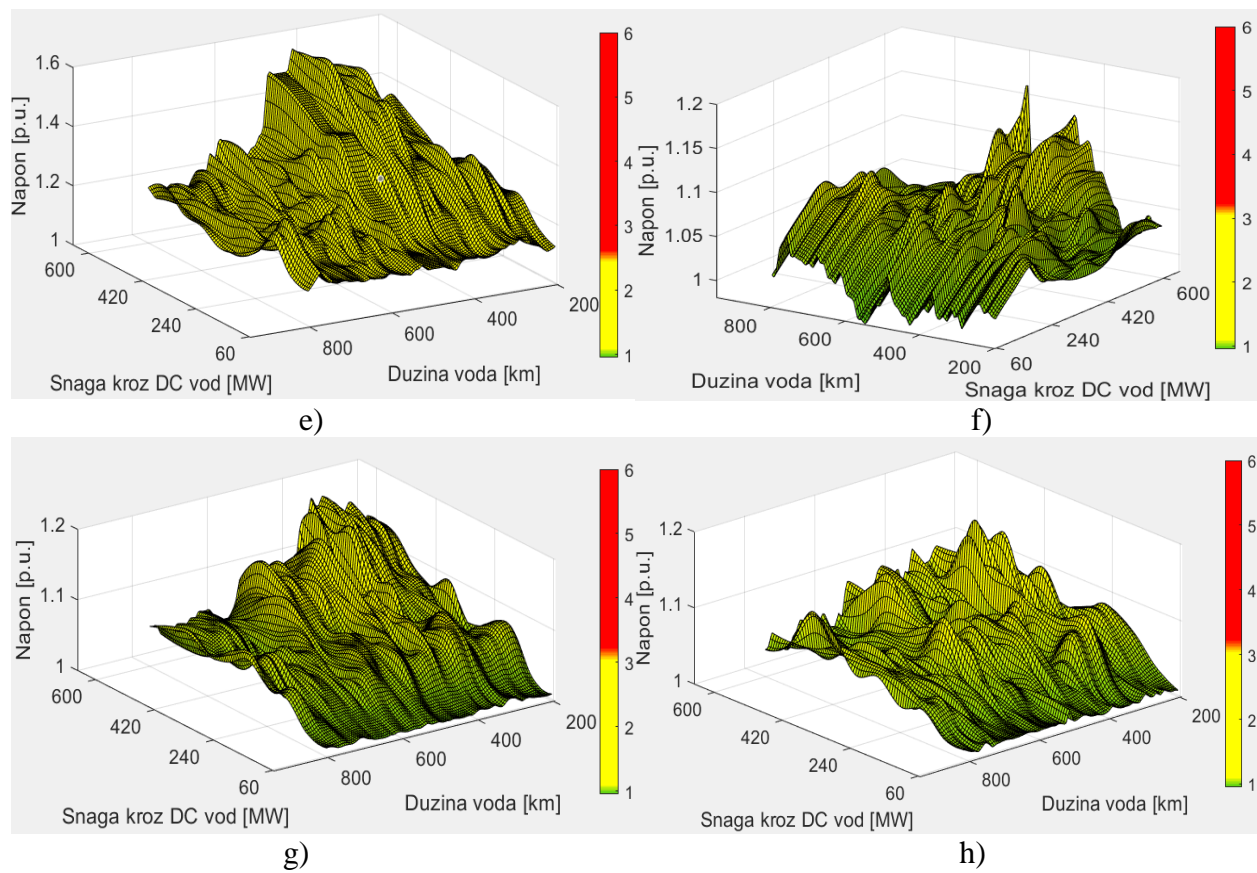
Na slici 42. je prikazan odgovarajući model sistema u Simulink-u.



Slika 42. Model sistema u Simulink-u formiran za potrebe analize prenapona u slučaju prolaznog jednofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani ispravljača

Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona u tačkama 1,2,3 i 4 od dužine HVDC sistema i snage koja se prenosi HVDC sistemom je prikazana na slici 43.



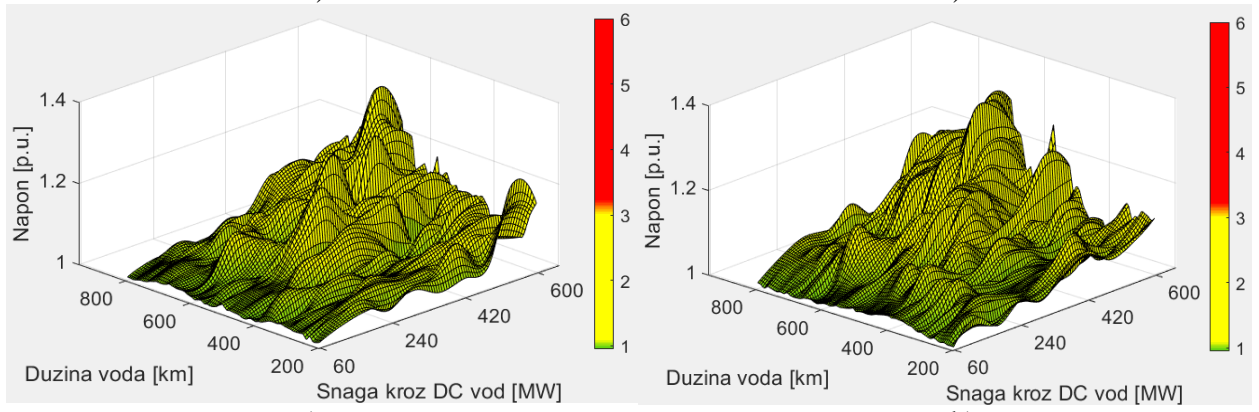
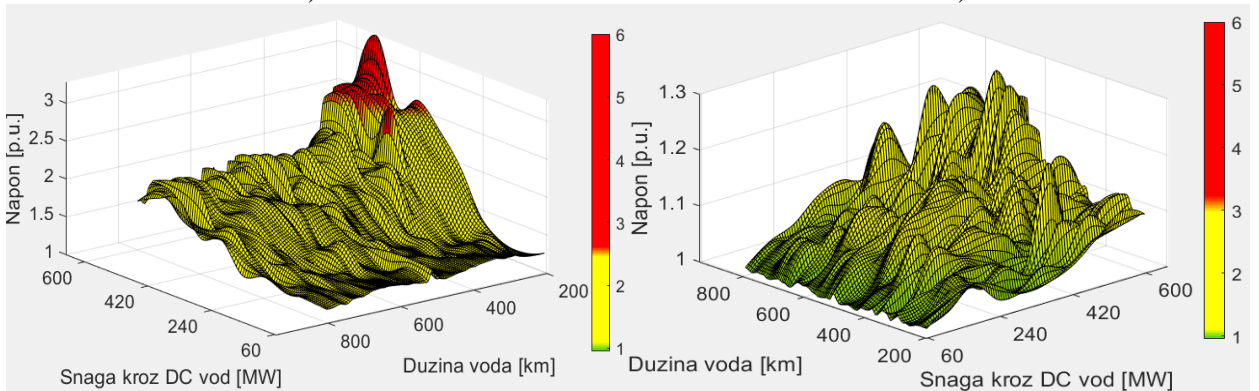
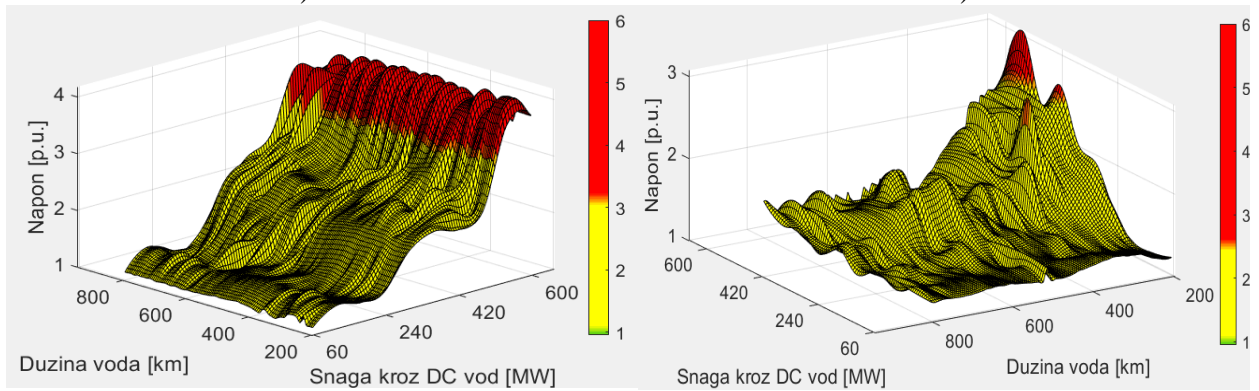
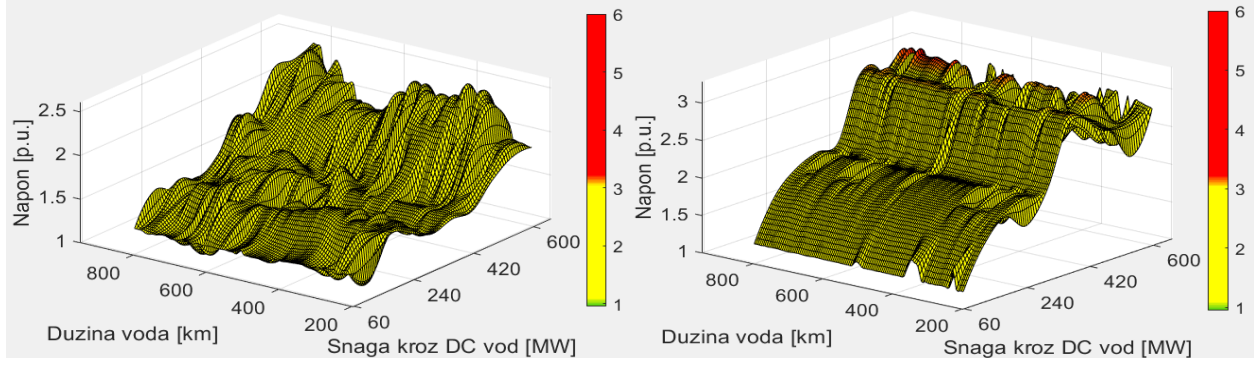


Slika 43. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog jednofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani ispravljača i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B), c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4 (Faza A), g) mjernom mjestu 4 (Faza B), h) mjernom mjestu 4 (Faza C)

Sa grafika prikazanih na slici 43. se može zaključiti da u slučaju prolaznog jednofaznog kratkog spoja, u trajanju od 50 ms u AC sistemu na strani ispravljača, na mjernim mjestima ne dolazi do pojave prenapona čija vrijednost ugrožava izolaciju.

Primjer 5: Prolazni trofazni kratki spoj u AC sistemu na strani ispravljača

Za potrebe proračuna u ovom primjeru, koristi se model sistema u Simulink-u koji je identičan modelu iz primjera 4 pri čemu se umjesto jednofaznog kratkog spoja simulira trofazni kratki spoj. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona u tačkama 1,2,3 i 4 od dužine HVDC sistema i snage koja se prenosi HVDC sistemom je prikazana na slici 44.

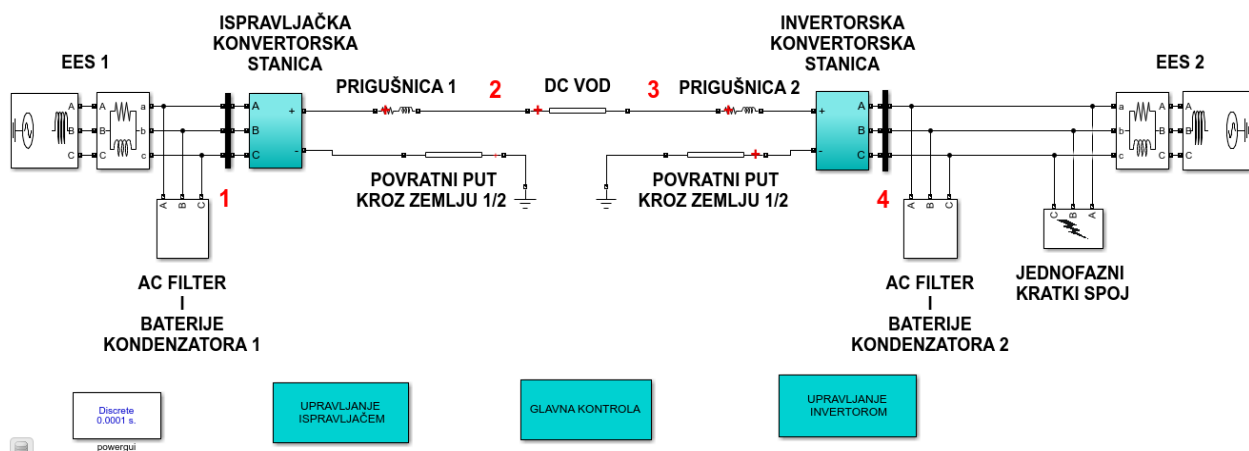


Slika 44. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog trofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani ispravljača i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B), c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4 (Faza A), g) mjernom mjestu 4 (Faza B), h) mjernom mjestu 4 (Faza C)

Sa grafika prikazanih na slici 44. se može zaključiti da u slučaju prolaznog trofaznog kratkog spoja, u trajanju od 50 ms u AC sistemu na strani ispravljača, na mjernim mjestima 1, 2 i 3 dolazi do pojave prenapona čija vrijednost ugrožava izolaciju. Naime, kako je podnosivi napon izolacije instalirane na AC strani konvertorskih transformatora (mjerna mjesta 1 i 4) 1050 kV i bazna vrijednost napona u AC mreži 326.011 kV, to je granična vrijednost napona pri kojoj dolazi do ugrožavanja izolacije u jediničnim vrijednostima 3.22. Sa slike 44. b) i c) se može vidjeti da pri razmatranom primjeru na mjernom mjestu 1 dolazi do pojave napona čija vrijednost premašuje vrijednost od 3.22 p.u. Pri tome, značajno viši naponi se javljaju na fazi C u odnosu na fazu B. Takođe, kako je podnosivi napon izolacije na DC strani HVDC sistema 1300 kV i kako je bazna vrijednost napona u DC mreži 500 kV, to je granična vrijednost napona pri kojoj dolazi do ugrožavanja izolacije izražena u jediničnim vrijednostima 2.6 p.u. Sa slike 44. d) i e) se može vidjeti da pri razmatranom primjeru na mjernim mjestima 2 i 3 dolazi do pojave napona čija vrijednost premašuje vrijednost od 2.6 p.u. Kako na navedenim mjernim mjestima prilikom prolaznog trofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani ispravljača dolazi do ugrožavanja izolacije to je neophodno izvršiti koordinaciju izolacije koja podrazumijeva instaliranje odvodnika prenapona.

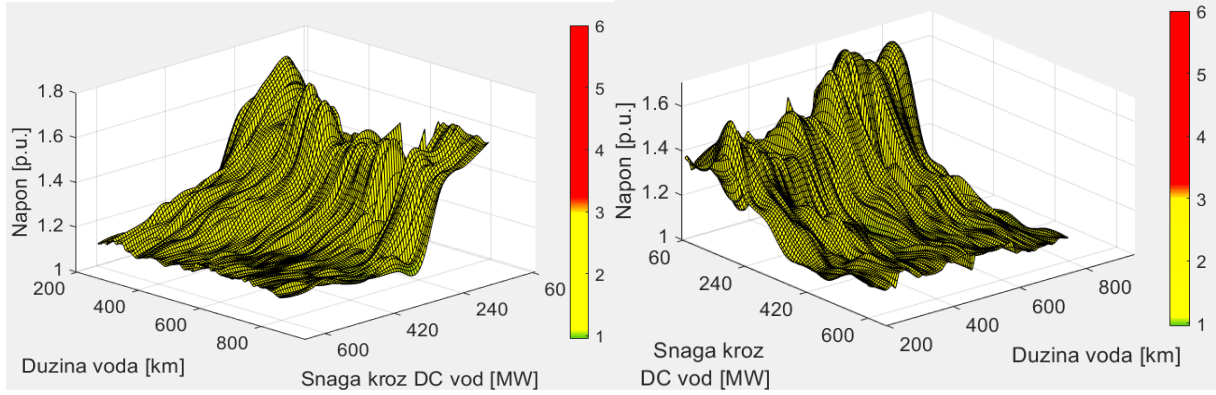
Primjer 6: Prolazni jednofazni kratki spoj u AC sistemu na strani invertora

Za potrebe proračuna u ovom primjeru korišćen je model sistema u Simulink-u prikazan na slici 45.



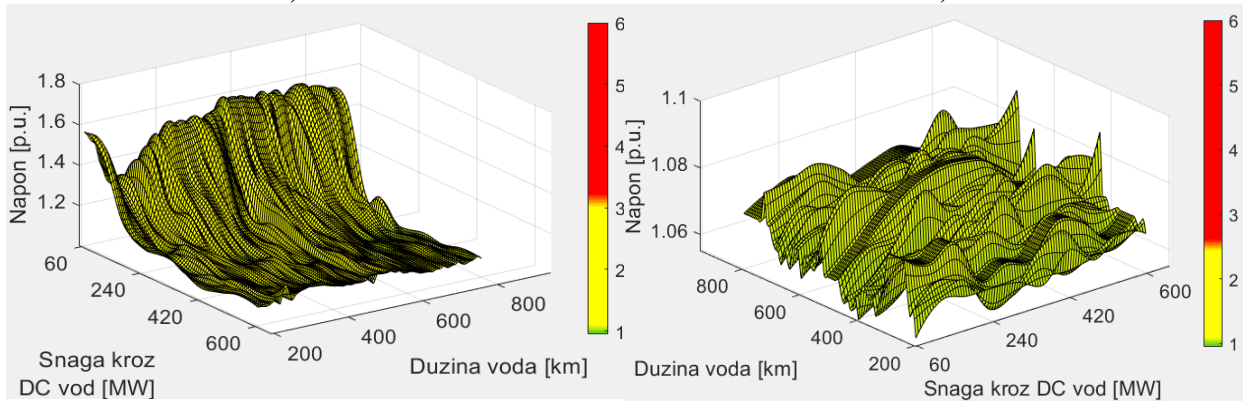
Slika 45. Model sistema u Simulink-u formiran za potrebe analize prenapona u slučaju prolaznog jednofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani invertora

Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona u tačkama 1,2,3 i 4 od dužine HVDC sistema i snage koja se prenosi HVDC sistemom je prikazana na slici 46.



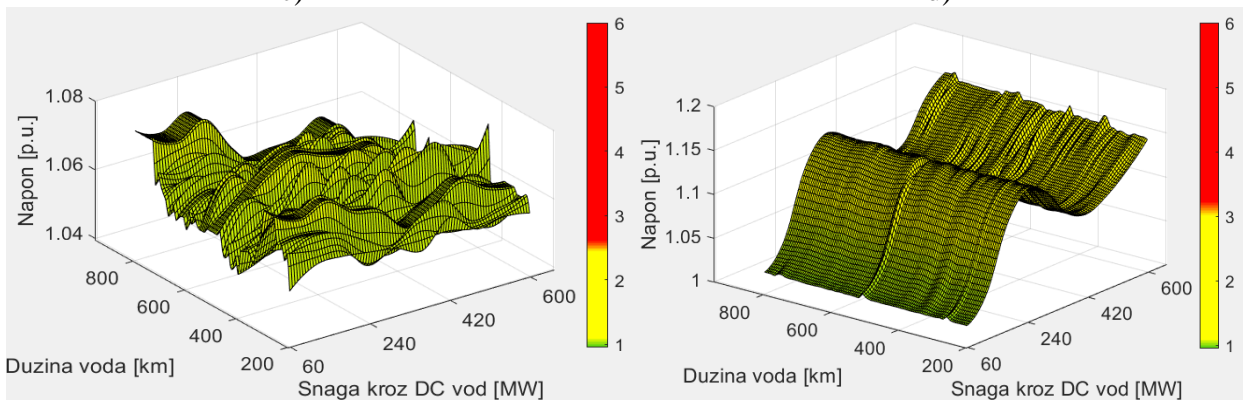
a)

b)



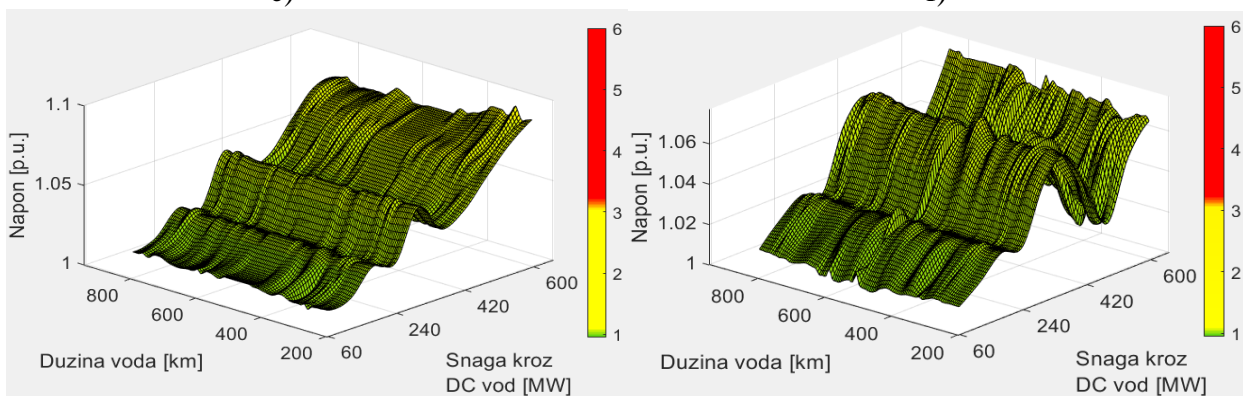
c)

d)



e)

f)



g)

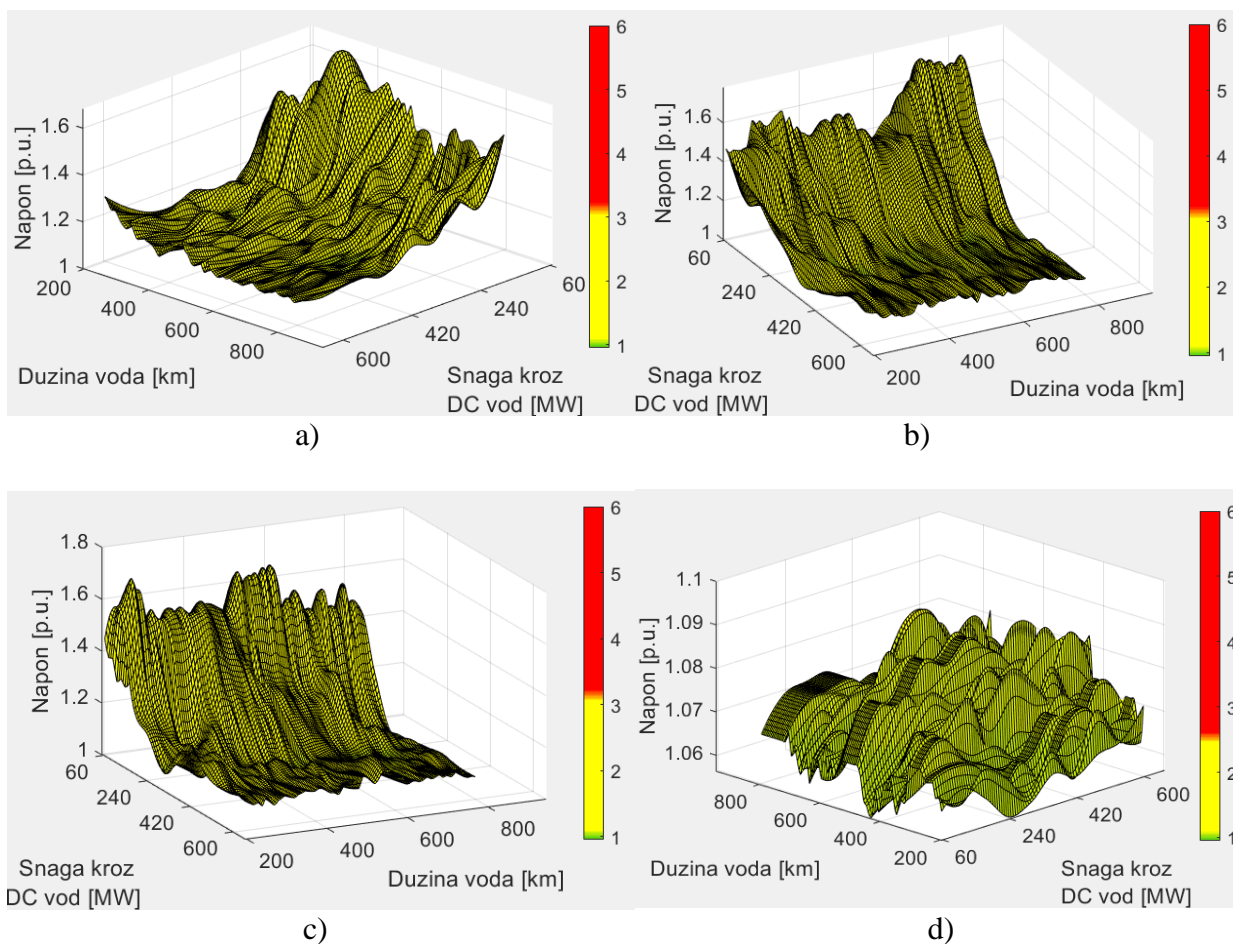
h)

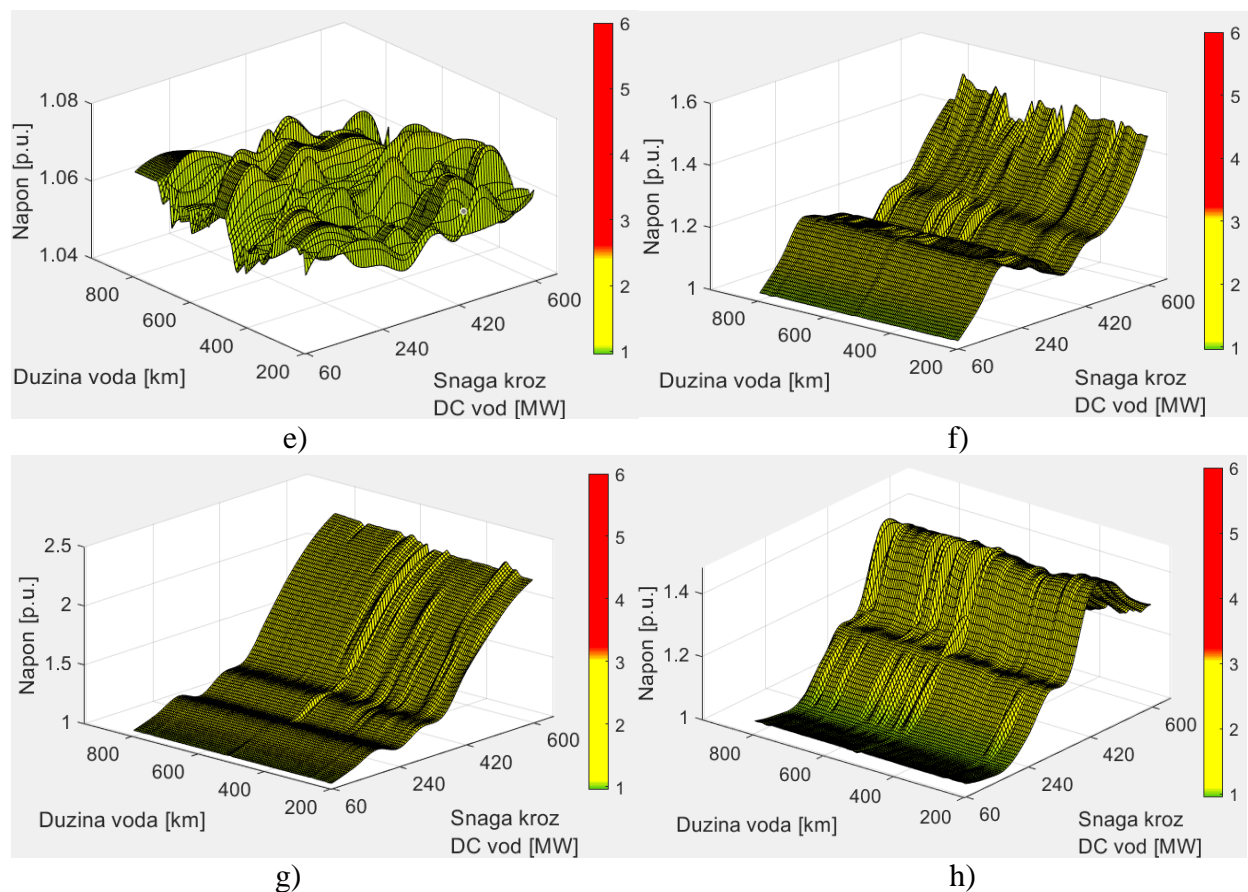
Slika 46. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog jednofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani invertora i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B), c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4 (Faza A), g) mjernom mjestu 4 (Faza B), h) mjernom mjestu 4 (Faza C)

Sa grafika prikazanih na slici 46. se može zaključiti da u slučaju prolaznog jednofaznog kratkog spoja, u trajanju od 50 ms u AC sistemu na strani invertora, na mjernim mjestima ne dolazi do pojave prenapona čija vrijednost ugrožava izolaciju.

Primjer 7: Prolazni trofazni kratki spoj u AC sistemu na strani invertora

Za potrebe proračuna u ovom primjeru, koristi se model sistema u Simulink-u koji je identičan modelu iz primjera 6 pri čemu se umjesto jednofaznog kratkog spoja simulira trofazni kratki spoj. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona u tačkama 1,2,3 i 4 od dužine HVDC sistema i snage koja se prenosi HVDC sistemom je prikazana na slici 47.





Slika 47. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog trofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani invertora i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B), c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4 (Faza A), g) mjernom mjestu 4 (Faza B), h) mjernom mjestu 4 (Faza C)

Sa grafika prikazanih na slici 47. se može zaključiti da u slučaju prolaznog trofaznog kratkog spoja, u trajanju od 50 ms u AC sistemu na strani invertora, na mjernim mjestima ne dolazi do pojave prenapona čija vrijednost ugrožava izolaciju.

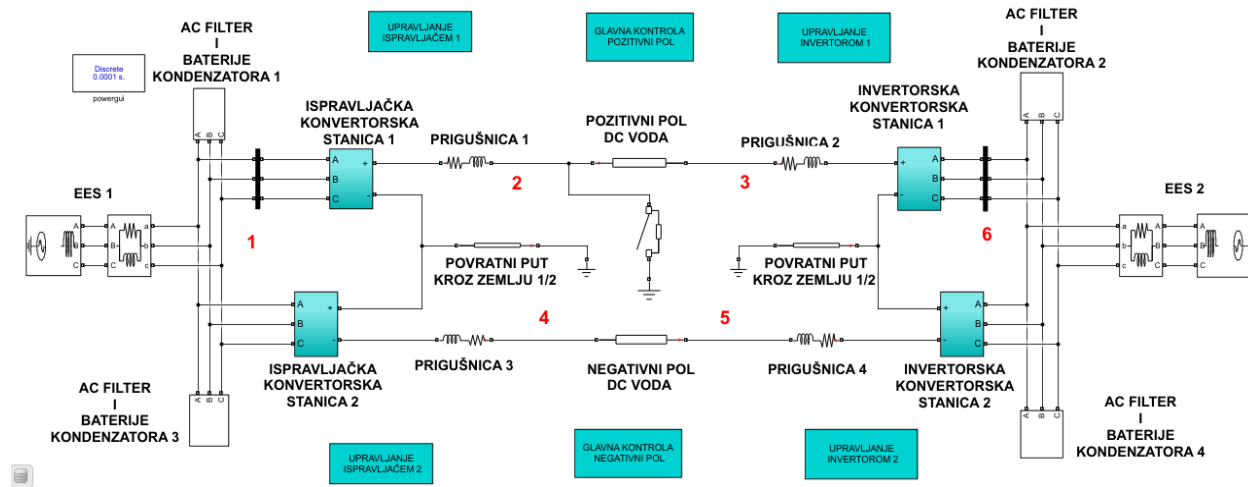
6.1.2 Analiza prenapona kod bipolarne konfiguracije

U primjerima koji slijede su analizirani prenaponi koji se kod bipolarne konfiguracije pojavljuju na određenim mjestima prilikom prolaznog kratkog spoja. Vrijeme trajanja prolaznog kratkog spoja iznosi 50 ms dok se u različitim primjerima posmatraju različita mjesta nastanka kratkog spoja kao i različiti tipovi kratkih spojeva. Na slikama na kojima su prikazani odgovarajući modeli sistema u Simulink-u sa brojevima 1,2,3,4,5 i 6 su označena mjesta na kojima se vrši mjerenje napona. U svakom primjeru razmatrane su dužine HVDC sistema u opsegu od 200 km do 800 km. Takođe, za svaku dužinu HVDC sistema posmatrane su različite vrijednosti snage koja se prenosi DC vodom i to u opsegu od 120 MW do 1200 MW. Zbog ograničenja u pogledu broja simulacija koje je potrebno izvršiti kao i vremena potrebnog za njihovo izvršenje, promjena dužine HVDC sistema i snage koja se prenosi sistemom je vršena u

koracima od 10 km i 120 MW, respektivno. Kao rezultati svakog primjera prikazani su grafici zavisnosti maksimalnih vrijednosti napona na mjernim mjestima od duzine HVDC sistema i snage koja se prenosi HVDC sistemom. Naponi su izrazeni u jedinicnim vrijednostima pri čemu bazna vrijednost napona na mjernim mjestima 1 i 6 iznosi 326.011 kV, dok bazna vrijednost na mjernim mjestima 2, 3, 4 i 5 iznosi 500 kV. Zbog ograničenog broja simulacija, odnosno kombinacija duzina HVDC sistema i snaga kroz HVDC sistem izvršena je interpolacija dobijenih rezultata.

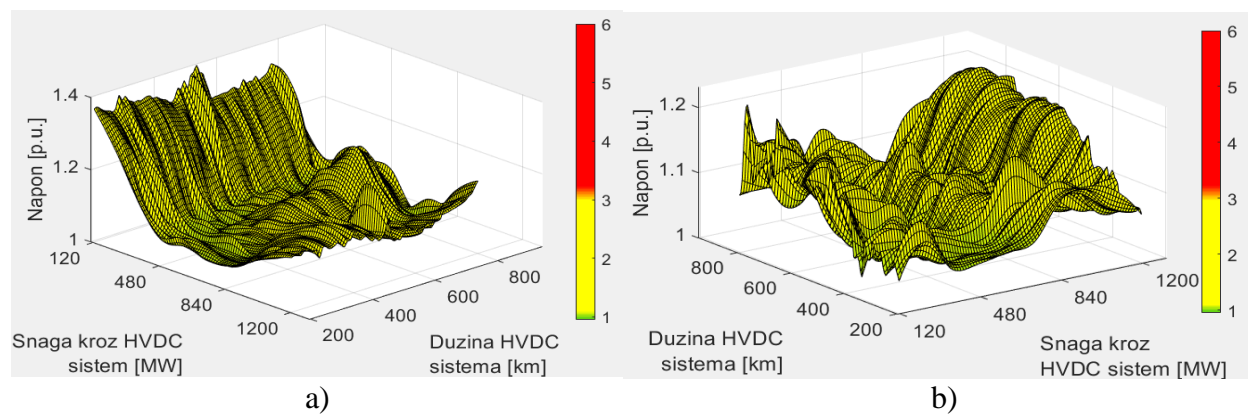
Primjer 1: Prolazni kratki spoj na kraju DC voda (pozitivni pol) na strani ispravljača

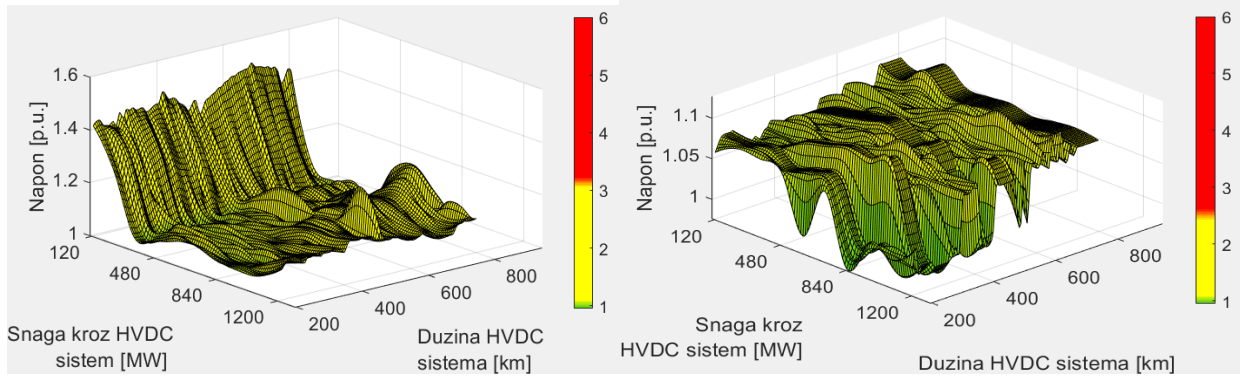
Za potrebe proračuna u ovom primjeru korišćen je model sistema u Simulink-u prikazan na slici 48. Kratki spoj je modelovan u tački 2.



Slika 48. Model sistema u Simulink-u formiran za potrebe analize prenapona u slučaju prolaznog kratkog spoja na kraju DC voda (pozitivni pol) na strani ispravljača

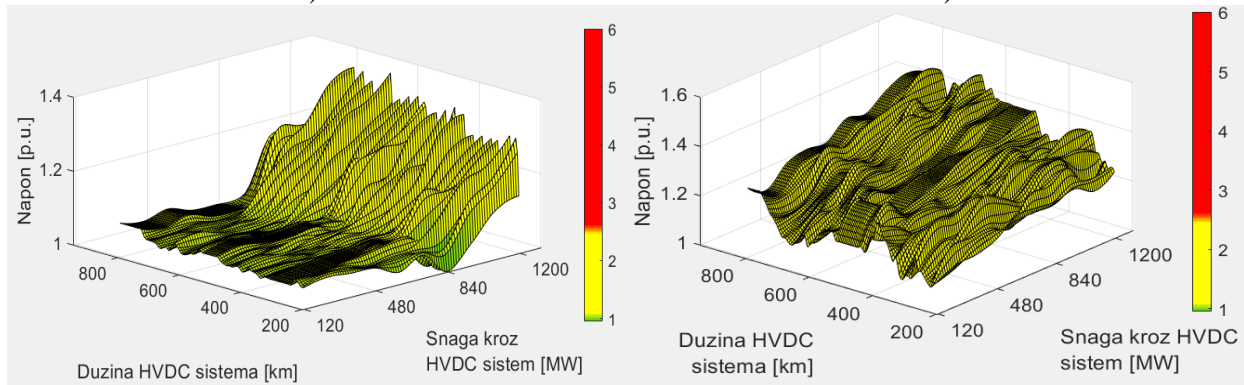
Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona u tačkama 1,2,3,4,5 i 6 od duzine HVDC sistema i snage koja se prenosi HVDC sistemom je prikazana na slici 49.





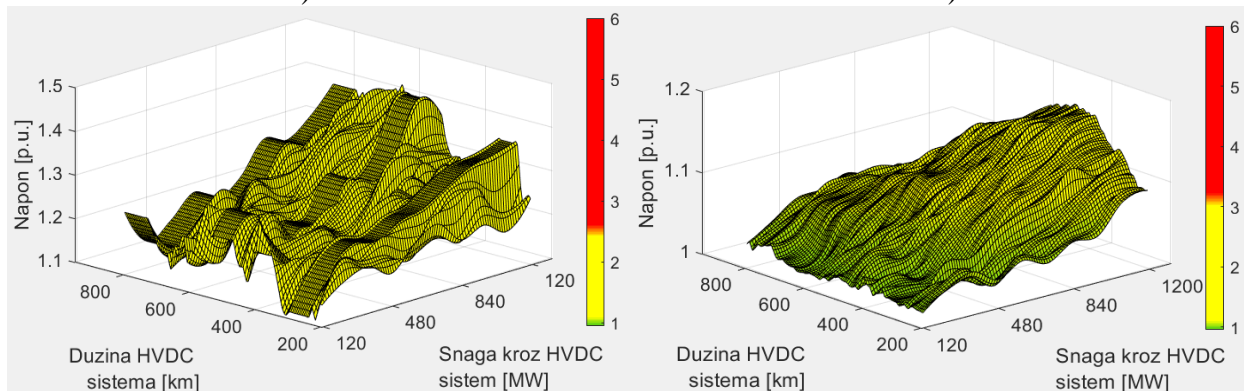
c)

d)



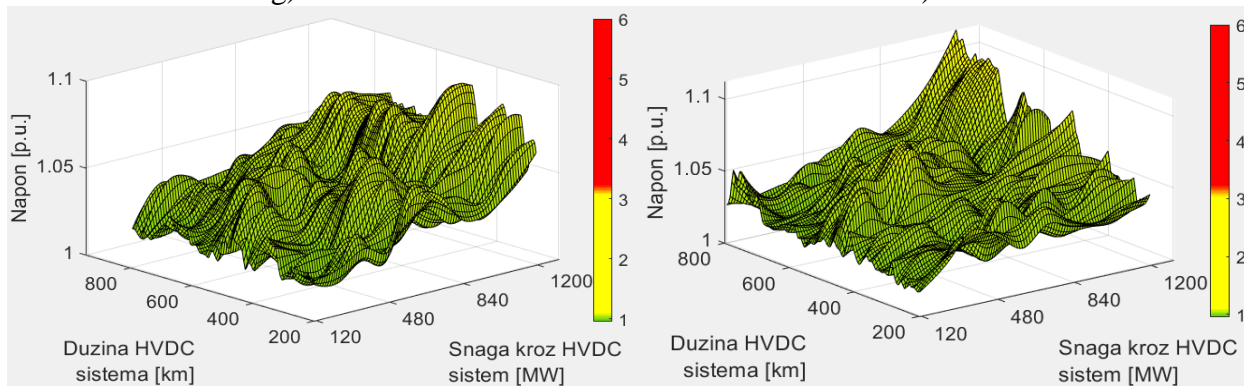
e)

f)



g)

h)



i)

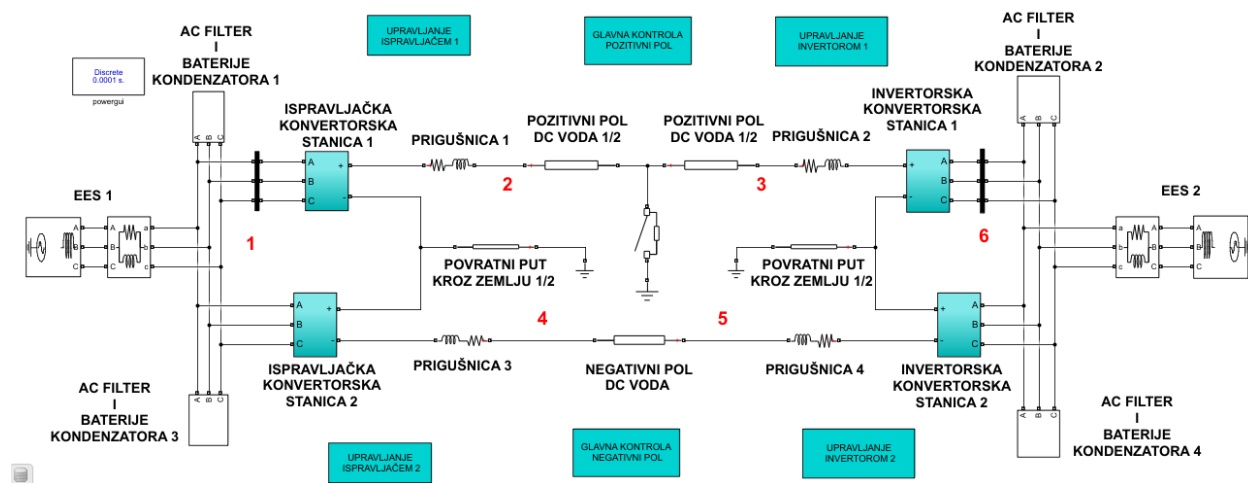
j)

Slika 49. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog kratkog spoja na kraju DC voda (pozitivni pol) na strani ispravljača i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B), c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4, g) mjernom mjestu 5, h) mjernom mjestu 6 (Faza A), i) mjernom mjestu 6 (Faza B), j) mjernom mjestu 6 (Faza C)

Sa grafika prikazanih na slici 49. se može zaključiti da u slučaju prolaznog kratkog spoja, u trajanju od 50 ms na kraju DC voda (pozitivni pol) na strani ispravljača, na mjernim mjestima ne dolazi do pojave prenapona čija vrijednost ugrožava izolaciju. Ukoliko se uporede grafici maksimalnih napona pri prolaznom kratkom spoju na istom mjestu kod monopolarne i bipolarne konfiguracije može se zaključiti da se kod bipolarne konfiguracije u AC sistemu na strani ispravljača javljaju niže vrijednosti napona u odnosu na monopolarnu konfiguraciju. Posmatrajući ostala mjerna mjesta može se zaključiti da se kod obje konfiguracije dobijaju približno iste vrijednosti maksimalnih napona.

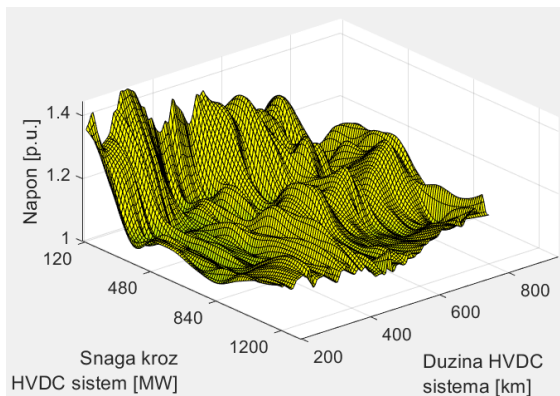
Primjer 2: Prolazni kratki spoj na sredini DC voda (pozitivni pol)

Za potrebe proračuna u ovom primjeru korišćen je model sistema u Simulink-u prikazan na slici 50.

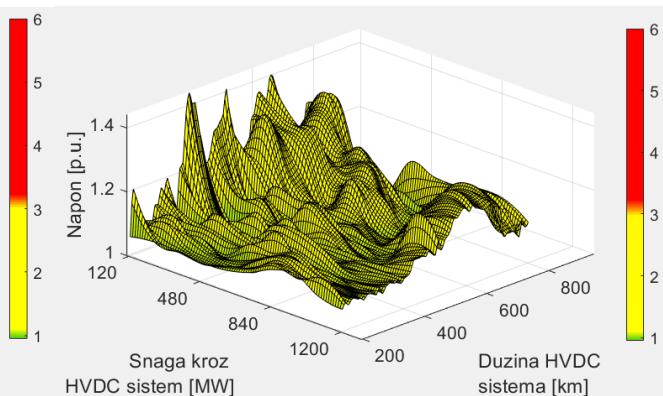


Slika 50. Model sistema u Simulink-u formiran za potrebe analize prenapona u slučaju prolaznog kratkog spoja na sredini DC voda (pozitivni pol)

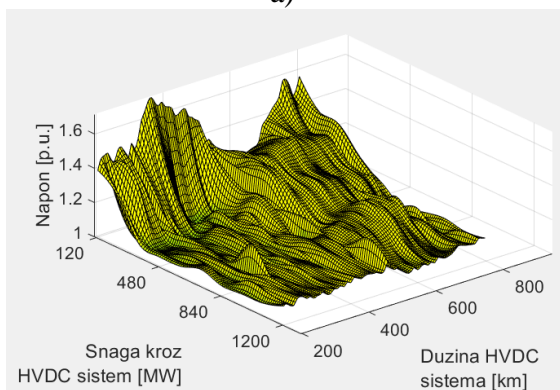
Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona u tačkama 1,2,3,4,5 i 6 od dužine HVDC sistema i snage koja se prenosi HVDC sistemom je prikazana na slici 51.



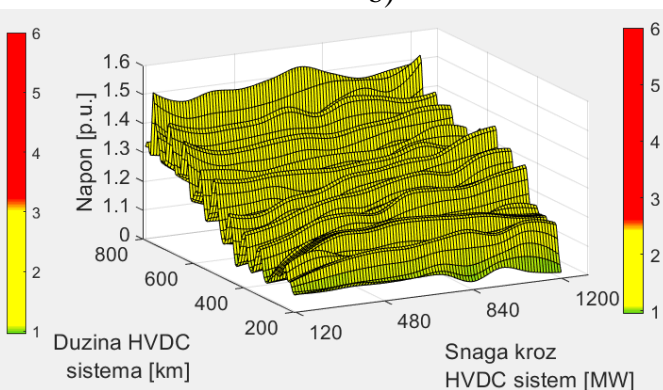
a)



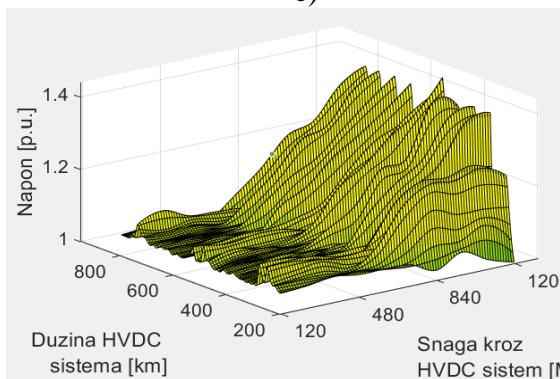
b)



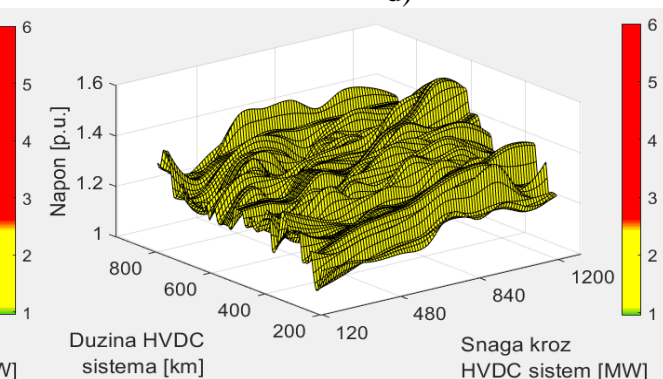
c)



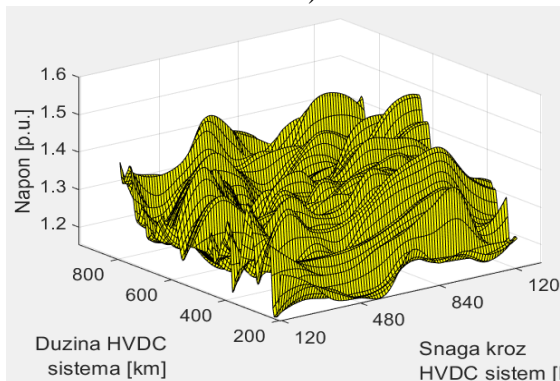
d)



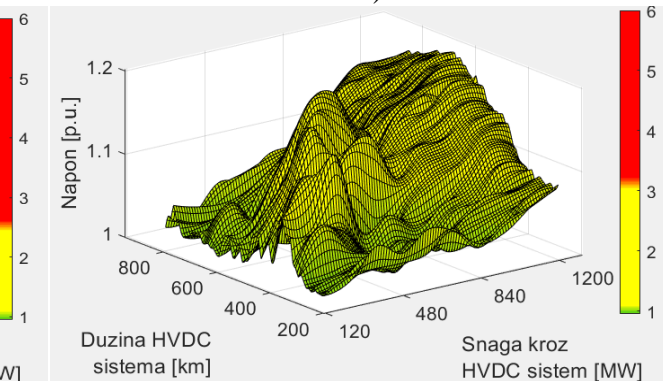
e)



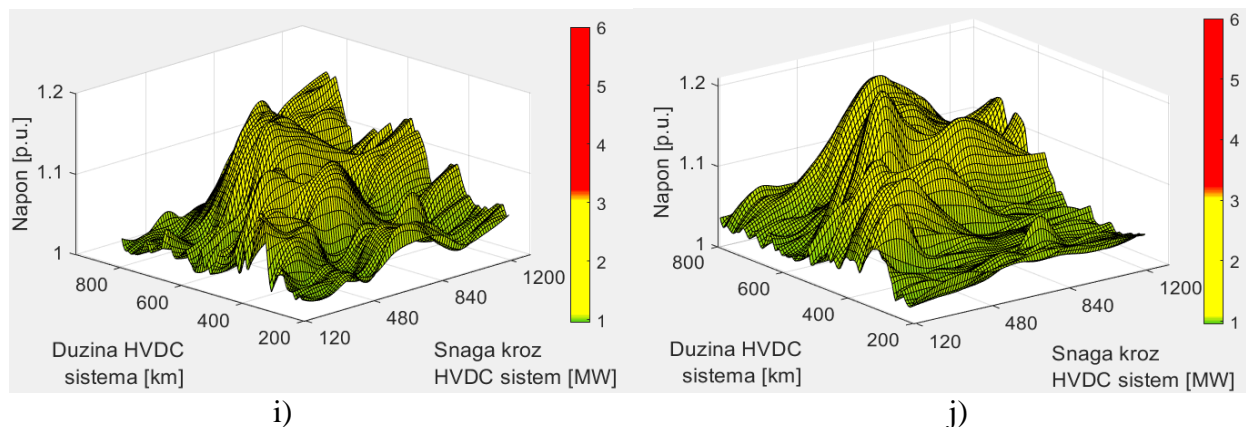
f)



g)



h)

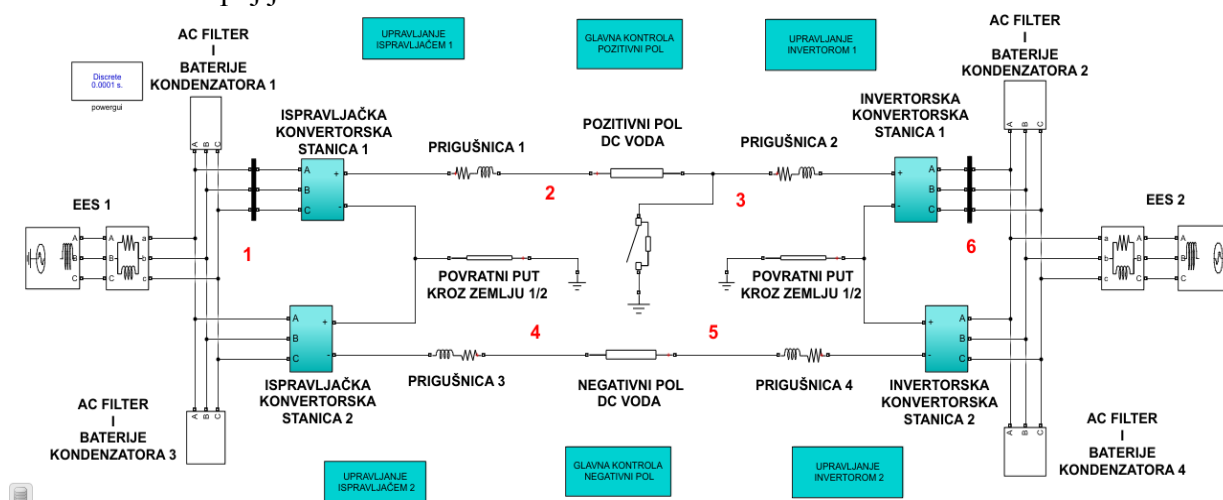


Slika 51. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog kratkog spoja na sredini DC voda (pozitivni pol) i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B), c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4, g) mjernom mjestu 5, h) mjernom mjestu 6 (Faza A), i) mjernom mjestu 6 (Faza B), j) mjernom mjestu 6 (Faza C)

Sa grafika prikazanih na slici 51. se može zaključiti da u slučaju prolaznog kratkog spoja, u trajanju od 50 ms na sredini DC voda (pozitivni pol), na mjernim mjestima ne dolazi do pojave prenapona čija vrijednost ugrožava izolaciju. Ukoliko se uporede grafici maksimalnih napona pri prolaznom kratkom spoju na istom mjestu kod monopolarne i bipolarne konfiguracije može se zaključiti da se kod bipolarne konfiguracije u AC sistemu na strani ispravljača javljaju niže vrijednosti maksimalnih napona. Posmatrajući ostala mjerna mjesta može se zaključiti da se kod obje konfiguracije dobijaju slične vrijednosti maksimalnih napona.

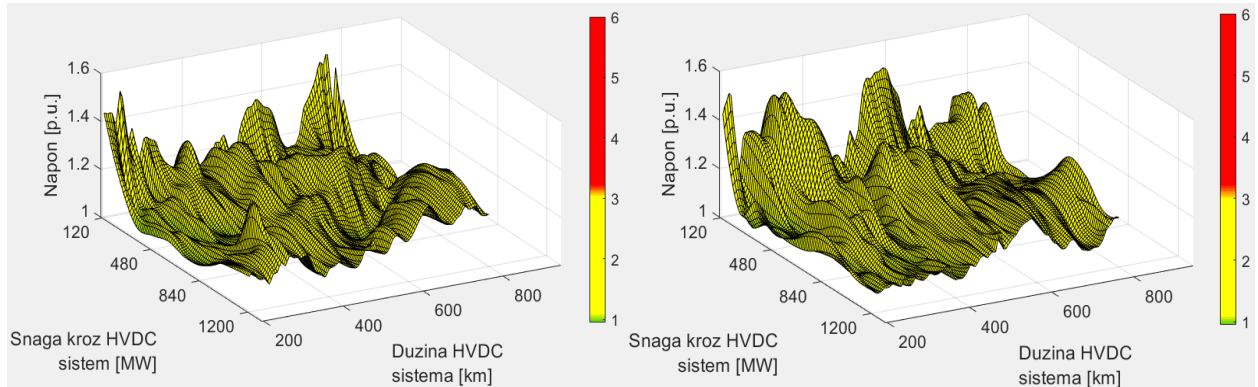
Primjer 3: Prolazni kratki spoj na kraju DC voda (pozitivni pol) na strani invertora

Za potrebe proračuna u ovom primjeru korišćen je model sistema u Simulink-u prikazan na slici 52. Kratki spoj je modelovan u tački 3.



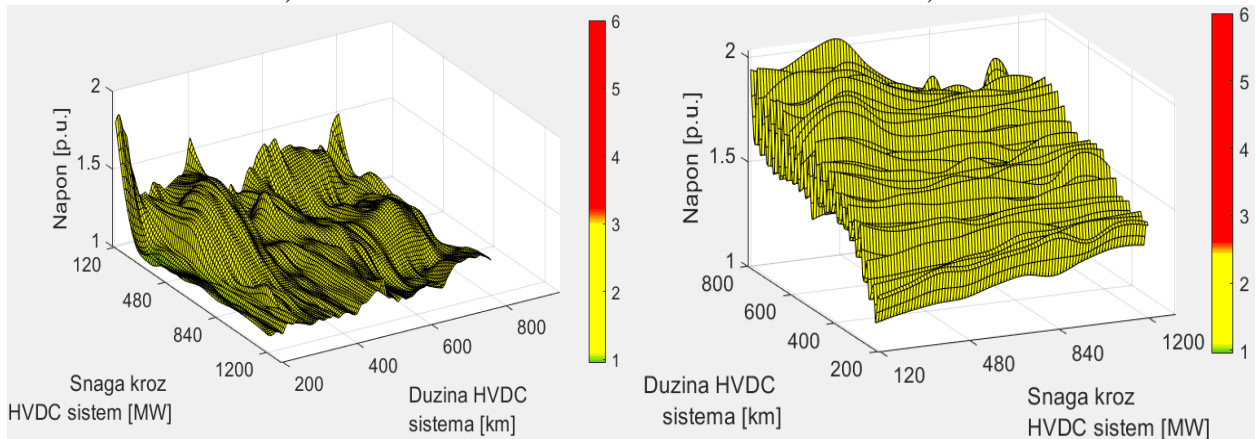
Slika 52. Model sistema u Simulink-u formiran za potrebe analize prenapona u slučaju prolaznog kratkog spoja na kraju DC voda (pozitivni pol) na strani invertora

Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona u tačkama 1,2,3,4,5 i 6 od dužine HVDC sistema i snage koja se prenosi HVDC sistemom je prikazana na slici 53.



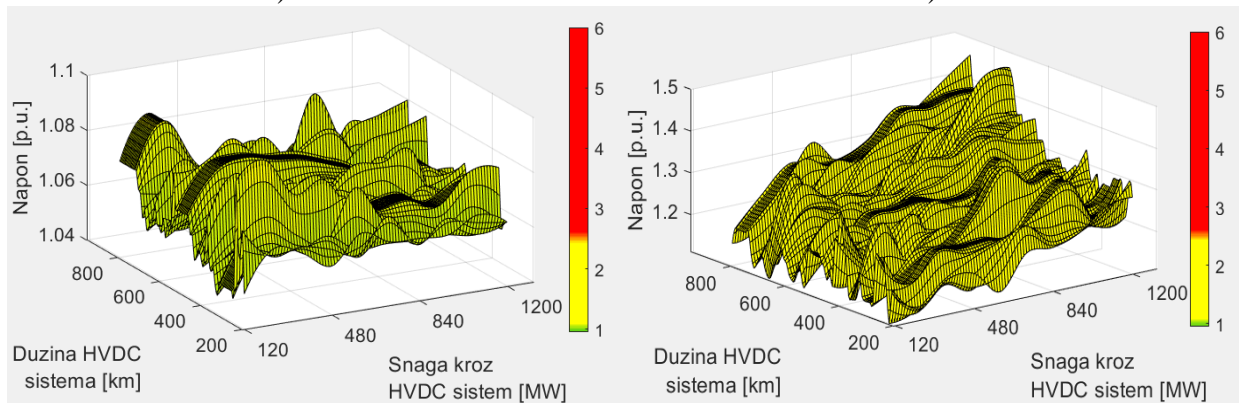
a)

b)



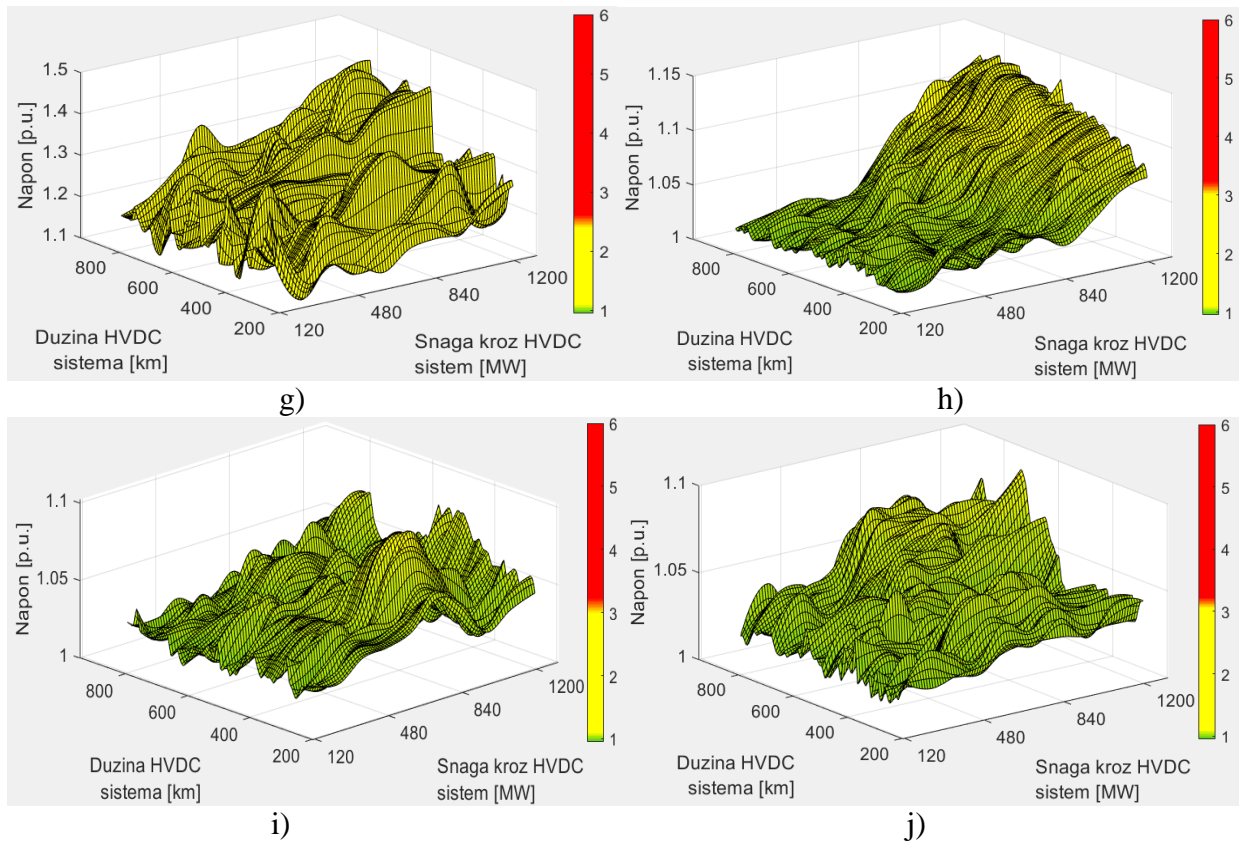
c)

d)



e)

f)

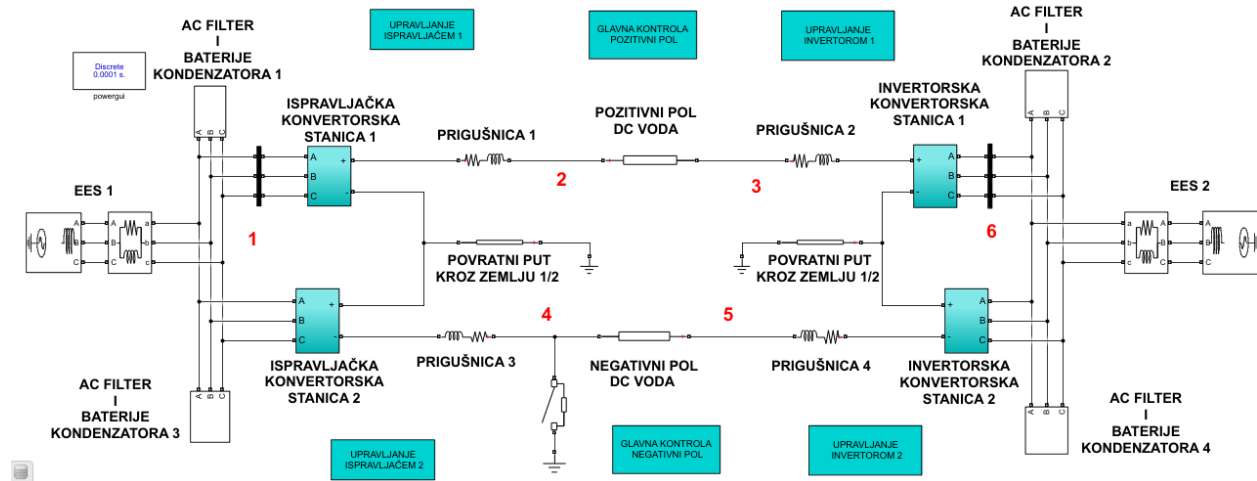


Slika 53. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog kratkog spoja na kraju DC voda (pozitivni pol) na strani invertora i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B), c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4, g) mjernom mjestu 5, h) mjernom mjestu 6 (Faza A), i) mjernom mjestu 6 (Faza B), j) mjernom mjestu 6 (Faza C)

Sa grafika prikazanih na slici 53. se može zaključiti da u slučaju prolaznog kratkog spoja, u trajanju od 50 ms na kraju DC voda (pozitivni pol) na strani invertora, na mjernim mjestima ne dolazi do pojave prenapona čija vrijednost ugrožava izolaciju. Ukoliko se uporede grafici maksimalnih napona pri prolaznom kratkom spoju na istom mjestu kod monopolarne i bipolarne konfiguracije može se zaključiti da se na svim mjernim mjestima dobijaju približno iste vrijednosti maksimalnih napona kod obje konfiguracije.

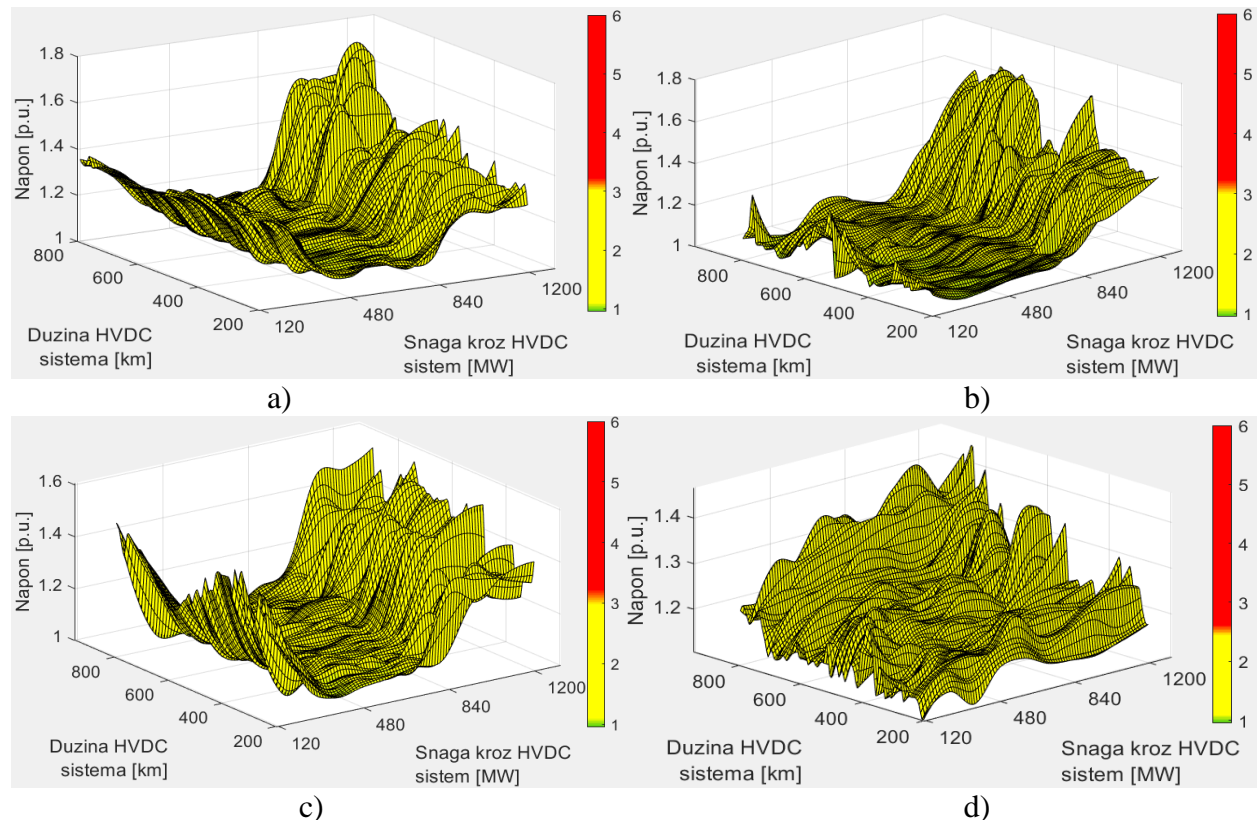
Primjer 4: Prolazni kratki spoj na kraju DC voda (negativni pol) na strani ispravljača

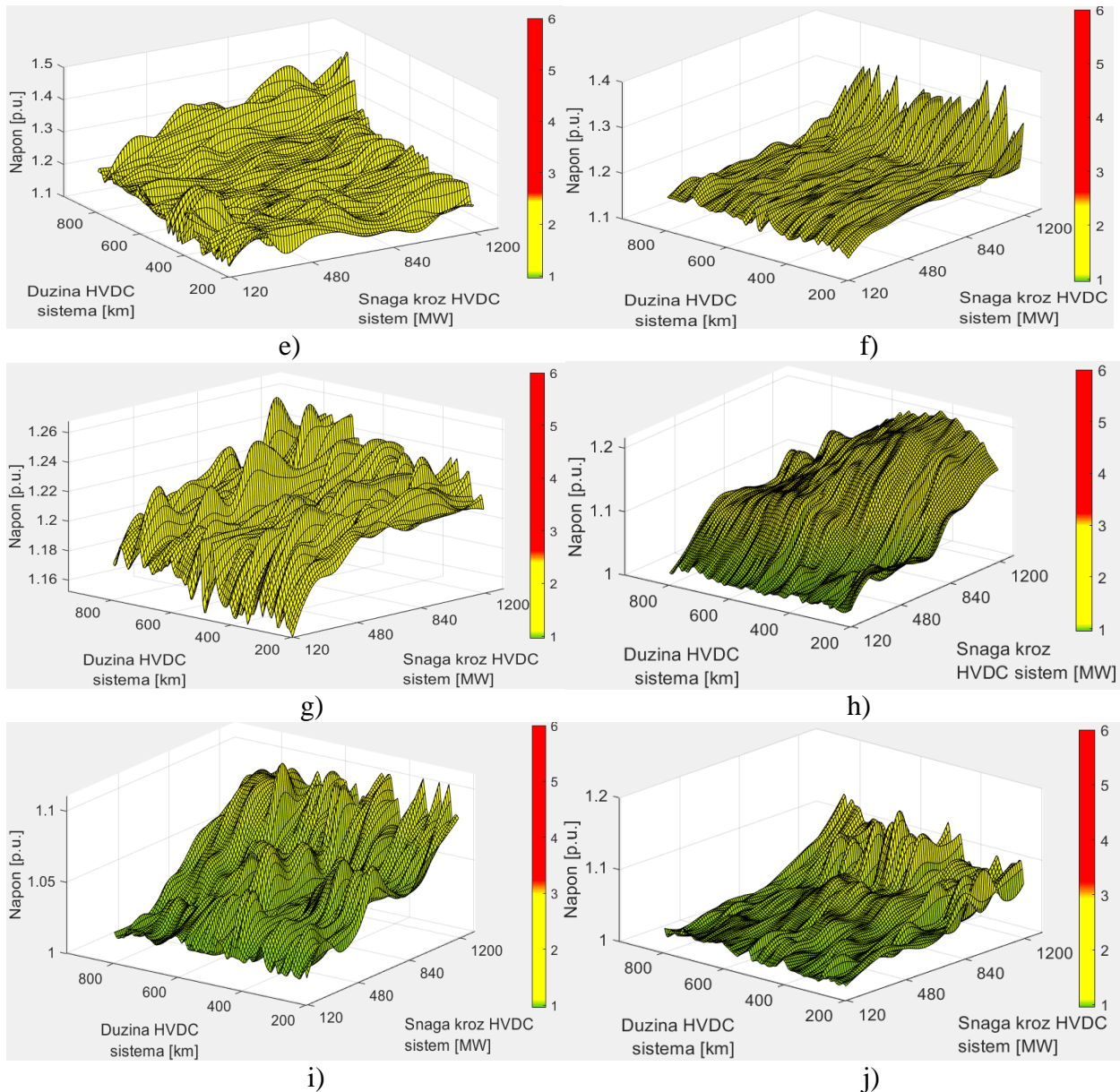
Za potrebe proračuna u ovom primjeru korišten je model sistema u Simulink-u prikazan na slici 54. Kratki spoj je modelovan u tački 4.



Slika 54. Model sistema u Simulink-u formiran za potrebe analize prenapona u slučaju prolaznog kratkog spoja na kraju DC voda (negativni pol) na strani ispravljača

Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona u tačkama 1,2,3,4,5 i 6 od dužine HVDC sistema i snage koja se prenosi HVDC sistemom je prikazana na slici 55.



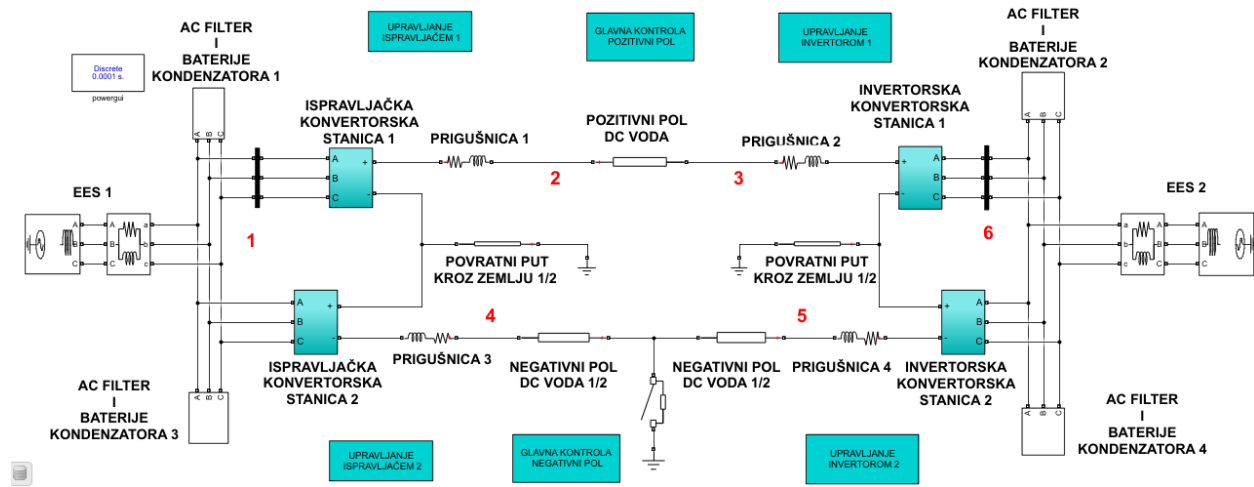


Slika 55. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog kratkog spoja na kraju DC voda (negativni pol) na strani ispravljača i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B), c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4, g) mjernom mjestu 5, h) mjernom mjestu 6 (Faza A), i) mjernom mjestu 6 (Faza B), j) mjernom mjestu 6 (Faza C)

Sa grafika prikazanih na slici 55. se može zaključiti da u slučaju prolaznog kratkog spoja, u trajanju od 50 ms na kraju DC voda (negativni pol) na strani ispravljača, na mjernim mjestima ne dolazi do pojave prenapona čija vrijednost ugrožava izolaciju.

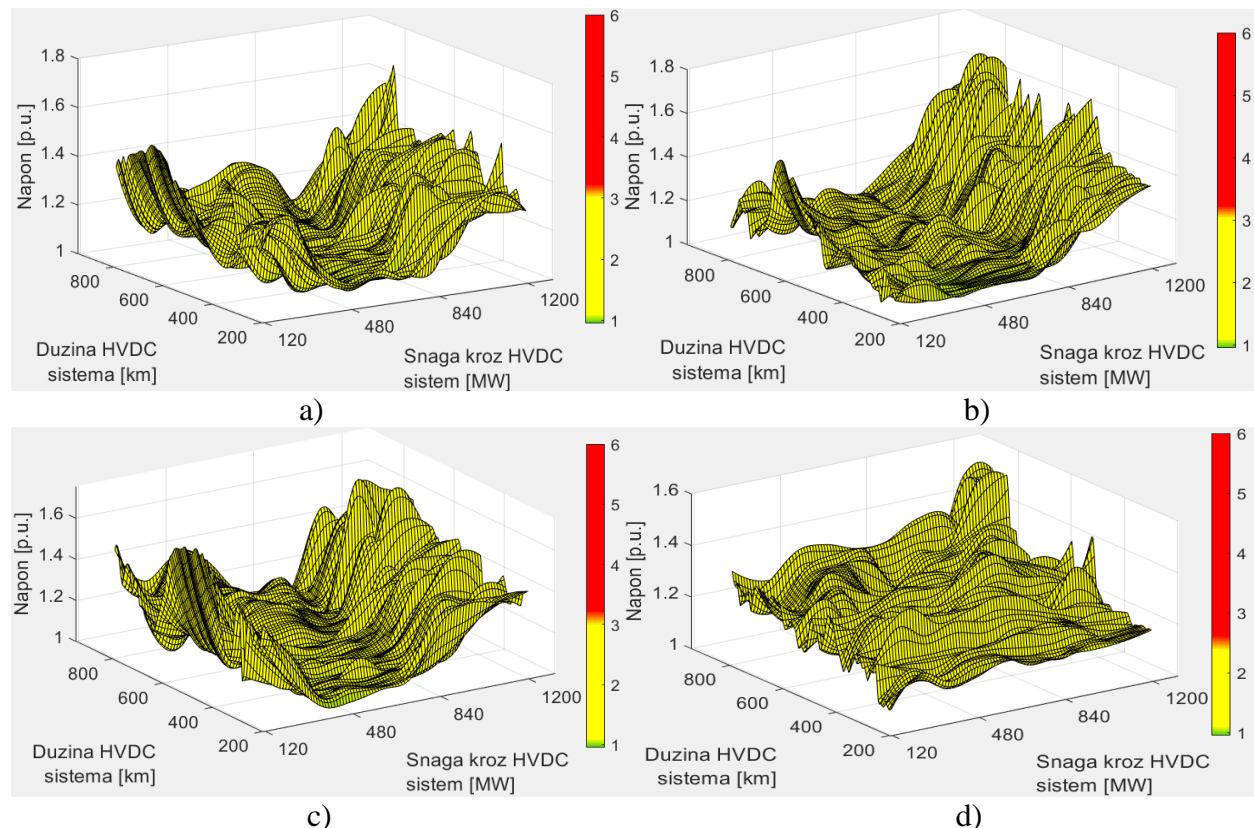
Primjer 5: Prolazni kratki spoj na sredini DC voda (negativni pol)

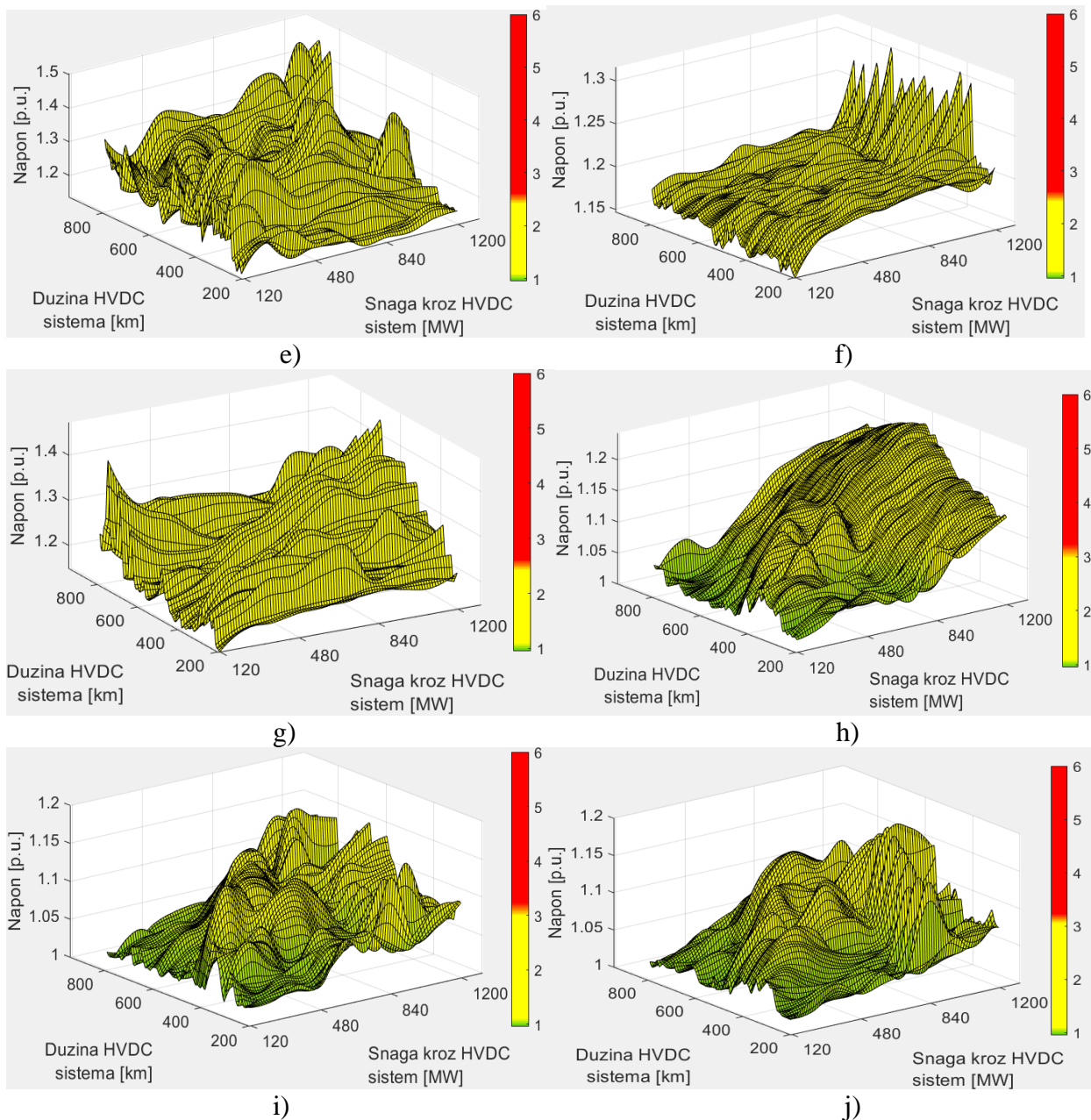
Za potrebe proračuna u ovom primjeru korišćen je model sistema u Simulink-u prikazan na slici 56.



Slika 56. Model sistema u Simulink-u formiran za potrebe analize prenapona u slučaju prolaznog kratkog spoja na sredini DC voda (negativni pol)

Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona u tačkama 1,2,3,4,5 i 6 od dužine HVDC sistema i snage koja se prenosi HVDC sistemom je prikazana na slici 57.



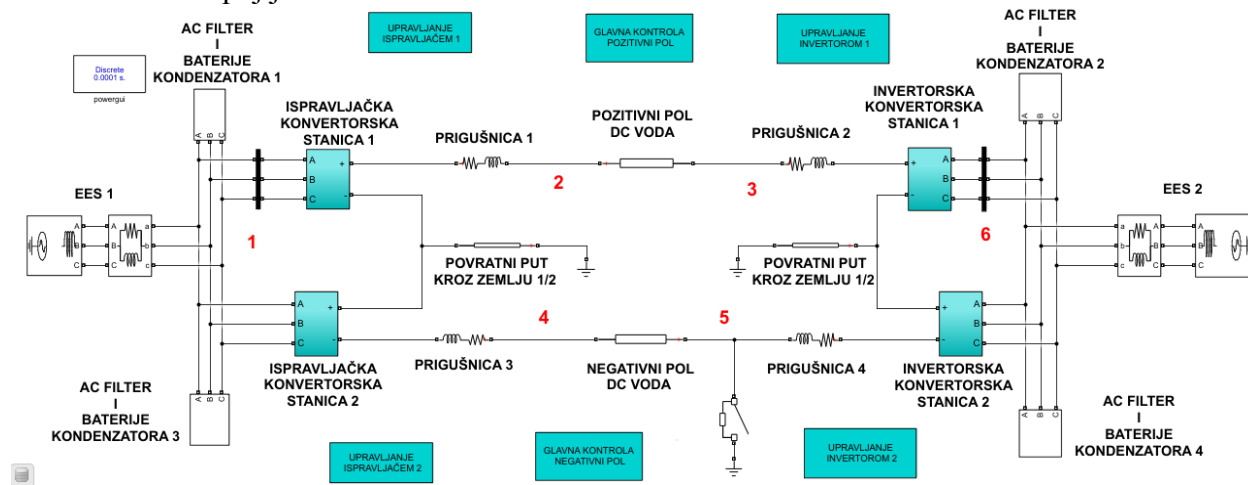


Slika 57. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog kratkog spoja na sredini DC voda (negativni pol) i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B), c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4, g) mjernom mjestu 5, h) mjernom mjestu 6 (Faza A), i) mjernom mjestu 6 (Faza B), j) mjernom mjestu 6 (Faza C)

Sa grafika prikazanih na slici 57. se može zaključiti da u slučaju prolaznog kratkog spoja, u trajanju od 50 ms na sredini DC voda (negativni pol), na mjernim mjestima ne dolazi do pojave prenapona čija vrijednost ugrožava izolaciju.

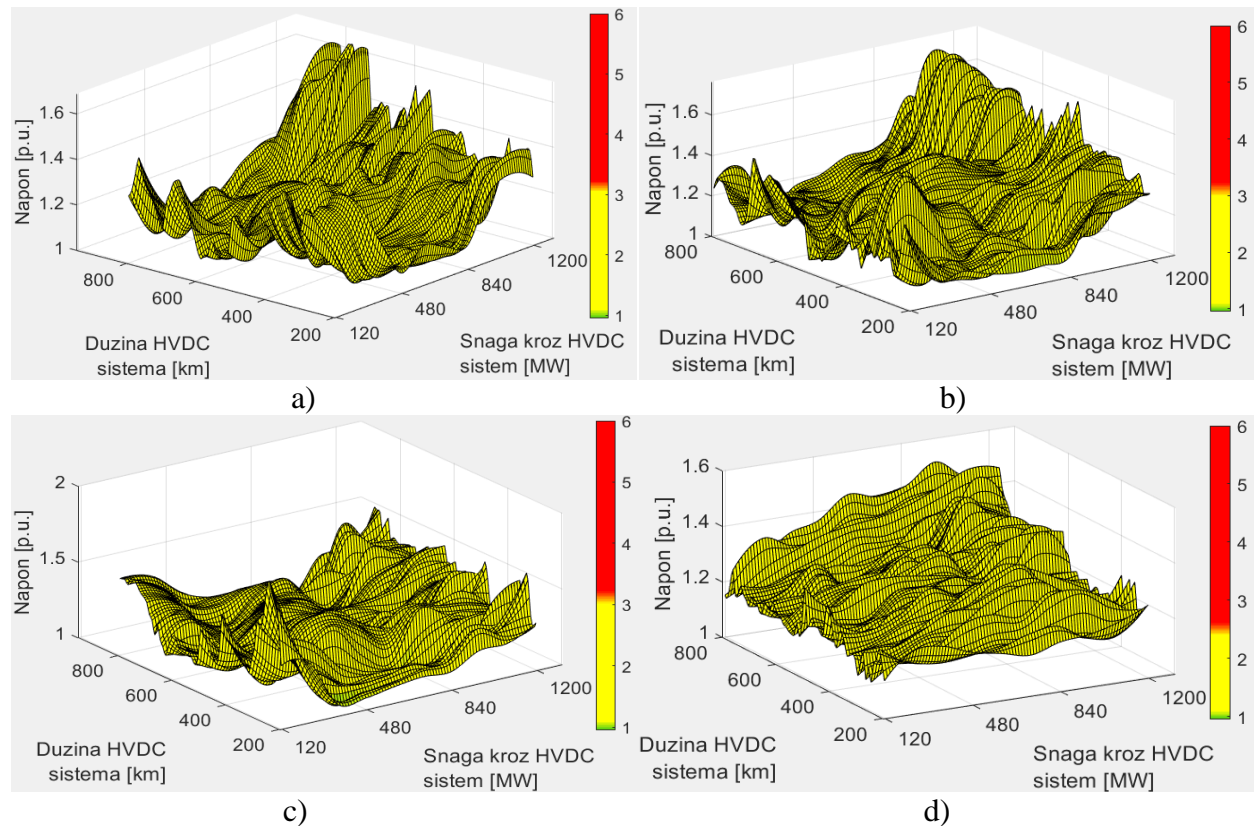
Primjer 6: Prolazni kratki spoj na kraju DC voda (negativni pol) na strani invertora

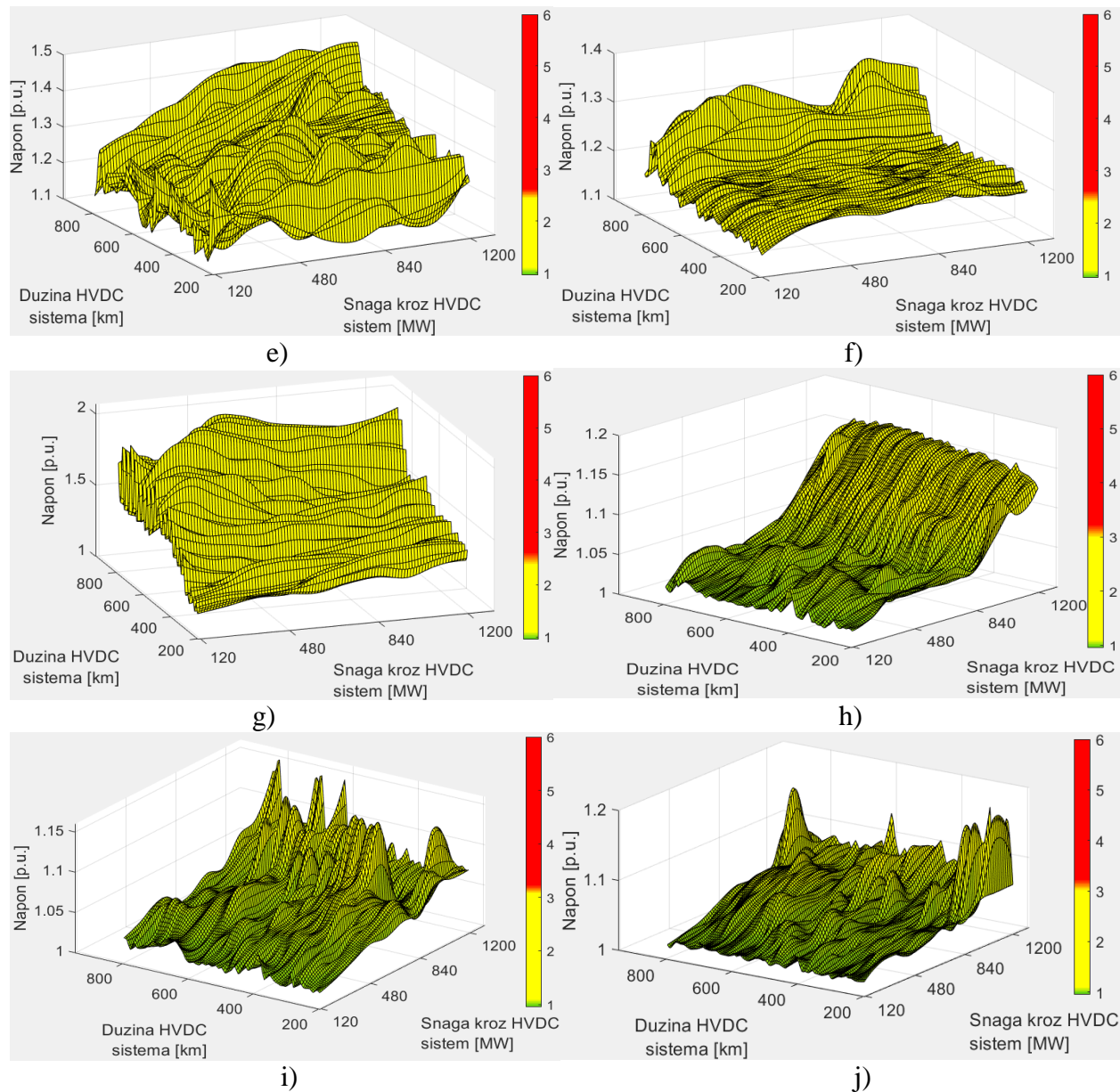
Za potrebe proračuna u ovom primjeru korišten je model sistema u Simulink-u prikazan na slici 58. Kratki spoj je modelovan u tački 5.



Slika 58. Model sistema u Simulink-u formiran za potrebe analize prenapona u slučaju prolaznog kratkog spoja na kraju DC voda (negativni pol) na strani invertora

Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona u tačkama 1,2,3,4,5 i 6 od dužine HVDC sistema i snage koja se prenosi HVDC sistemom je prikazana na slici 59.



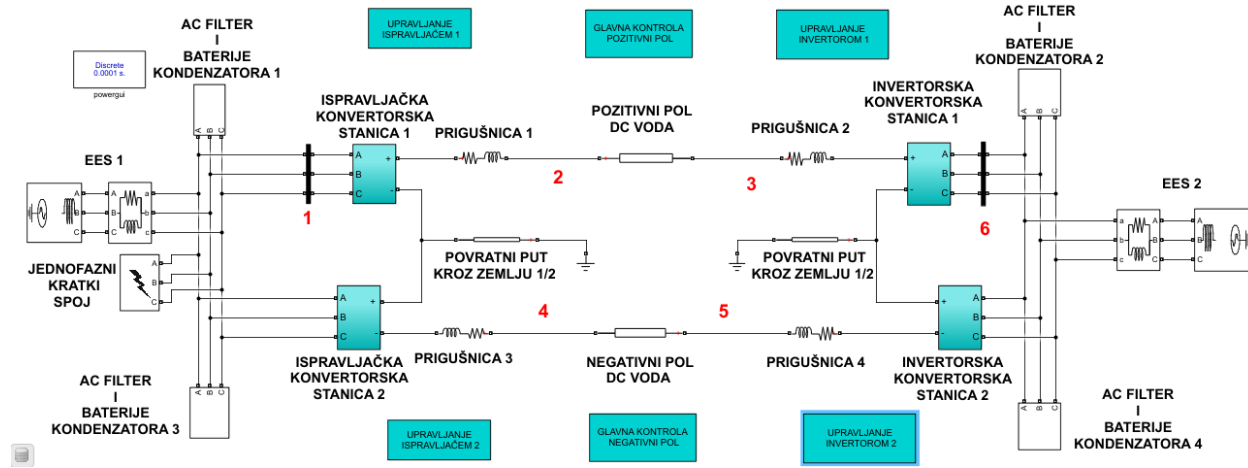


Slika 59. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog kratkog spoja na kraju DC voda (negativni pol) na strani invertora i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B), c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4, g) mjernom mjestu 5, h) mjernom mjestu 6 (Faza A), i) mjernom mjestu 6 (Faza B), j) mjernom mjestu 6 (Faza C)

Sa grafika prikazanih na slici 59. se može zaključiti da u slučaju prolaznog kratkog spoja, u trajanju od 50 ms na kraju DC voda (negativni pol) na strani invertora, na mjernim mjestima ne dolazi do pojave prenapona čija vrijednost ugrožava izolaciju.

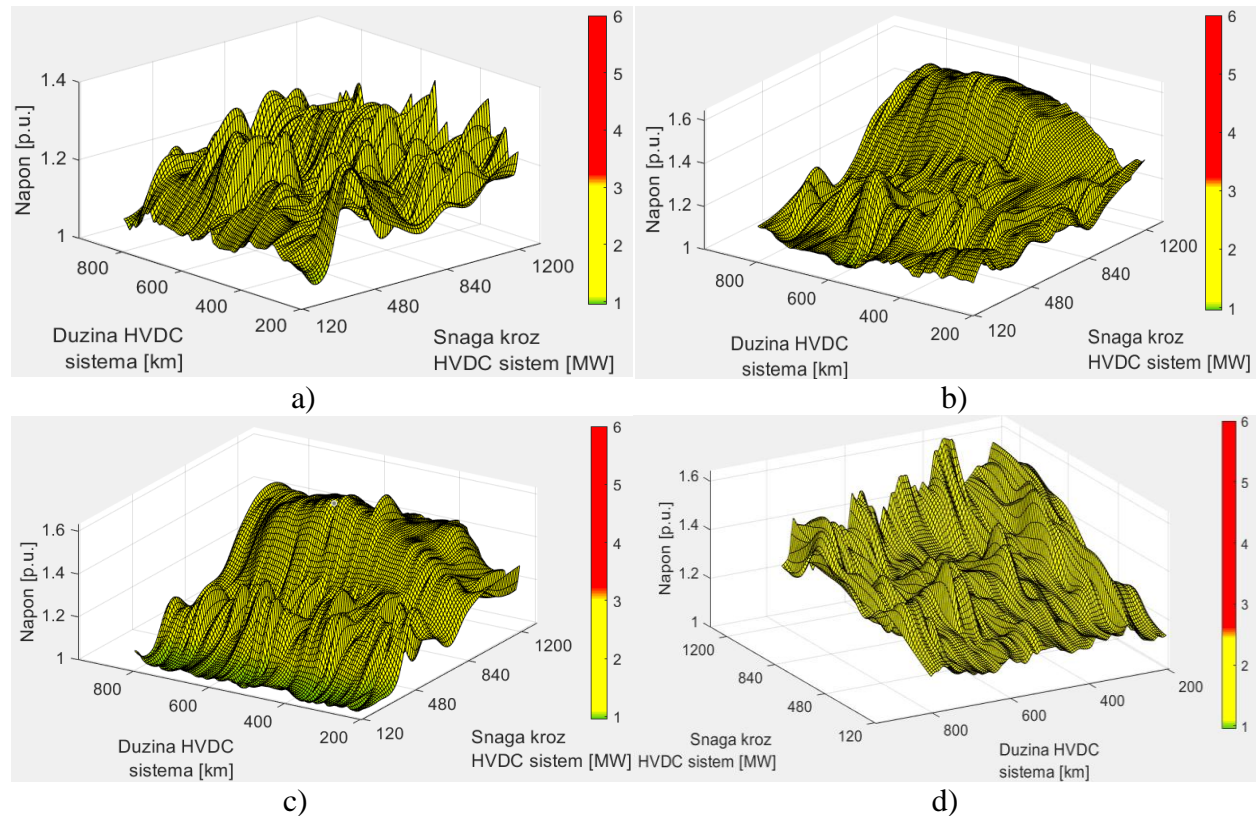
Primjer 7: Prolazni jednofazni kratki spoj u AC sistemu na strani ispravljača

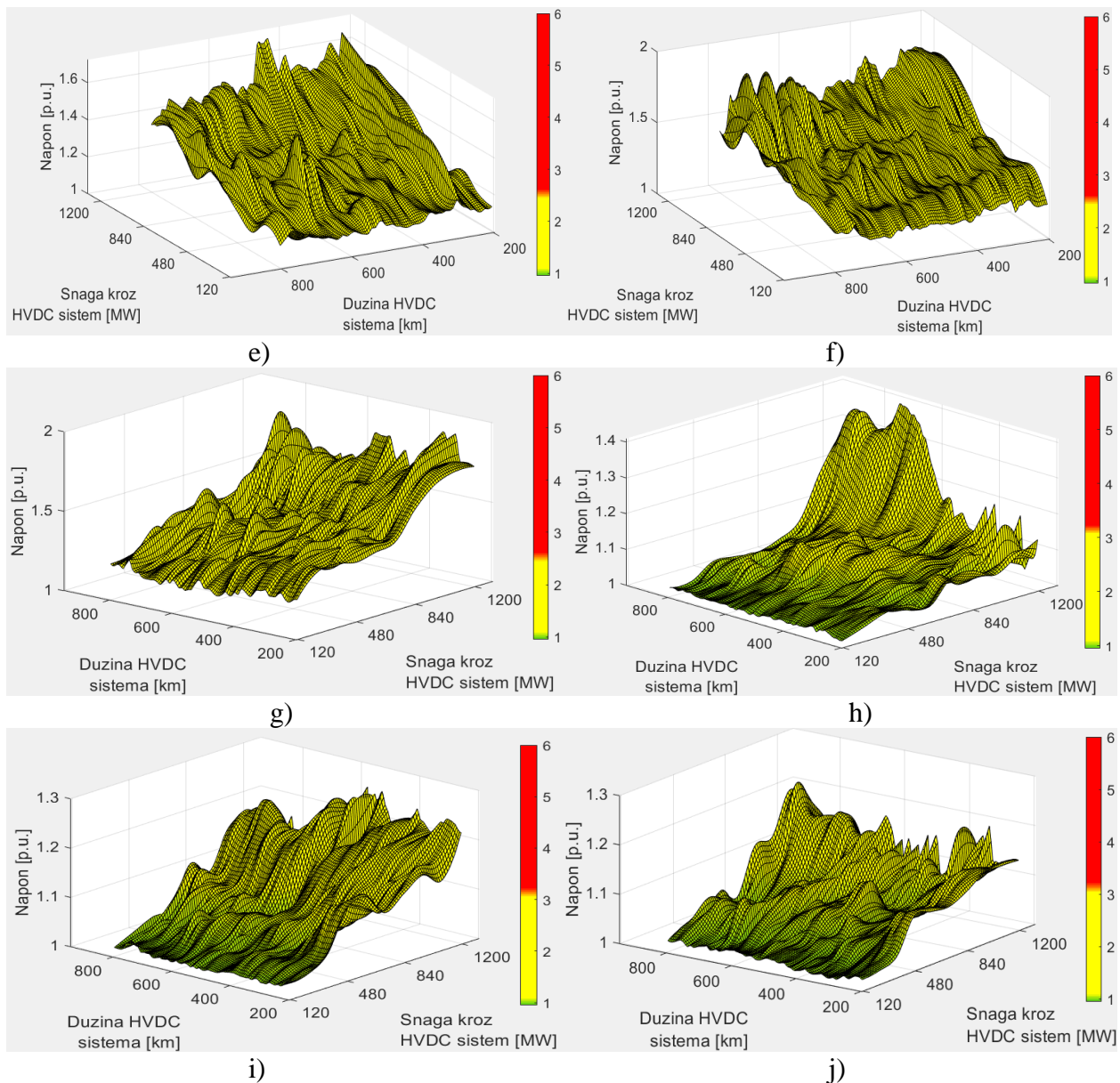
Za potrebe proračuna u ovom primjeru korišćen je model sistema u Simulink-u prikazan na slici 60.



Slika 60. Model sistema u Simulink-u formiran za potrebe analize prenapona u slučaju prolaznog jednofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani ispravljača (bipolarna konfiguracija)

Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona u tačkama 1,2,3,4,5 i 6 od dužine HVDC sistema i snage koja se prenosi HVDC sistemom je prikazana na slici 61.





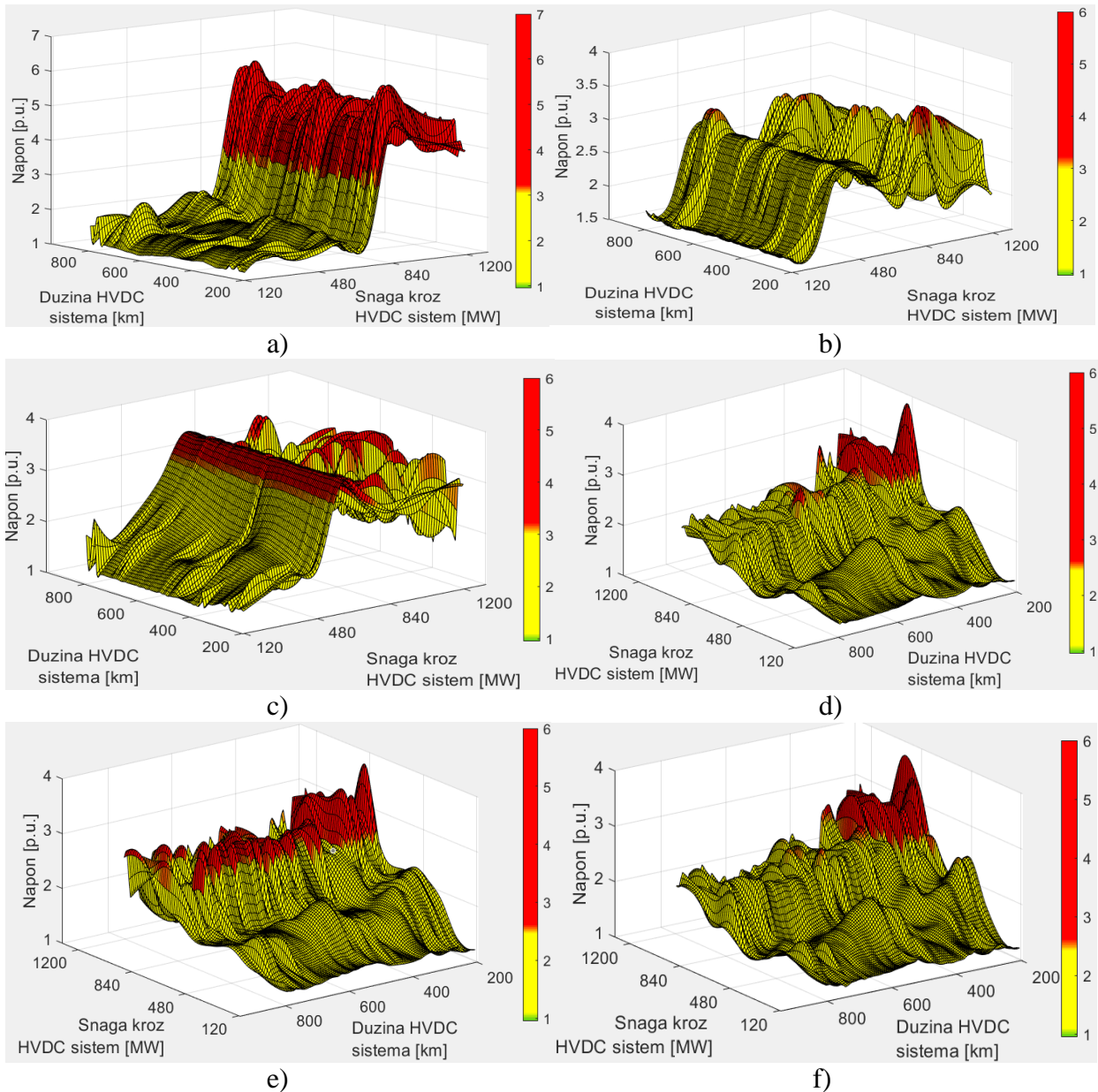
Slika 61. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog jednofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani ispravljača (bipolarna konfiguracija) i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B), c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4, g) mjernom mjestu 5, h) mjernom mjestu 6 (Faza A), i) mjernom mjestu 6 (Faza B), j) mjernom mjestu 6 (Faza C)

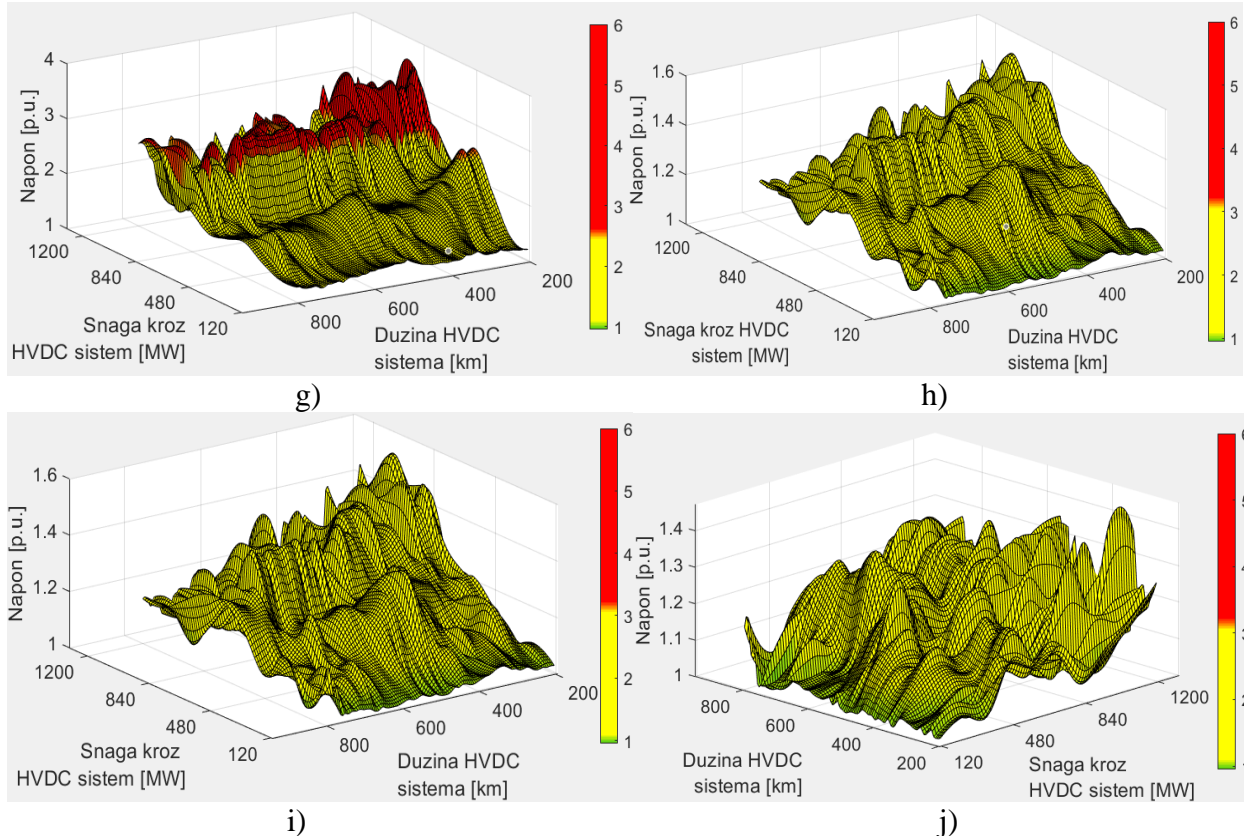
Sa grafika prikazanih na slici 61. se može zaključiti da u slučaju prolaznog jednofaznog kratkog spoja, u trajanju od 50 ms u AC sistemu na strani ispravljača, na mjernim mjestima ne dolazi do pojave prenapona čija vrijednost ugrožava izolaciju. Ukoliko se uporede grafici maksimalnih napona pri prolaznom kratkom spoju na istom mjestu kod monopolarne i bipolarne konfiguracije može se zaključiti da se kod bipolarne konfiguracije u AC sistemu na strani ispravljača javljaju niže vrijednosti napona u odnosu na monopolarnu konfiguraciju. Takođe, sa

grafika se može zaključiti da se kod bipolarne konfiguracije u AC sistemu na strani invertora javljaju nešto veće vrijednosti maksimalnih napona. Posmatrajući ostala mjerna mjesta može se zaključiti da se kod obje konfiguracije dobijaju približno iste vrijednosti maksimalnih napona.

Primjer 8: Prolazni trofazni kratki spoj u AC sistemu na strani ispravljača

Za potrebe proračuna u ovom primjeru, koristi se model sistema u Simulink-u koji je identičan modelu iz primjera 7 pri čemu se umjesto jednofaznog kratkog spoja simulira trofazni kratki spoj. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona u tačkama 1,2,3,4,5 i 6 od dužine HVDC sistema i snage koja se prenosi HVDC sistemom je prikazana na slici 62.





Slika 62. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog trofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani ispravljača (bipolarna konfiguracija) i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B), c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4, g) mjernom mjestu 5, h) mjernom mjestu 6 (Faza A), i) mjernom mjestu 6 (Faza B), j) mjernom mjestu 6 (Faza C)

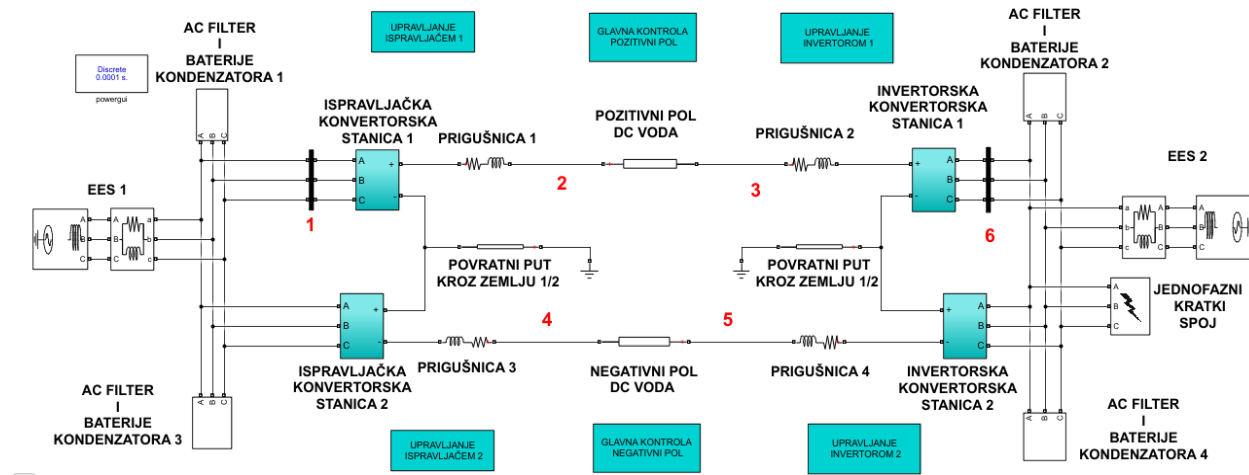
Sa grafika prikazanih na slici 62. se može zaključiti da u slučaju prolaznog trofaznog kratkog spoja, u trajanju od 50 ms u AC sistemu na strani ispravljača, na mjernim mjestima 1, 2, 3, 4 i 5 dolazi do pojave prenapona čija vrijednost ugrožava izolaciju. Naime, sa slike 62. a), b) i c) se može vidjeti da na mjernom mjestu 1 dolazi do pojave napona čija vrijednost premašuje graničnu vrijednost od 3.22 p.u. pri kojoj dolazi do ugrožavanja izolacije na ovom mjestu. Pri tome, značajno viši naponi se javljaju na fazi A u odnosu na faze B i C. Takođe, sa slike 62. d), e), f) i g) se može vidjeti da na mjernim mjestima 2, 3, 4 i 5 dolazi do pojave napona čija vrijednost premašuje graničnu vrijednost od 2.6 p.u. pri kojoj dolazi do ugrožavanja izolacije na ovim mjestima. Kako na navedenim mjernim mjestima prilikom prolaznog trofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani ispravljača dolazi do ugrožavanja izolacije to je neophodno izvršiti koordinaciju izolacije koja podrazumijeva instaliranje odvodnika prenapona.

Ukoliko se uporede grafici maksimalnih napona pri prolaznom kratkom spoju na istom mjestu kod monopolarne i bipolarne konfiguracije može se zaključiti da se kod bipolarne konfiguracije u AC sistemu na strani ispravljača javljaju veće maksimalne vrijednosti napona u odnosu na monopolarnu konfiguraciju. Posmatrajući grafike koji se odnose na mjerna mjesta u DC mreži može se zaključiti da se kod bipolarne konfiguracije na ovim mjernim mjestima

javljanju veće maksimalne vrijednosti napona u odnosu na monopolarnu konfiguraciju. Takođe, sa grafika se može zaključiti da se kod bipolarne konfiguracije u AC sistemu na strani invertora javljaju nešto veće vrijednosti maksimalnih napona nego što je to slučaj kod monopolarne konfiguracije.

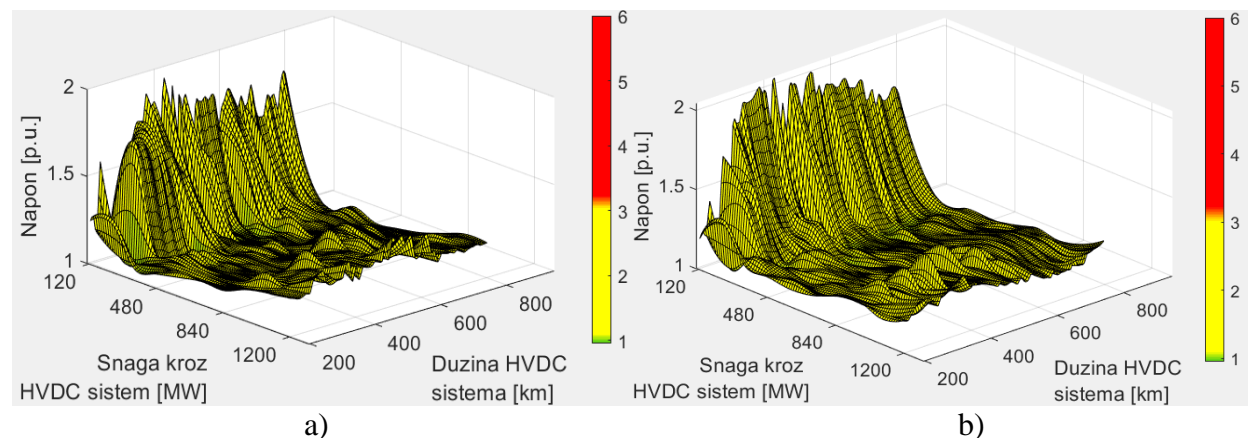
Primjer 9: Prolazni jednofazni kratki spoj u AC sistemu na strani invertora

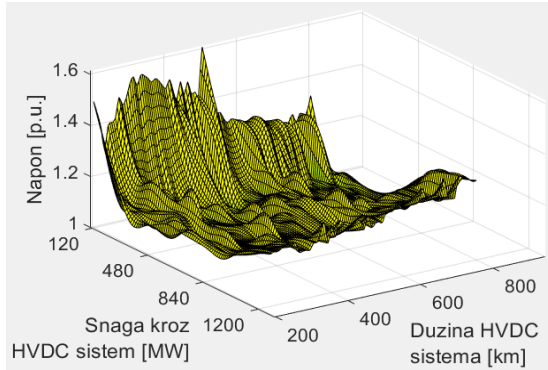
Za potrebe proračuna u ovom primjeru korišćen je model sistema u Simulink-u prikazan na slici 63.



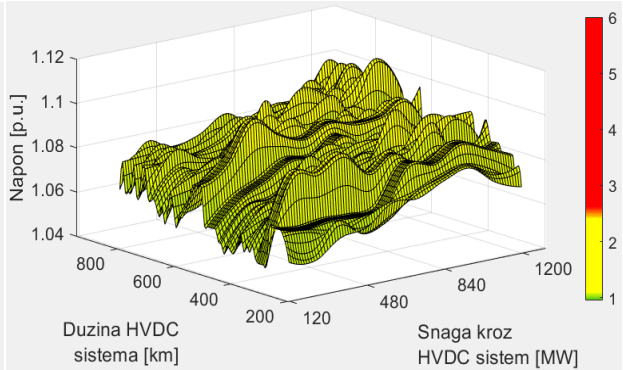
Slika 63. Model sistema u Simulink-u formiran za potrebe analize prenapona u slučaju prolaznog jednofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani invertora (bipolarna konfiguracija)

Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona u tačkama 1,2,3,4,5 i 6 od dužine HVDC sistema i snage koja se prenosi HVDC sistemom je prikazana na slici 64.

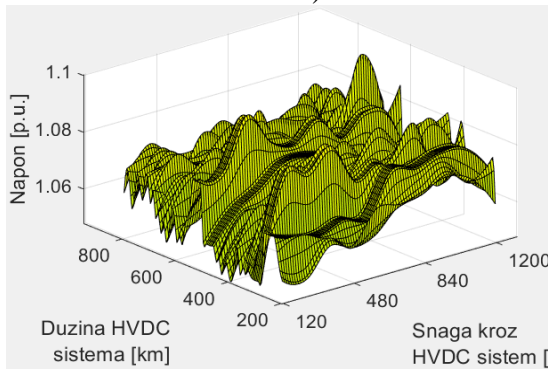




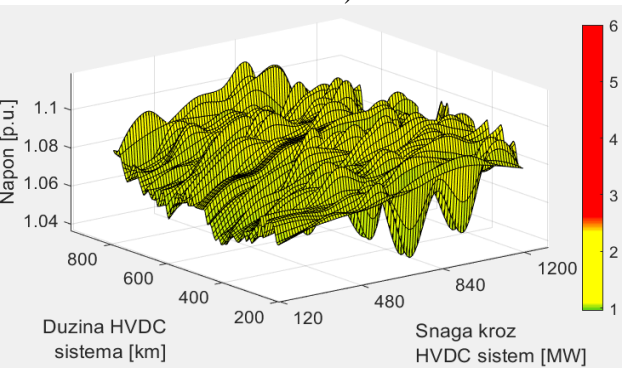
c)



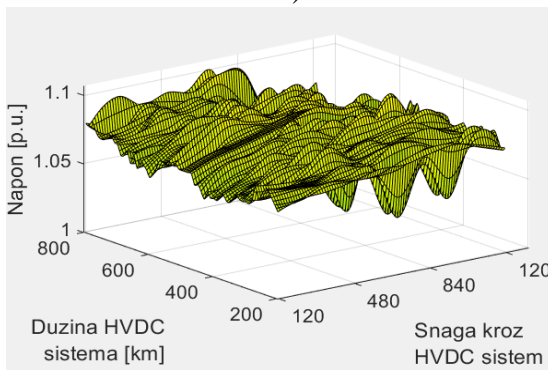
d)



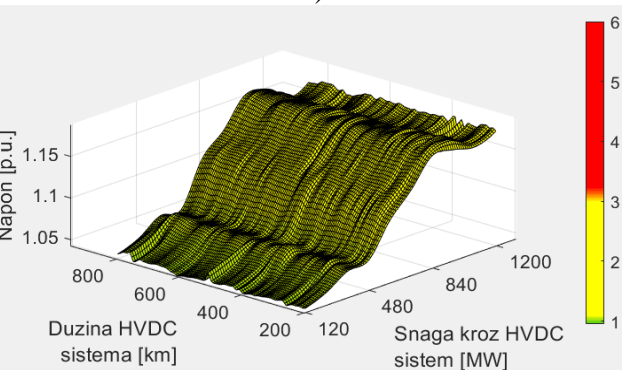
e)



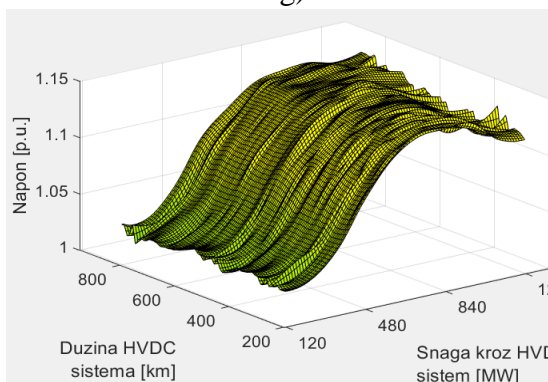
f)



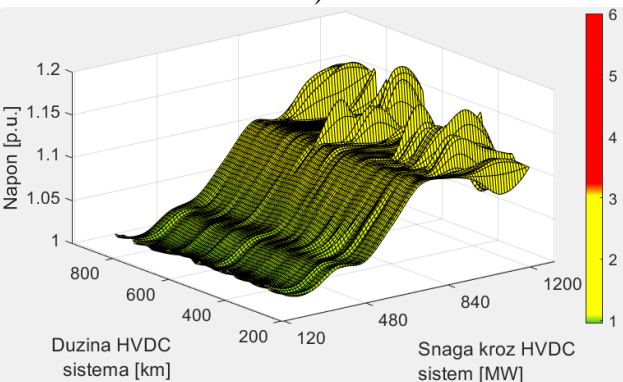
g)



h)



i)



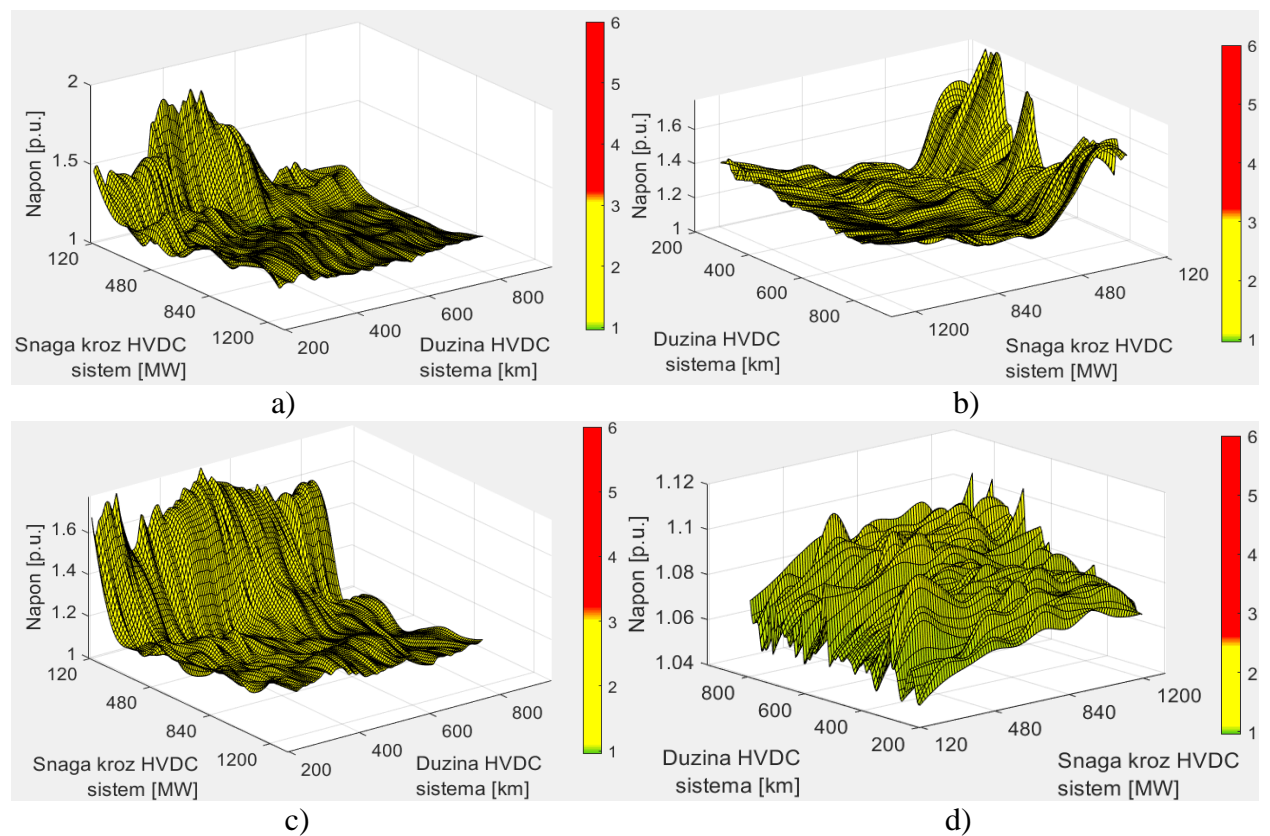
j)

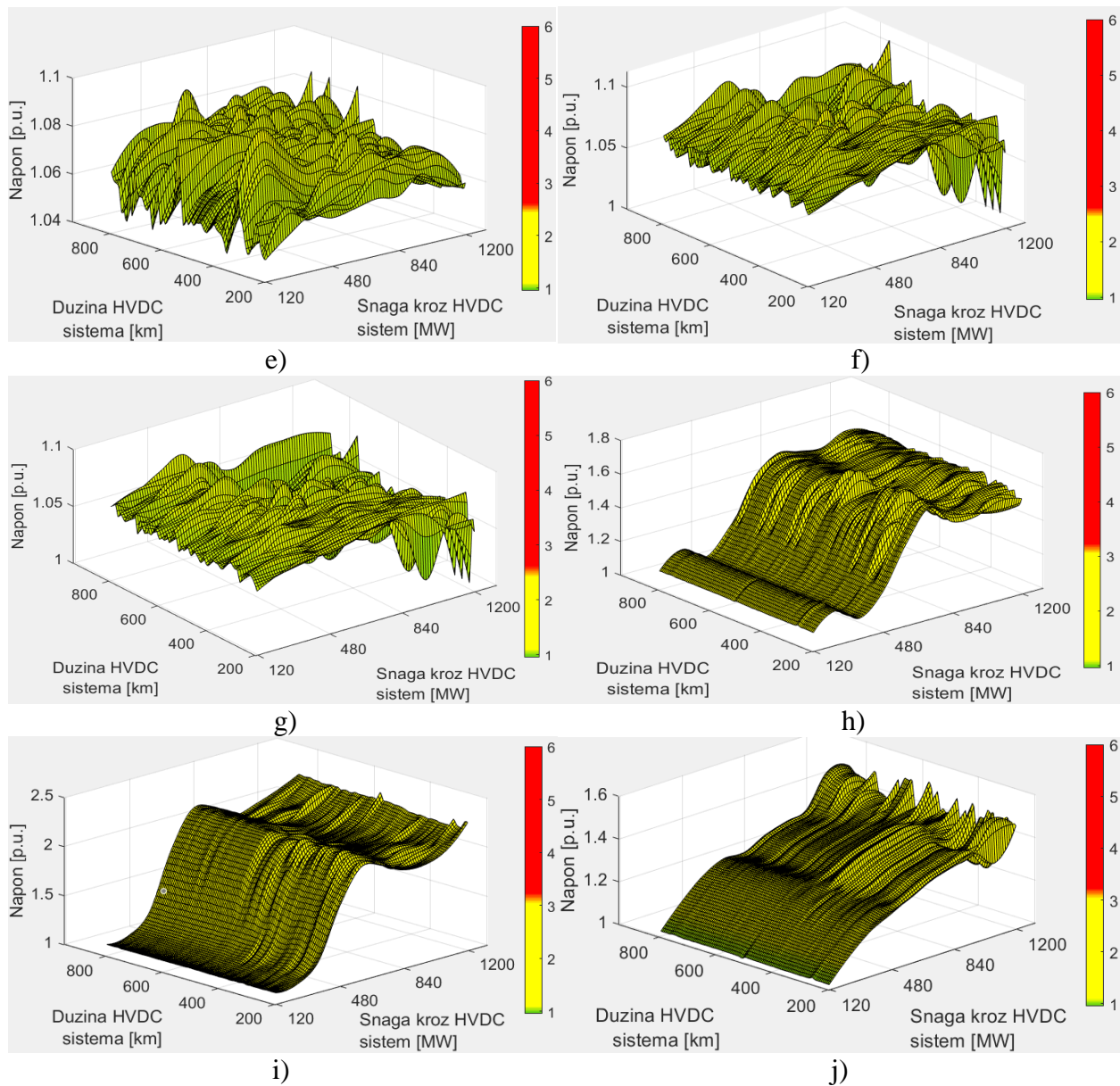
Slika 64. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog jednofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani invertora (bipolarna konfiguracija) i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B), c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4, g) mjernom mjestu 5, h) mjernom mjestu 6 (Faza A), i) mjernom mjestu 6 (Faza B), j) mjernom mjestu 6 (Faza C)

Sa grafika prikazanih na slici 64. se može zaključiti da u slučaju prolaznog jednofaznog kratkog spoja, u trajanju od 50 ms u AC sistemu na strani invertora, na mjernim mjestima ne dolazi do pojave prenapona čija vrijednost ugrožava izolaciju. Ukoliko se uporede grafici maksimalnih napona pri prolaznom kratkom spoju na istom mjestu kod monopolarne i bipolarne konfiguracije može se zaključiti da se kod bipolarne konfiguracije u AC sistemu na strani ispravljača javljaju nešto veće vrijednosti napona u odnosu na monopolarnu konfiguraciju. Posmatrajući ostala mjerna mjesta može se zaključiti da se kod obje konfiguracije dobijaju približno iste vrijednosti maksimalnih napona.

Primjer 10: Prolazni trofazni kratki spoj u AC sistemu na strani invertora

Za potrebe proračuna u ovom primjeru, koristi se model sistema u Simulink-u koji je identičan modelu iz primjera 9 pri čemu se umjesto jednofaznog kratkog spoja simulira trofazni kratki spoj. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona u tačkama 1,2,3,4,5 i 6 od dužine HVDC sistema i snage koja se prenosi HVDC sistemom je prikazana na slici 65.





Slika 65. Zavisnost maksimalnih vrijednosti napona od dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem za slučaj prolaznog trofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani invertora (bipolarna konfiguracija) i to na: a) mjernom mjestu 1 (Faza A), b) mjernom mjestu 1 (Faza B), c) mjernom mjestu 1 (Faza C), d) mjernom mjestu 2, e) mjernom mjestu 3, f) mjernom mjestu 4, g) mjernom mjestu 5, h) mjernom mjestu 6 (Faza A), i) mjernom mjestu 6 (Faza B), j) mjernom mjestu 6 (Faza C)

Sa grafika prikazanih na slici 65. se može zaključiti da u slučaju prolaznog trofaznog kratkog spoja, u trajanju od 50 ms u AC sistemu na strani invertora, na mjernim mjestima ne dolazi do pojave prenapona čija vrijednost ugrožava izolaciju. Ukoliko se uporede grafici maksimalnih napona pri prolaznom kratkom spoju na istom mjestu kod monopolarne i bipolarne konfiguracije može se zaključiti da se na svim mjernim mjestima dobijaju slične vrijednosti kod obje konfiguracije.

6.2 Koordinacija izolacije za najkritičnije slučajeve

U ovom potpoglavlju će se izvršiti koordinacija izolacije za najkritičnije slučajeve iz primjera razmatranih u potpoglavlju 6.1. Naime, koordinacija izolacije će se vršiti samo u pojedinim karakterističnim tačkama HVDC sistema i to: na AC strani konvertorskih transformatora i na krajevima DC vodova. U prethodno analiziranim primjerima kao rezultati dobijeni su maksimalni naponi koji se za različite kombinacije dužina HVDC sistema i snage koja se prenosi HVDC sistemom pojavljuju na različitim mjestima. Sa druge strane, na mjestima gdje je vršeno mjerenje napona predviđeno je instaliranje odgovarajućih izolatora koji se karakterišu određenim podnosivim naponima. U slučaju da se u nekom od primjera na određenom mjestu pojavljuju maksimalne vrijednosti napona čije su vrijednosti iznad podnosivih napona izolacije neophodna je ugradnja odgovarajućeg odvodnika prenapona, tj. neophodno je izvršiti koordinaciju izolacije. Pri tome, u ovom radu će se koordinacija izolacije vršiti samo za najkritičnije kombinacije dužine HVDC sistema i snage koja se prenosi HVDC sistemom. Koordinacija izolacije za navedene najkritičnije slučajeve je izvršena na način da se optimizuje broj i mjesto instaliranja odvodnika prenapona u sistemu. Zaštitni nivoi odvodnika prenapona instaliranih na AC strani konvertorskih transformatora i na krajevima DC vodova (prema primjeru iz standarda IEC 60071-5) imaju vrijednosti 713 kV pri struji od 10 kA i 872 kV pri struji od 5 kA, respektivno.

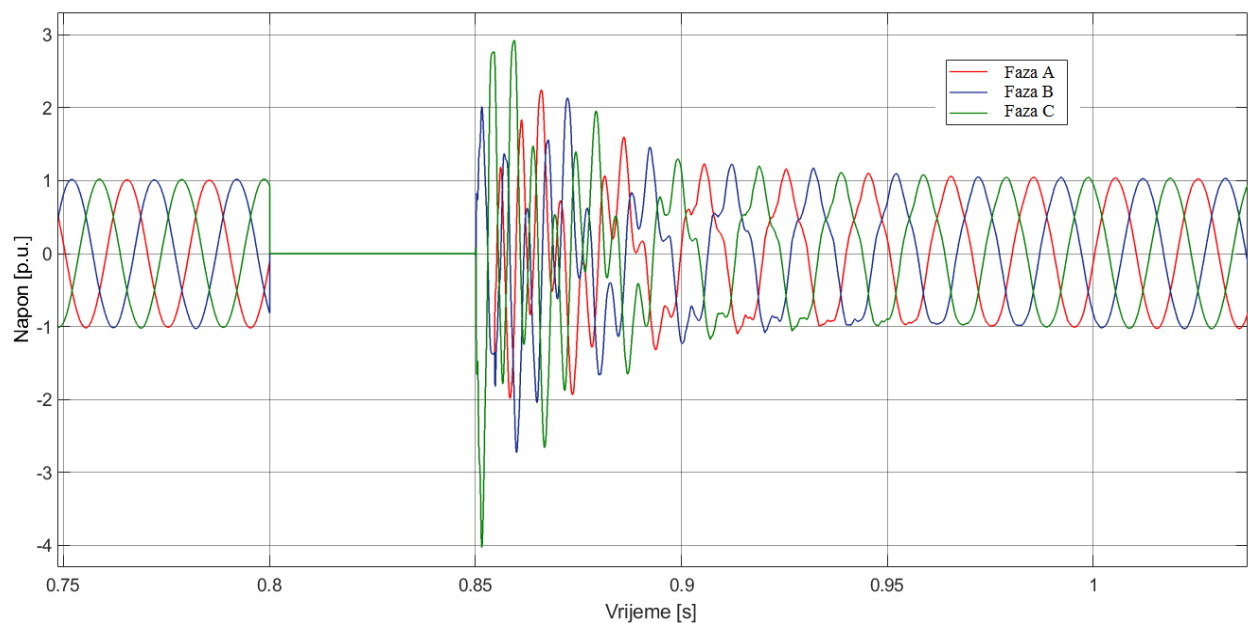
Kako se može zaključiti iz primjera analiziranih u potpoglavlju 6.1, izolacija na posmatranim mjernim mjestima kod obje konfiguracije je ugrožena u slučaju prolaznog trofaznog kratkog spoja na strani ispravljača. U nastavku će se pojedinačno razmatrati koordinacija izolacije za monopolarnu i bipolarnu konfiguraciju.

6.2.1 Koordinacija izolacije kod monopolarne konfiguracije

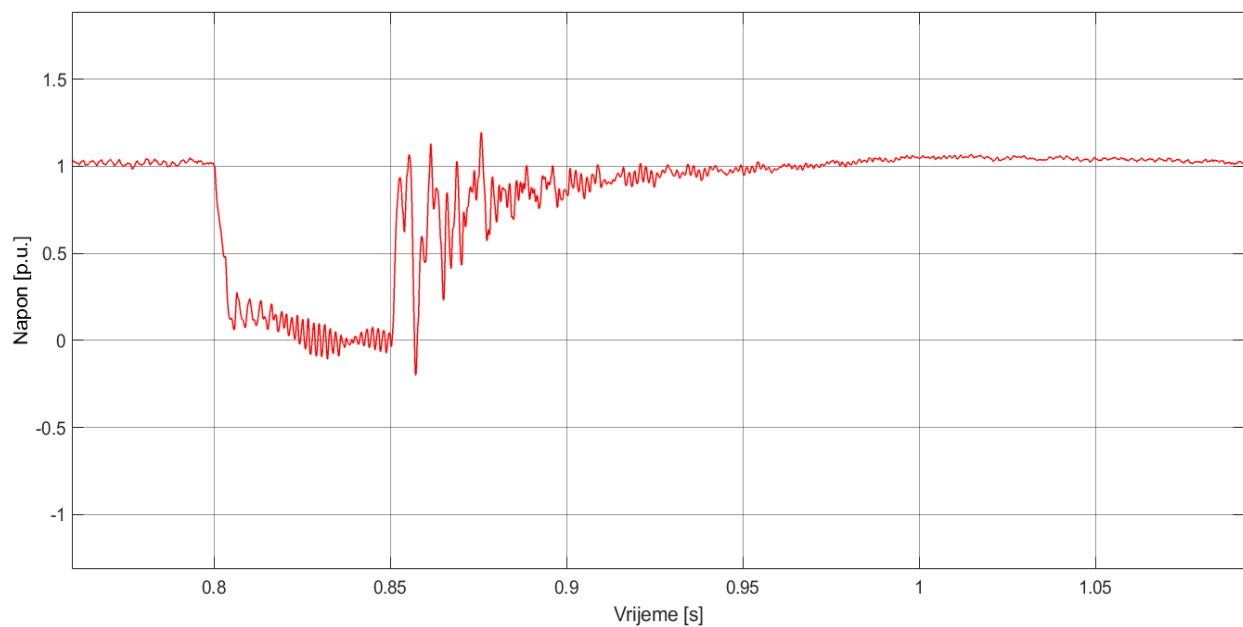
Kako je već zaključeno u primjeru 5 potpoglavlja 6.1.1 u slučaju prolaznog trofaznog kratkog spoja, u trajanju od 50 ms u AC sistemu na strani ispravljača, na mjernim mjestima 1, 2 i 3 sa slike 42. dolazi do pojave prenapona čija vrijednost ugrožava izolaciju na tim mjestima. U nastavku će se kroz primjere izvršiti koordinacija izolacije za kombinacije dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem pri kojima se pojavljuju maksimalne vrijednosti prenapona na posmatranim mjernim mjestima. U okviru svakog primjera će se prikazati talasni oblici napona na svim mjernim mjestima prije i nakon primijenjenog optimalnog rješenja za instaliranje odvodnika prenapona. Takođe, kako bi bila izvršena provjera sposobnosti odvodnika prenapona da izdrži energiju pražnjenja, u primjerima su prikazani i talasni oblici struje kroz instalirane odvodnike prenapona.

Primjer 1: Koordinacija izolacije za najkritičniji slučaj po izolaciju na mjernom mjestu 1

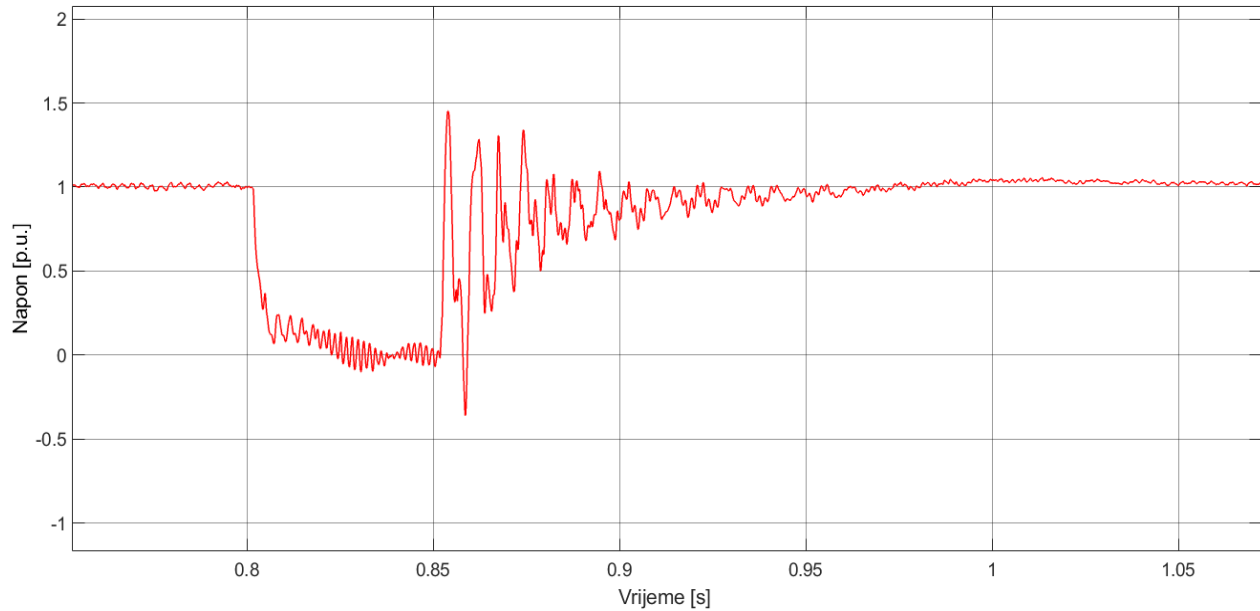
Kombinacija dužine i snage kroz HVDC sistem pri kojoj se ima maksimalna vrijednost prenapona na mjernom mjestu 1 je : 460 km i 540 MW. Pri ovim vrijednostima dužine i snage HVDC sistema na mjernom mjestu 1 prenapon dostiže vrijednost od 4.028 p.u. (u fazi C). Vremenske promjene napona na svim mjernim mjestima su prikazane na slikama 66, 67, 68 i 69.



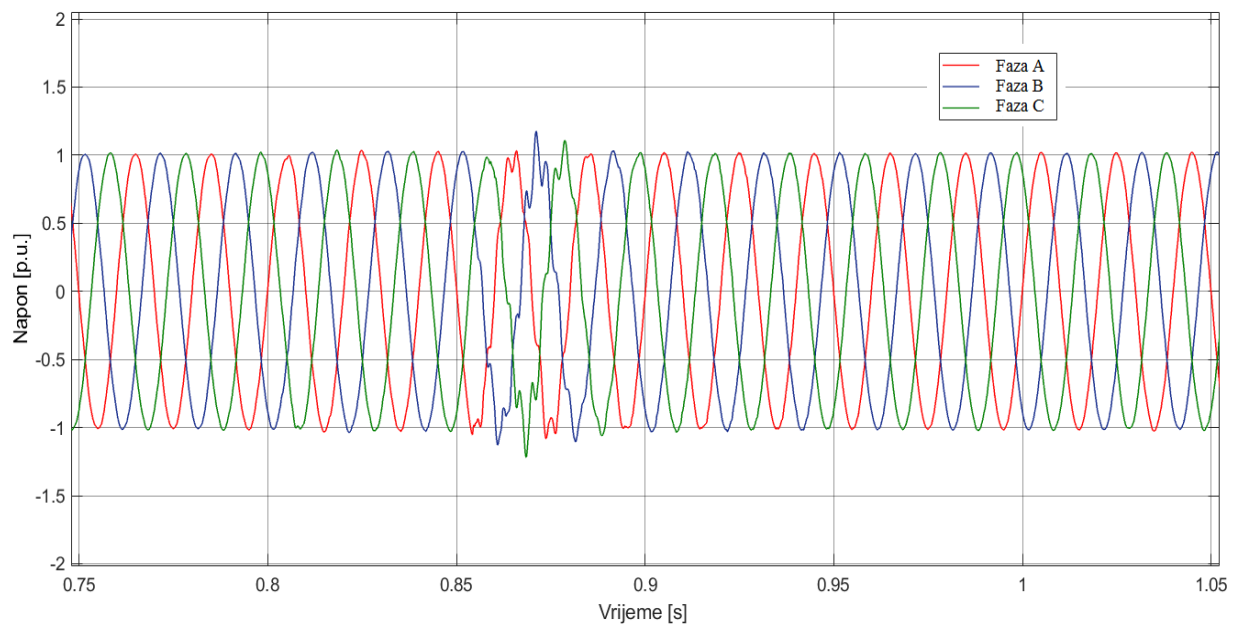
Slika 66. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 1 – monopolarna konfiguracija (460 km i 540 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona



Slika 67. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 2 – monopolarna konfiguracija (460 km i 540 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona



Slika 68. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 3 – monopolarna konfiguracija (460 km i 540 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona

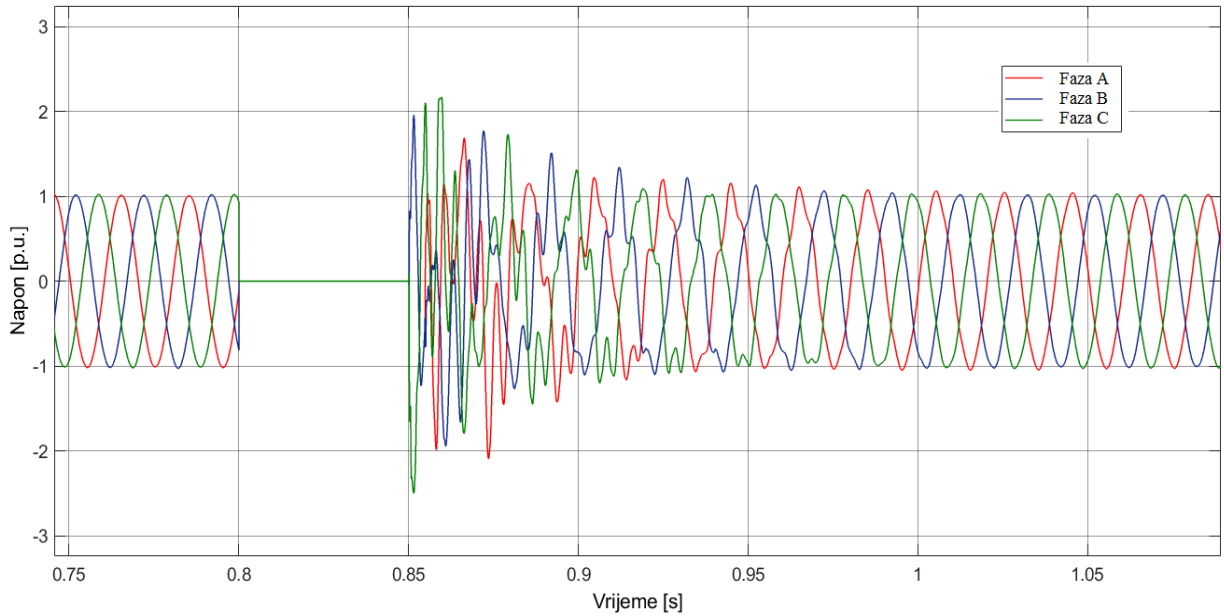


Slika 69. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 4 – monopolarna konfiguracija (460 km i 540 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona

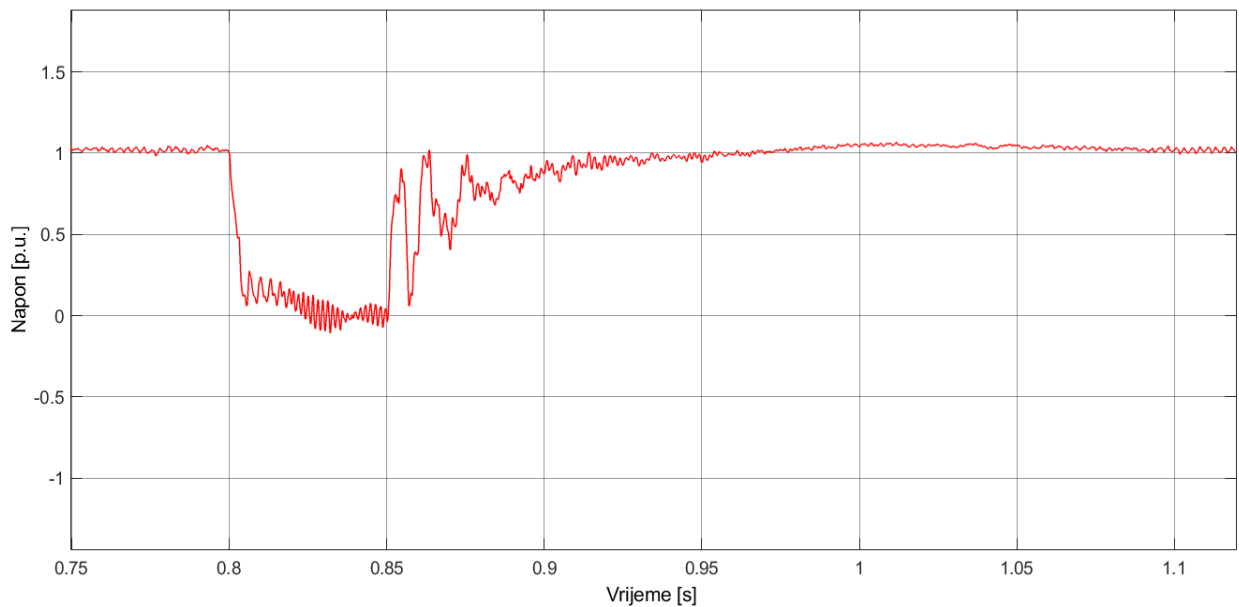
Kao što se može vidjeti sa slika 66, 67, 68 i 69. jedino na mjernom mjestu 1 dolazi do pojave prenapona koji ugrožavaju izolaciju.

U cilju pronalaženja optimalnog rješenja sa aspekta broja i mjesta ugradnje odvodnika prenapona u sistemu kako bi se izvršila koordinacija izolacije za konkretno razmatrani slučaj, u Simulink-u je izvršen veliki broj simulacija u kojima je vršeno priključivanje odvodnika

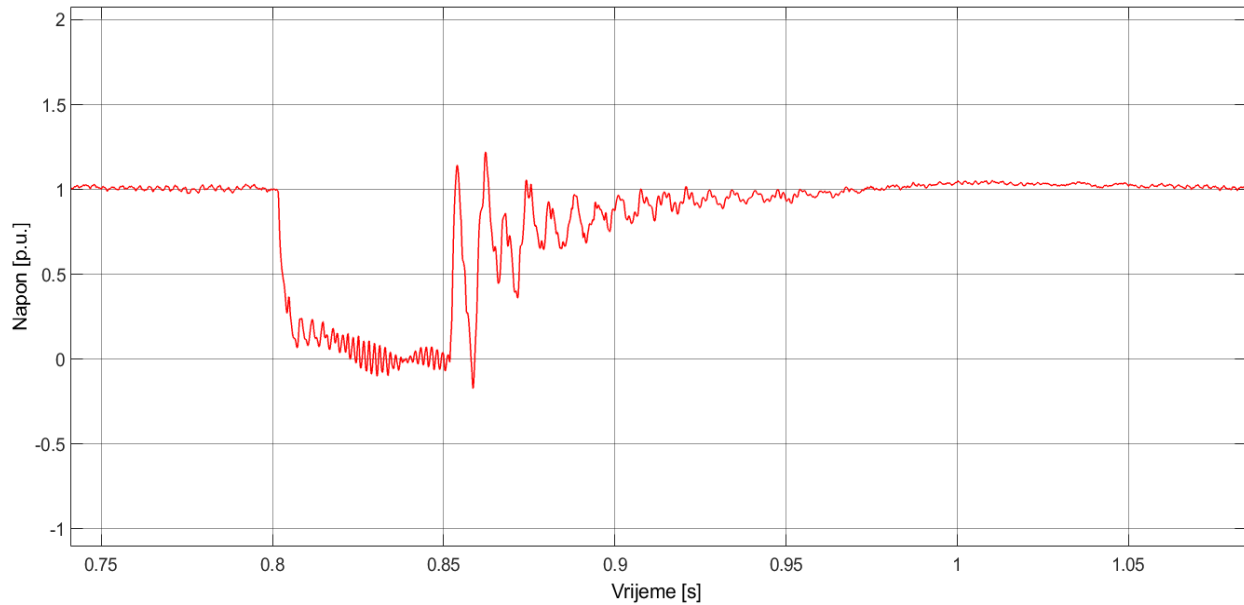
prenapona na različitim lokacijama u sistemu. Optimalno rješenje za konkretno razmatrani slučaj predstavlja instaliranje odvodnika prenapona na mjernom mjestu 1, zašitnog nivoa 713 kV. Vremenske promjene napona na svim mjernim mjestima nakon instaliranja odvodnika prenapona su prikazane na slikama 70, 71, 72 i 73.



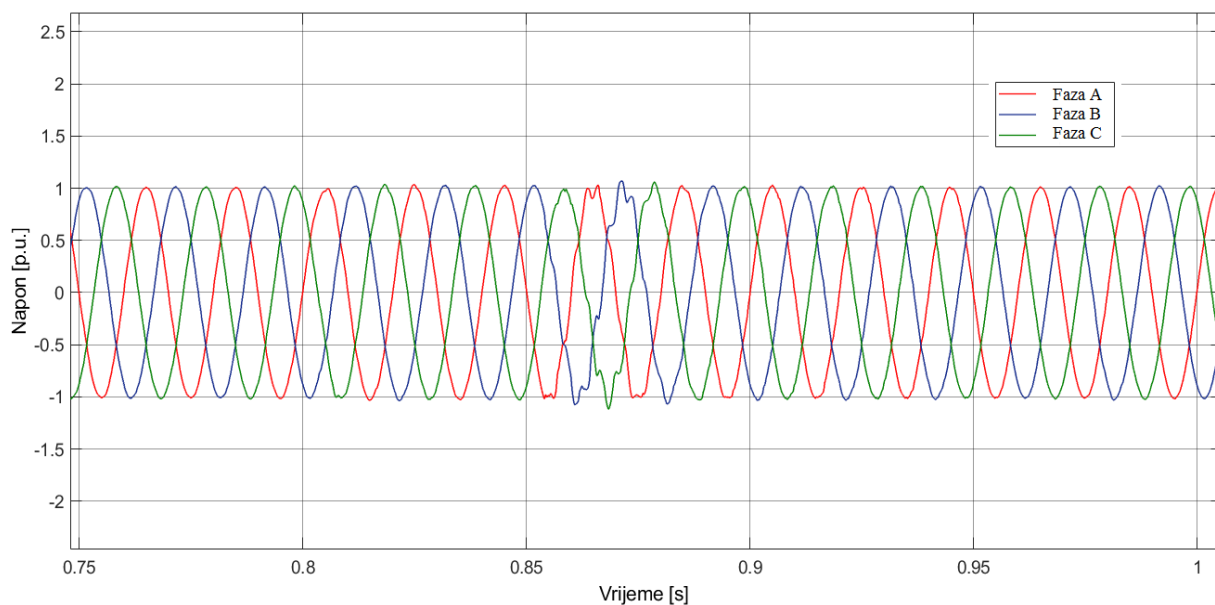
Slika 70. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 1 – monopolarna konfiguracija (460 km i 540 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona



Slika 71. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 2 – monopolarna konfiguracija (460 km i 540 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona



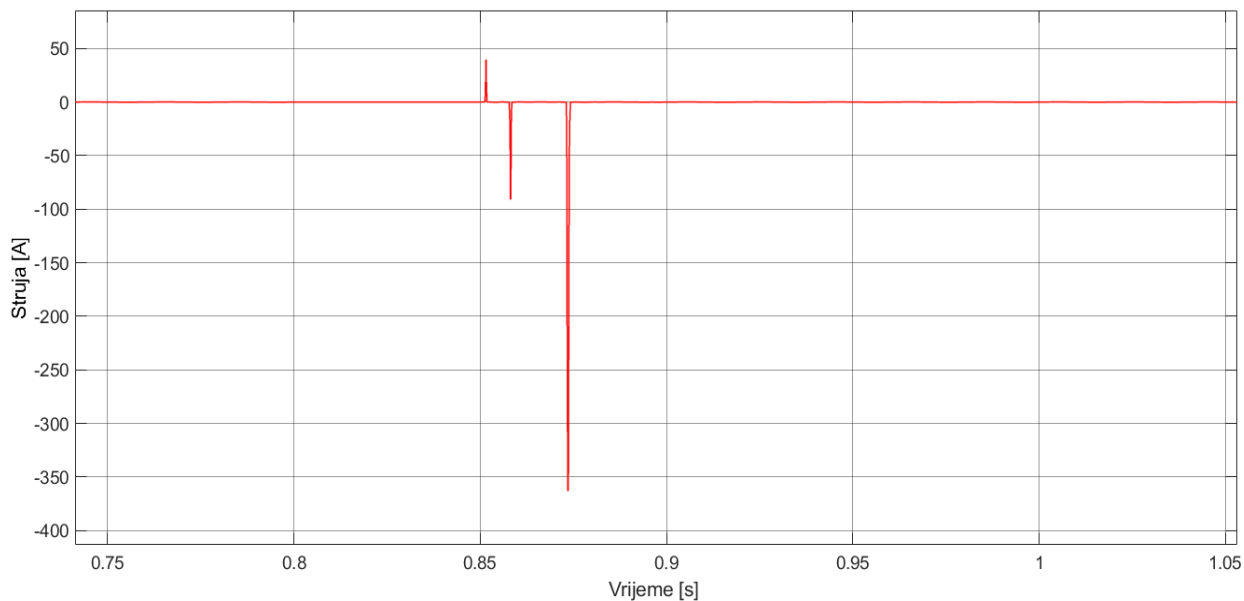
Slika 72. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 3 – monopolarna konfiguracija (460 km i 540 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona



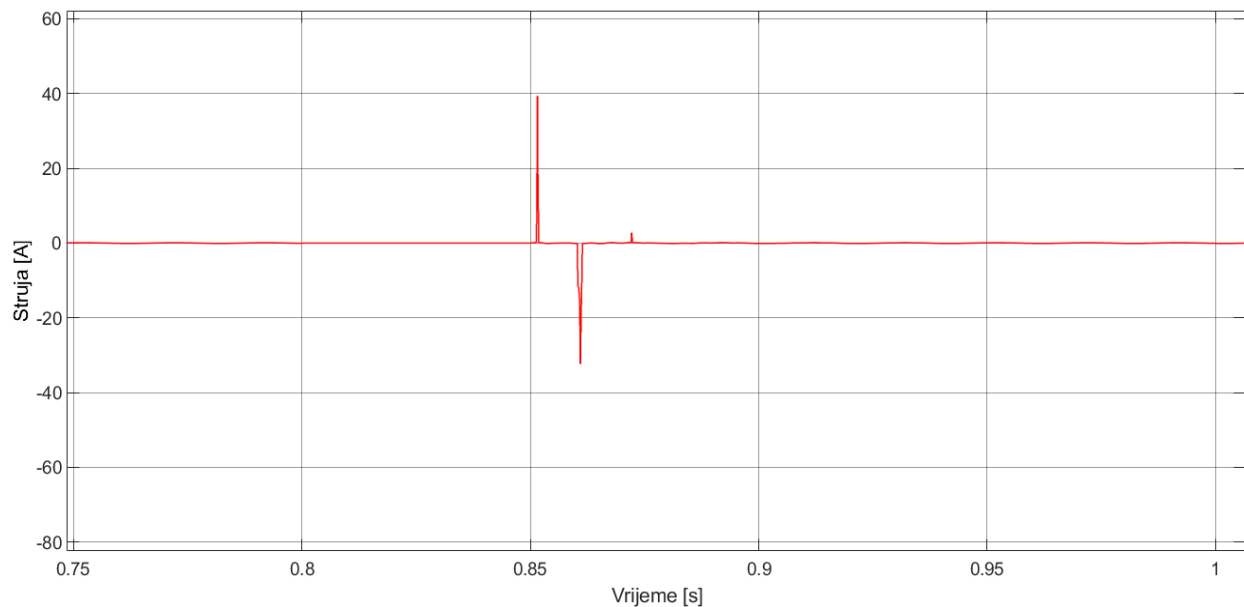
Slika 73. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 4 – monopolarna konfiguracija (460 km i 540 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona

Kao što se može vidjeti sa slika 70, 71, 72. i 73. nakon instaliranja odvodnika prenapona, napon na mjernom mjestu 1 dostiže maksimalnu vrijednost od 2.498 p.u. što je niže od granične vrijednosti pri kojoj dolazi do ugrožavanja izolacije od 3.22 p.u. Takođe, na mjernom mjestu 4 napon ne dostiže vrijednosti veće od 3.22 p.u. Na mjernim mjestima 2 i 3, naponi ne dostižu graničnu vrijednosti od 2.6 p.u. pa se zaključuje da na svim mjernim mjestima nema ugrožavanja izolacije.

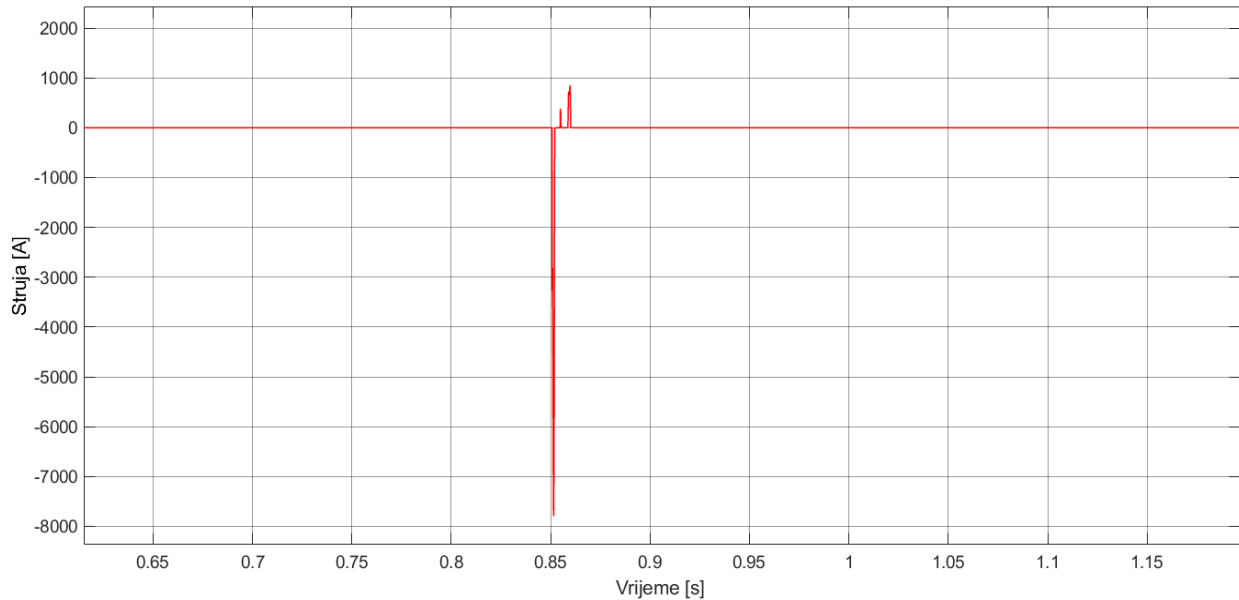
Kako bi se provjerila energetska naprezanja odvodnika prenapona prilikom proticanja struje odvođenja, na slikama 74, 75. i 76. su prikazane vremenske promjene struje kroz odvodnike prenapona.



Slika 74. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza A) – monopolarna konfiguracija (460 km i 540 MW)



Slika 75. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza B) – monopolarna konfiguracija (460 km i 540 MW)



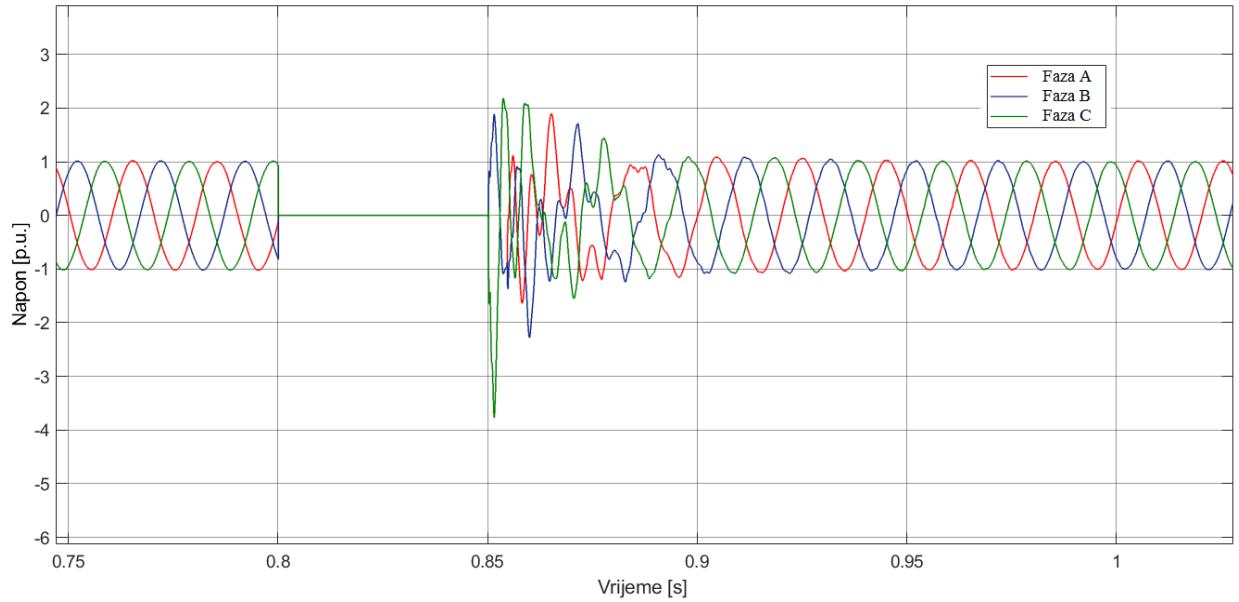
Slika 76. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza C) – monopolarna konfiguracija (460 km i 540 MW)

Zaštitni nivo odvodnika prenapona priključenog na mjernom mjestu 1 je 713 kV pri čemu je taj zaostali napon izmjeren pri struji od 10 kA. Sa slika 74, 75 i 76. se vidi da vrijednosti struje kroz odvodnike prenapona ne prelaze 10 kA kao i da su vremenski intervali u kojima dolazi do proticanja struje odvođenja izuzetno kratki. Prema tome, postavljeni odvodnici prenapona nijesu ugroženi sa energetskeg aspekta.

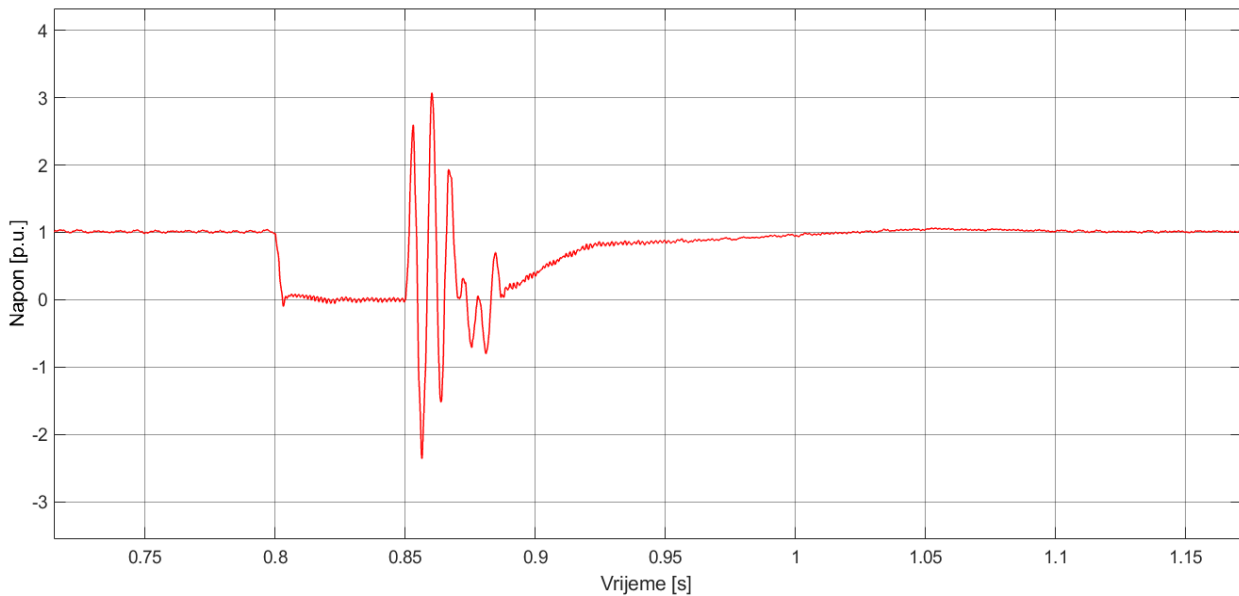
Postavljanjem odvodnika prenapona na mjernom mjestu 1, naponi na svim mjernim mjestima ne ugrožavaju izolaciju dok su struje kroz odvodnike prenapona unutar dozvoljenih granica. Na osnovu prethodnog se može zaključiti da je izvršena koordinacija izolacije za posmatrani slučaj.

Primjer 2 : Koordinacija izolacije za najkritičniji slučaj po izolaciju na mjernim mjestima 2 i 3

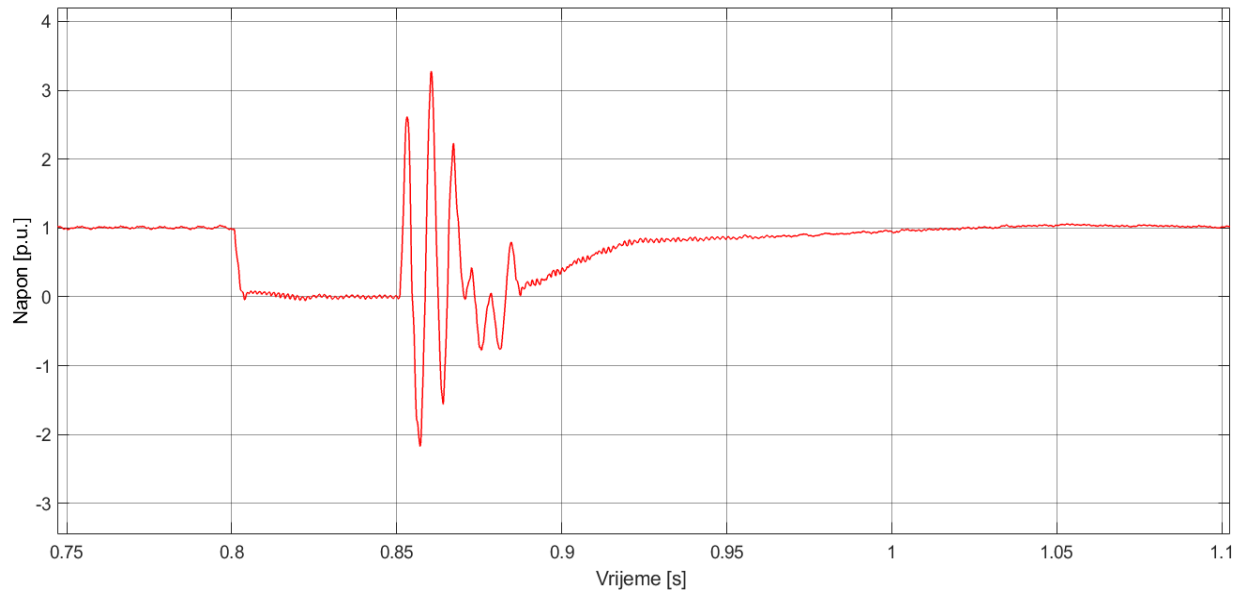
Kombinacija dužine i snage kroz HVDC sistem pri kojoj se ima maksimalna vrijednost prenapona na mjernim mjestima 2 i 3 je : 200 km i 540 MW. Pri ovim vrijednostima dužine i snage HVDC sistema na mjernom mjestu 2 prenapon dostiže vrijednost od 3.073 p.u. dok na mjernom mjestu 3 prenapon dostiže vrijednost od 3.274 p.u. Vremenske promjene napona na svim mjernim mjestima su prikazane na slikama 77, 78, 79 i 80.



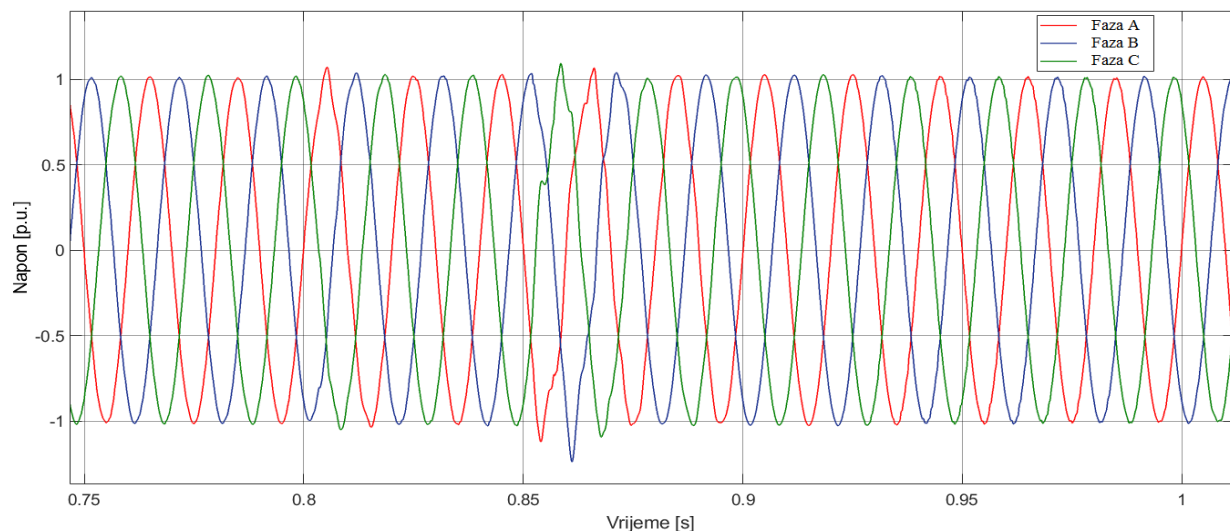
Slika 77. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 1 – monopolarna konfiguracija (200 km i 540 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona



Slika 78. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 2 – monopolarna konfiguracija (200 km i 540 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona



Slika 79. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 3 – monopolarna konfiguracija (200 km i 540 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona

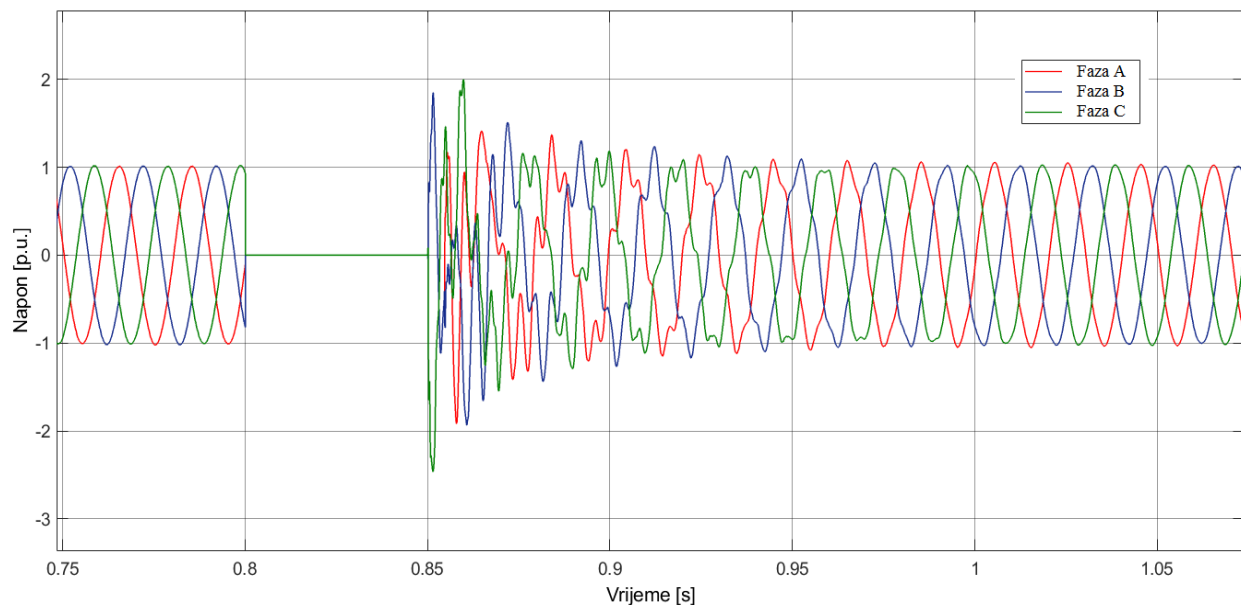


Slika 80. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 4 – monopolarna konfiguracija (200 km i 540 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona

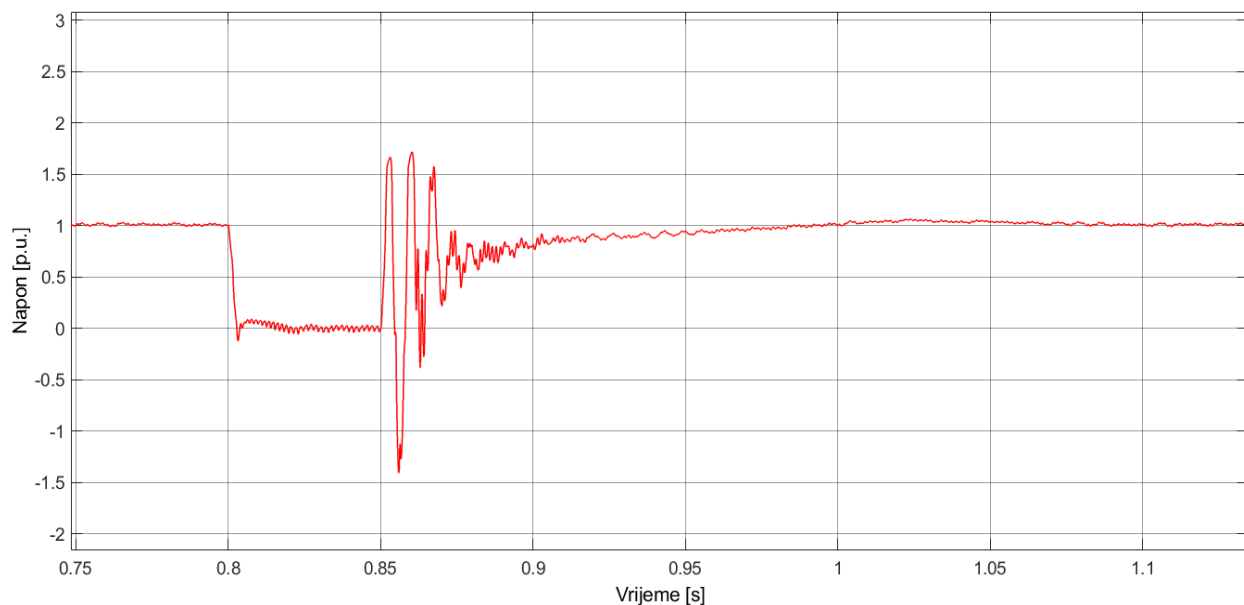
Kao što se može vidjeti sa slika 77, 78 i 79. na mjernim mjestima 1, 2 i 3 dolazi do pojave prenapona koji ugrožavaju izolaciju.

U cilju pronalaženja optimalnog rješenja sa aspekta broja i mjesta ugradnje odvodnika prenapona u sistemu kako bi se izvršila koordinacija izolacije za konkretno razmatrani slučaj, u Simulink-u je izvršen veliki broj simulacija u kojima je vršeno priključivanje odvodnika prenapona na različitim lokacijama u sistemu. Optimalno rješenje za konkretno razmatrani slučaj predstavlja instaliranje odvodnika prenapona na mjernom mjestu 1 zaštitnog nivoa 713 kV i odvodnika prenapona na mjernom mjestu 2 zaštitnog nivoa 872 kV. Vremenske promjene

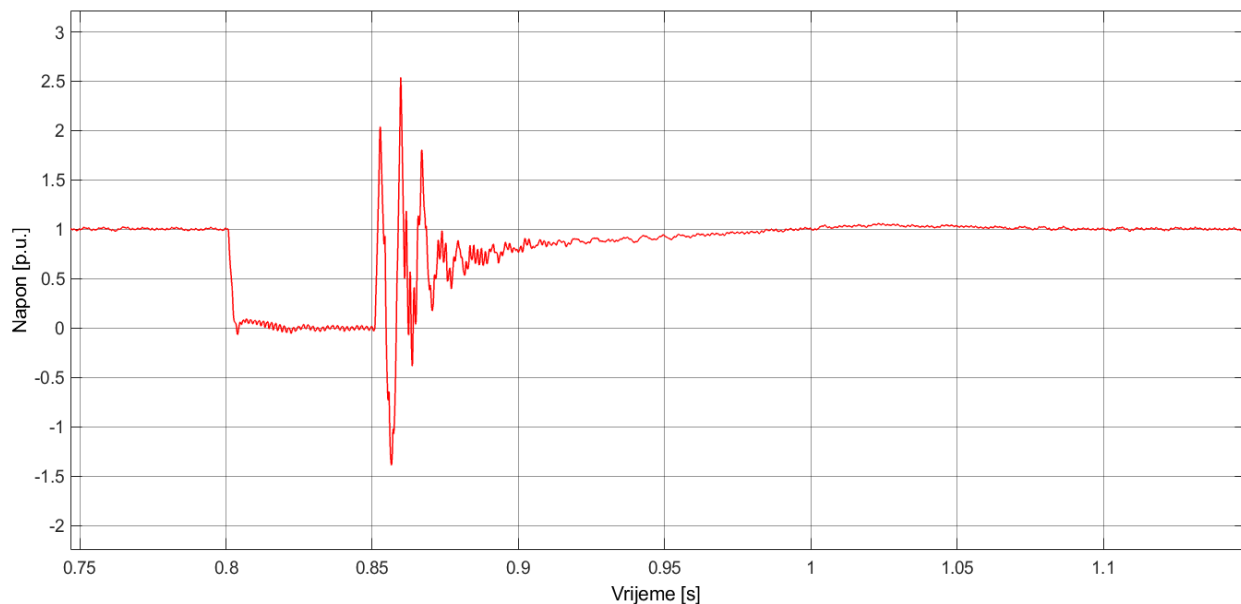
napona na svim mjernim mjestima nakon instaliranja odvodnika prenapona su prikazani na slikama 81, 82, 83 i 84.



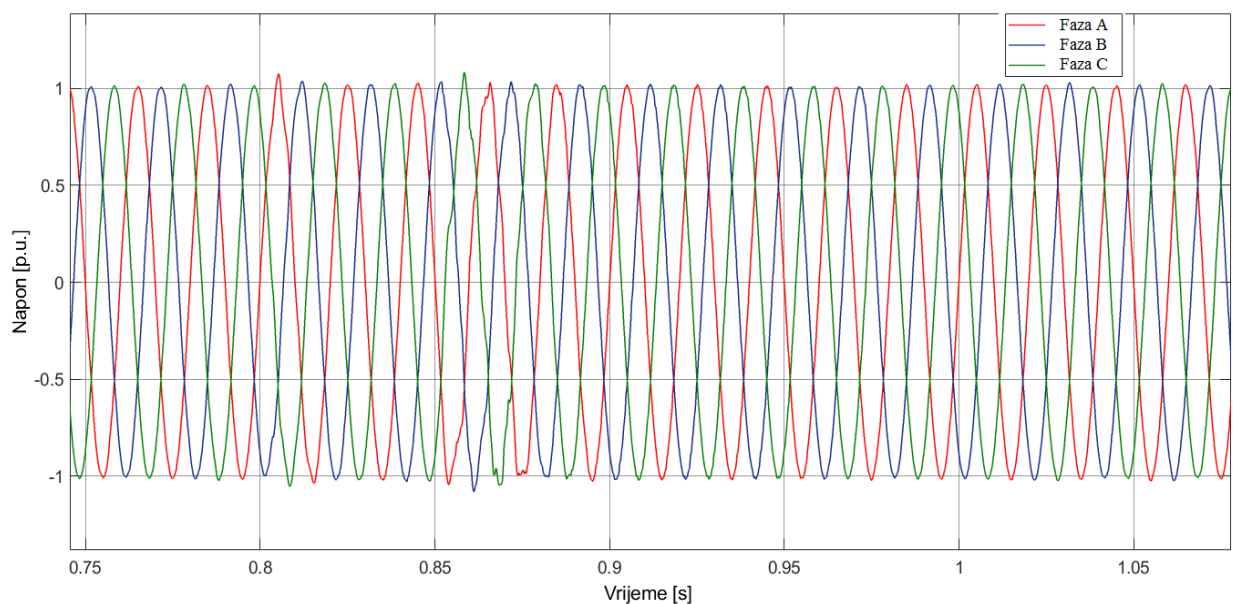
Slika 81. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 1 – monopolarna konfiguracija (200 km i 540 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona



Slika 82. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 2 – monopolarna konfiguracija (200 km i 540 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona



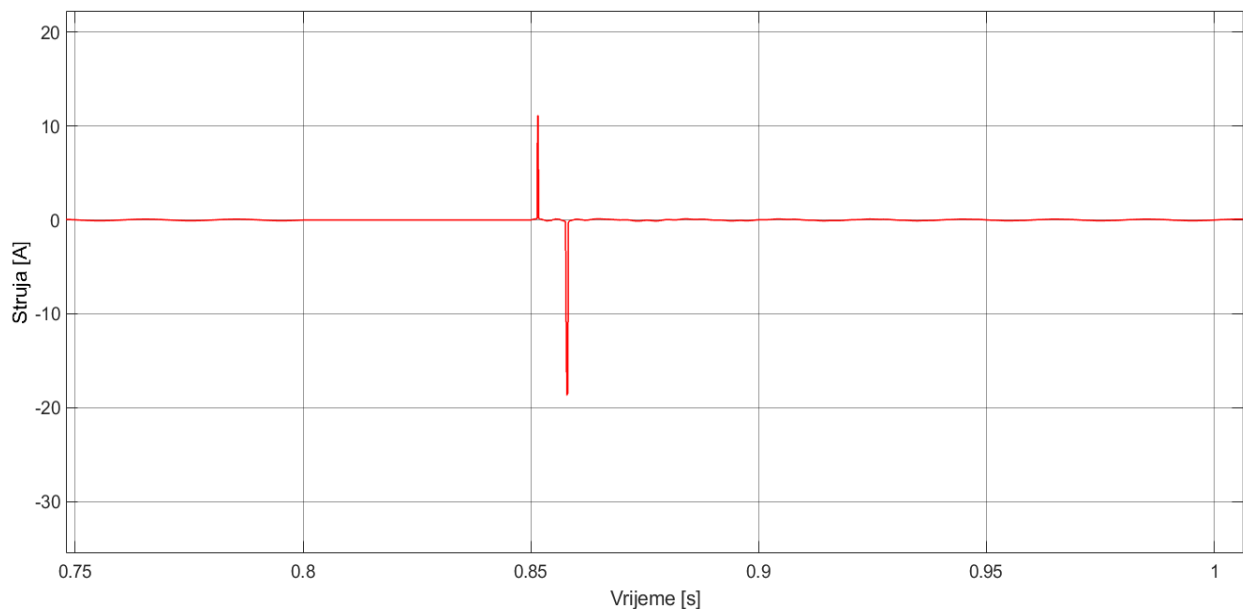
Slika 83. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 3 – monopolarna konfiguracija (200 km i 540 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona



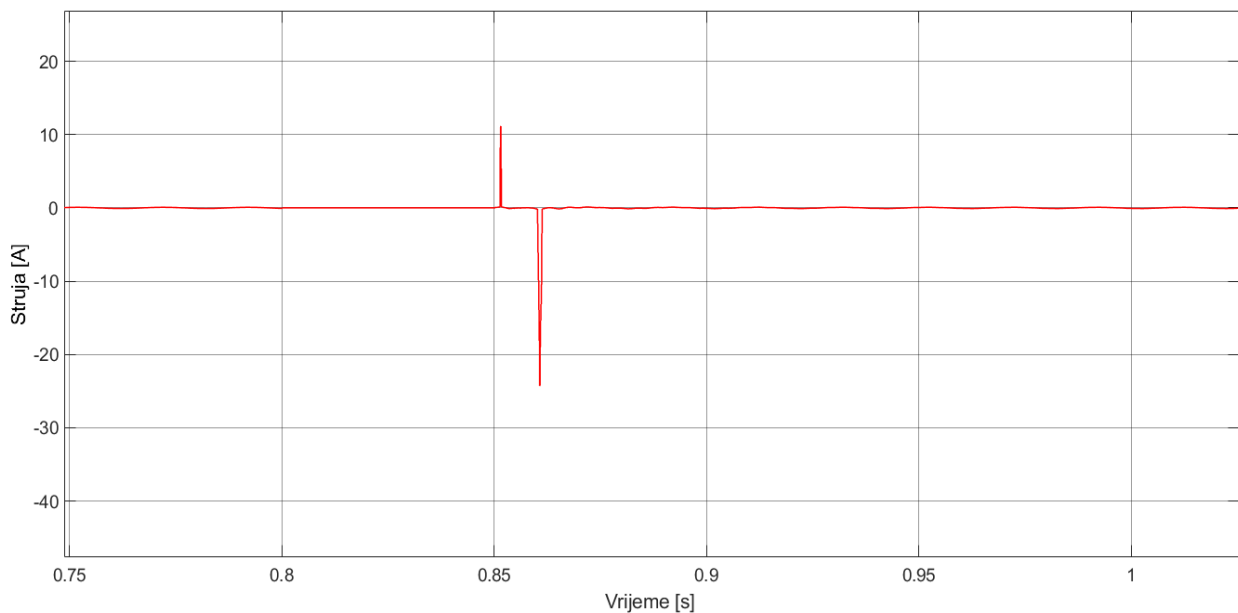
Slika 84. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 4 – monopolarna konfiguracija (200 km i 540 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona

Kao što se može vidjeti sa slika 82. i 83. nakon instaliranja odvodnika prenapona, napon na mjernim mjestima 2 i 3 dostiže maksimalne vrijednosti od 1.719 p.u. i 2.538 p.u., respektivno. Ove vrijednosti su niže od granične vrijednosti pri kojoj dolazi do ugrožavanja izolacije od 2.6 p.u. Takođe, na mjernim mjestima 1 i 4 napon ne dostiže vrijednosti veće od 3.22 p.u., pa se zaključuje da na svim mjernim mjestima nema ugrožavanja izolacije.

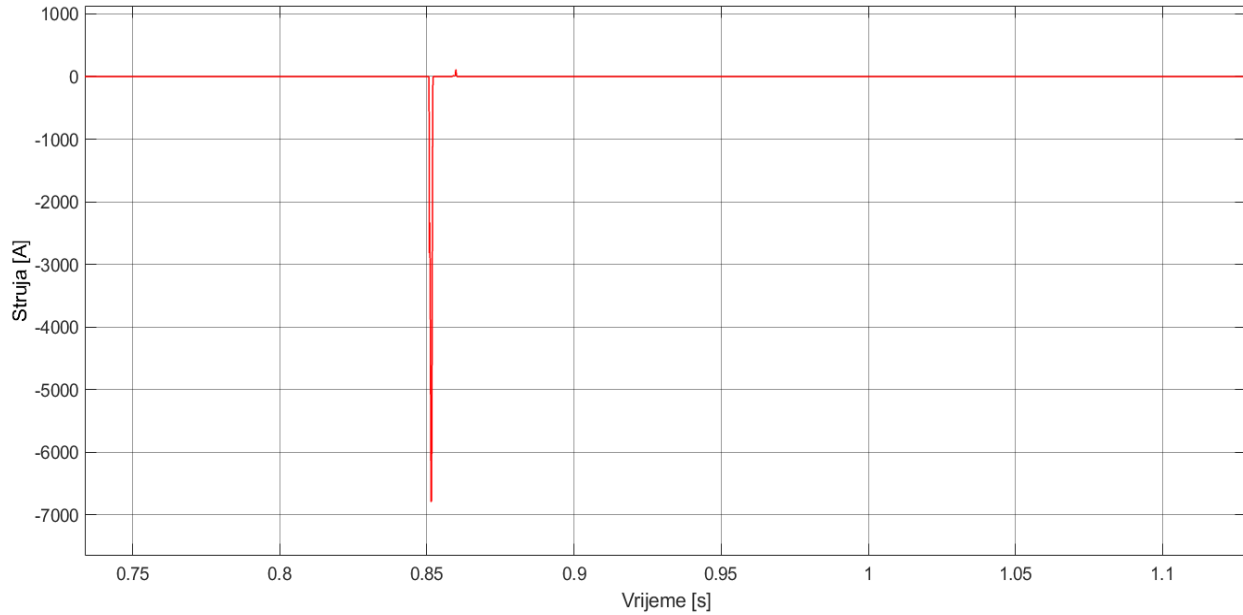
Kako bi se provjerila energetska naprezanja odvodnika prenapona prilikom proticanja struje odvođenja, na slikama 85, 86, 87. i 88. su prikazane vremenske promjene struje kroz odvodnike prenapona.



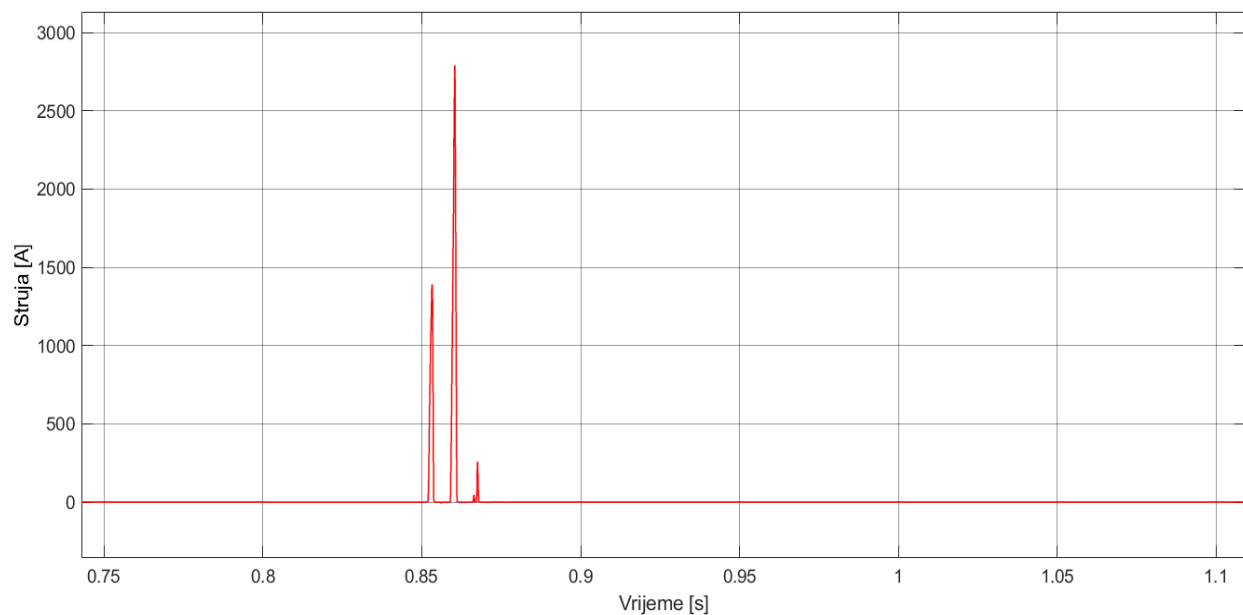
Slika 85. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza A) – monopolarna konfiguracija (200 km i 540 MW)



Slika 86. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza B) – monopolarna konfiguracija (200 km i 540 MW)



Slika 87. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza C) – monopolarna konfiguracija (200 km i 540 MW)



Slika 88. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 2 – monopolarna konfiguracija (200 km i 540 MW)

Zaštitni nivo odvodnika prenapona priključenog na mjernom mjestu 1 je 713 kV pri čemu je taj zaostali napon izmjeren pri struji od 10 kA, dok je zaštitni nivo odvodnika prenapona priključenog na mjernom mjestu 2 koji iznosi 872 kV izmjeren pri struji od 5 kA. Sa slika 85, 86. i 87. se vidi da vrijednosti struje kroz odvodnike prenapona priključene na mjernom mjestu 1 ne prelaze 10 kA a sa slike 88. da struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 2 ne prelaze 5 kA. Takođe, vremenski intervali u kojima dolazi do proticanja struje odvođenja kroz

sve odvodnike prenapona su izuzetno kratki. Prema tome, postavljeni odvodnici prenapona nijesu ugroženi sa energetskeg aspekta.

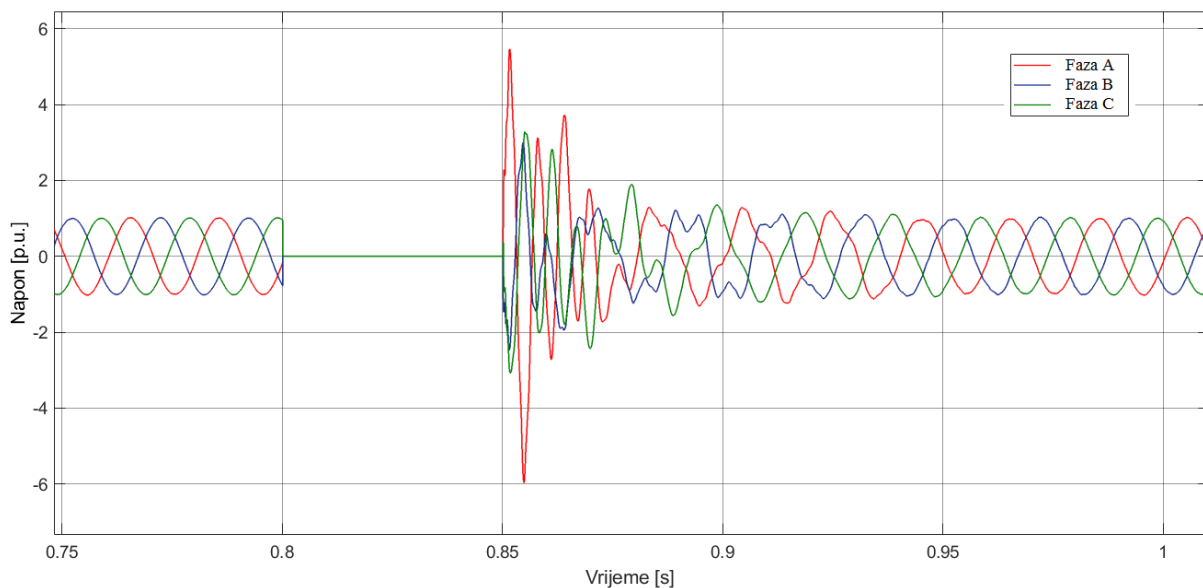
Postavljanjem odvodnika prenapona na mjernim mjestima 1 i 2, naponi na svim mjernim mjestima ne ugrožavaju izolaciju dok su struje kroz odvodnike prenapona unutar dozvoljenih granica. Na osnovu prethodnog se može zaključiti da je izvršena koordinacija izolacije za posmatrani slučaj.

6.2.2 Koordinacija izolacije kod bipolarne konfiguracije

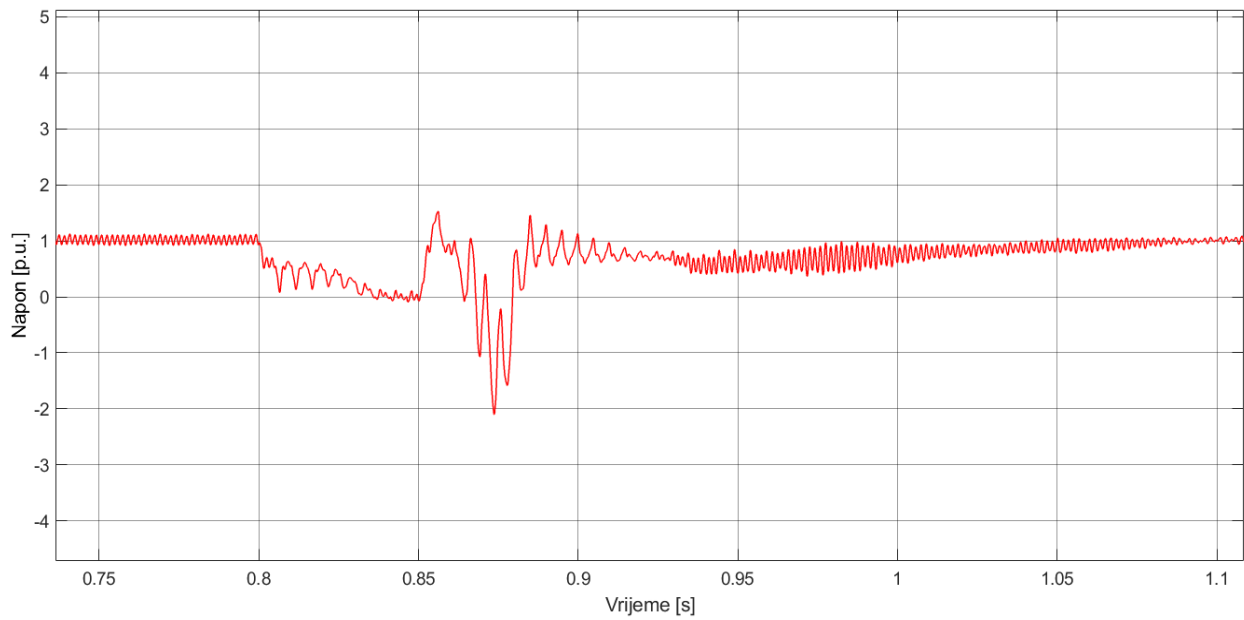
Kako je već zaključeno u primjeru 8 potpoglavlja 6.1.2 u slučaju prolaznog trofaznog kratkog spoja, u trajanju od 50 ms u AC sistemu na strani ispravljača, na mjernim mjestima 1, 2, 3, 4 i 5 sa slike 60. dolazi do pojave prenapona čija vrijednost ugrožava izolaciju na tim mjestima. U nastavku će se kroz primjere izvršiti koordinacija izolacije za kombinacije dužine HVDC sistema i snage kroz HVDC sistem pri kojima se pojavljuju maksimalne vrijednosti prenapona na posmatranim mjernim mjestima. U okviru svakog primjera će se prikazati talasni oblici napona na svim mjernim mjestima prije i nakon primijenjenog optimalnog rješenja za instaliranje odvodnika prenapona. Takođe, kako bi bila izvršena provjera sposobnosti odvodnika prenapona da izdrži energiju pražnjenja, u primjerima su prikazani i talasni oblici struje kroz instalirane odvodnike prenapona.

Primjer 1: Koordinacija izolacije za najkritičniji slučaj po izolaciju na mjernom mjestu 1

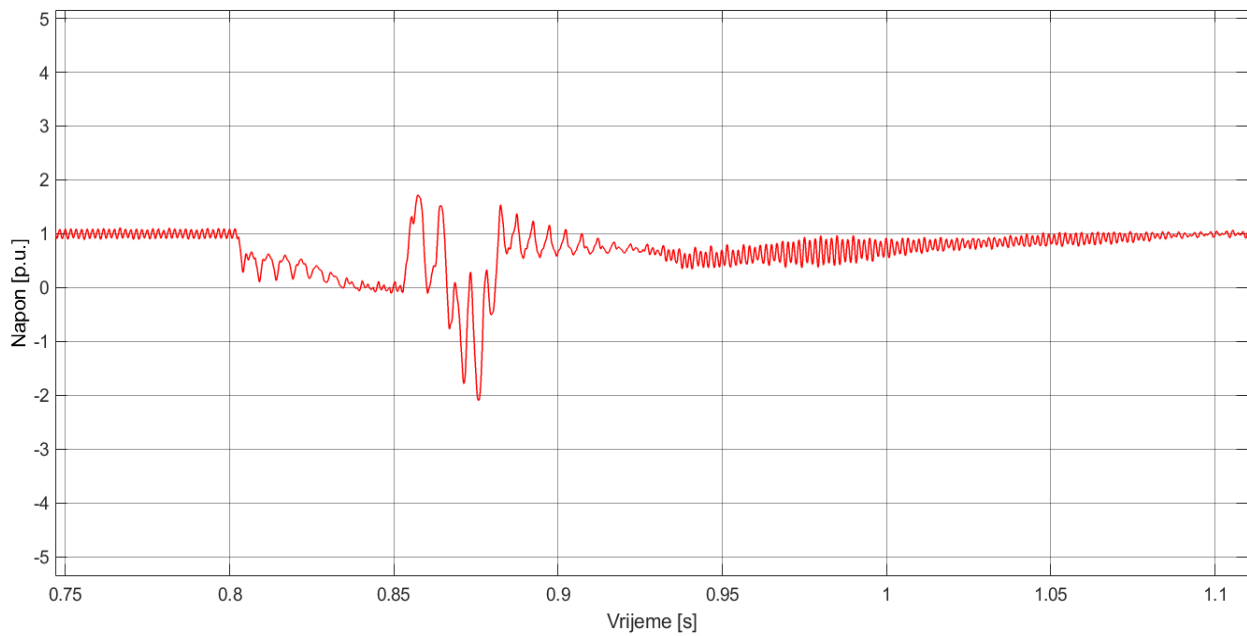
Kombinacija dužine i snage kroz HVDC sistem pri kojoj se ima maksimalna vrijednost prenapona na mjernom mjestu 1 je : 750 km i 840 MW. Pri ovim vrijednostima dužine i snage HVDC sistema na mjernom mjestu 1 prenapon dostiže vrijednost od 5.969 p.u. (u fazi A). Vremenske promjene napona na svim mjernim mjestima su prikazane na slikama 89, 90, 91, 92, 93. i 94.



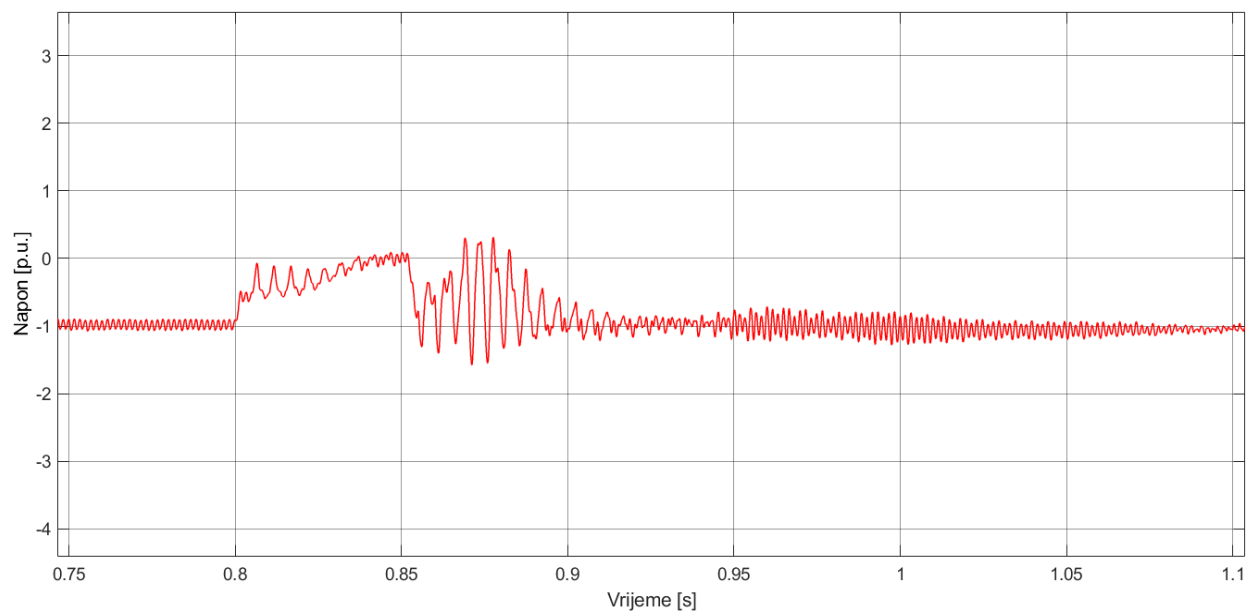
Slika 89. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 1 – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona



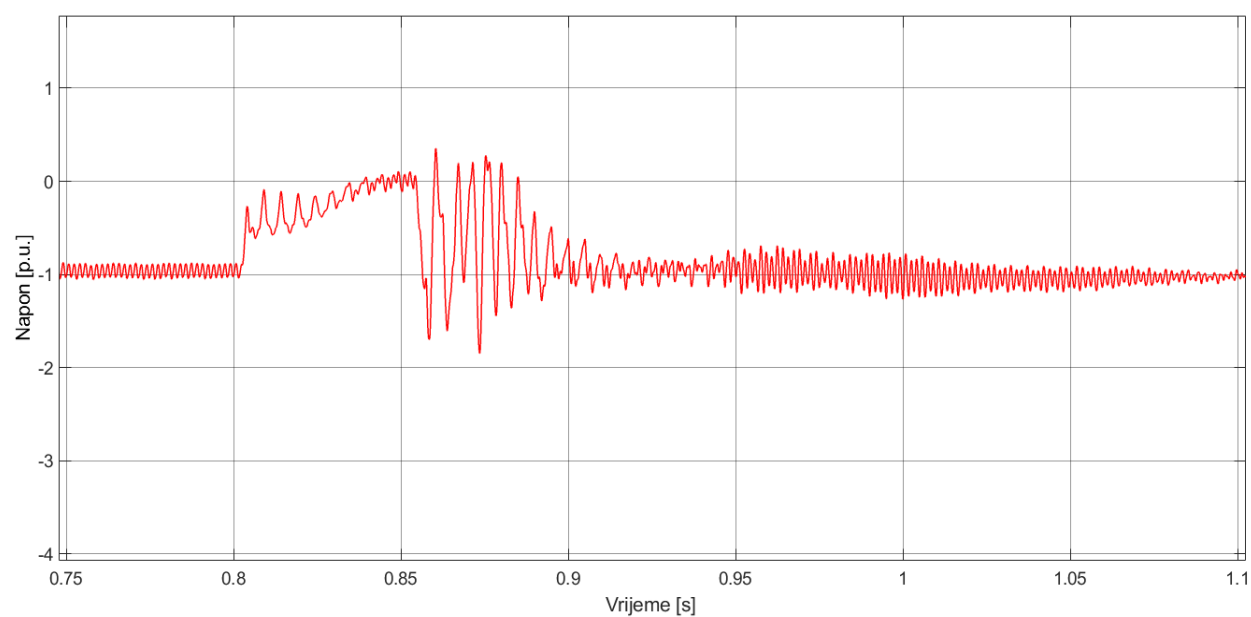
Slika 90. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 2 – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona



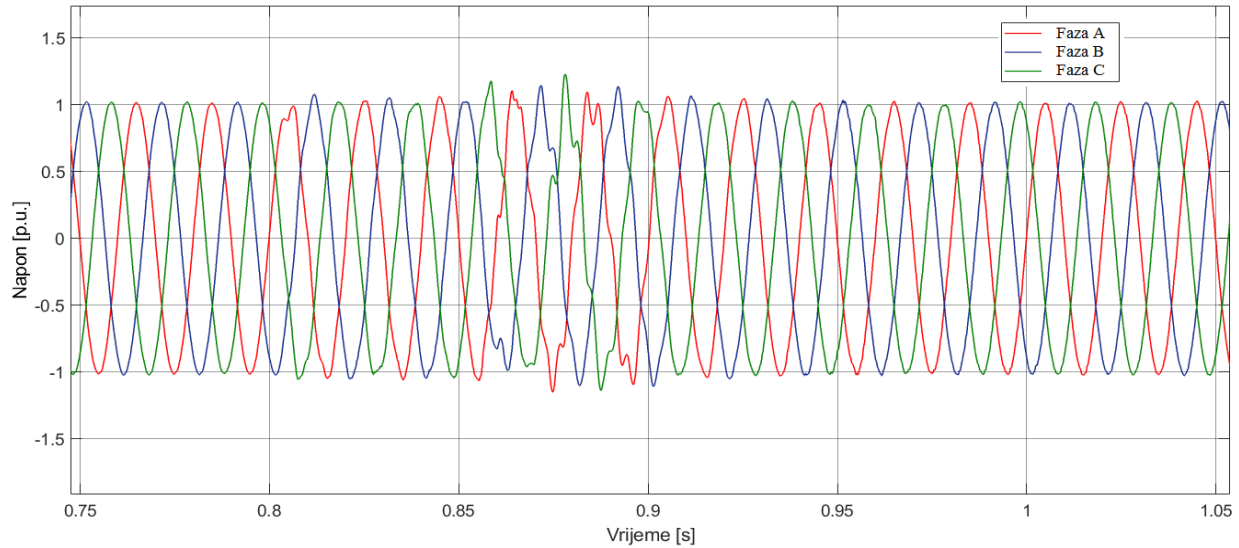
Slika 91. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 3 – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona



Slika 92. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 4 – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona



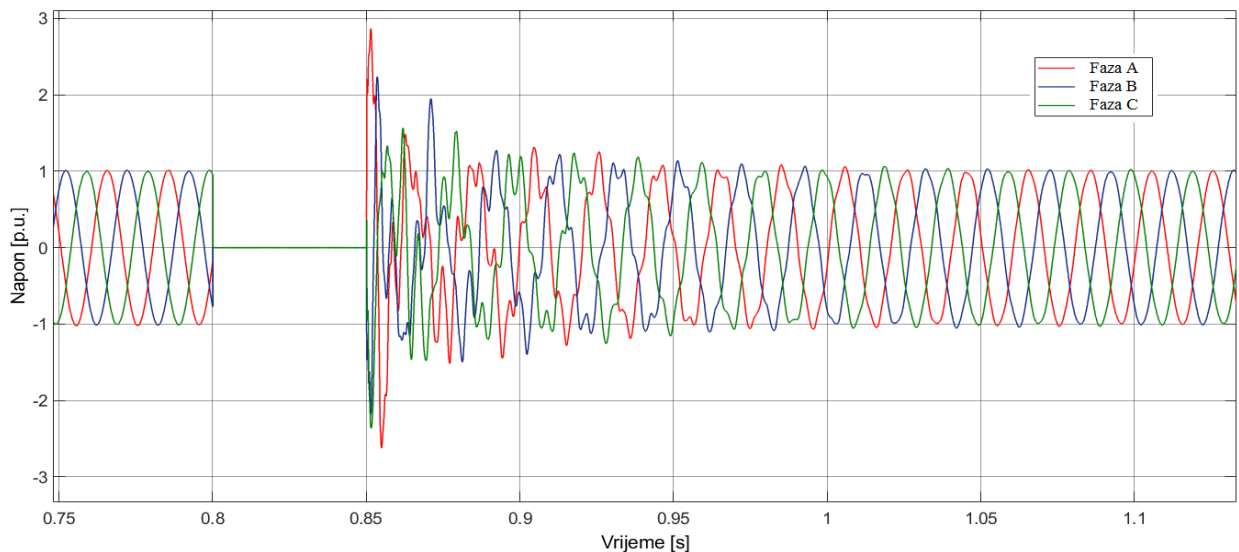
Slika 93. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 5 – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona



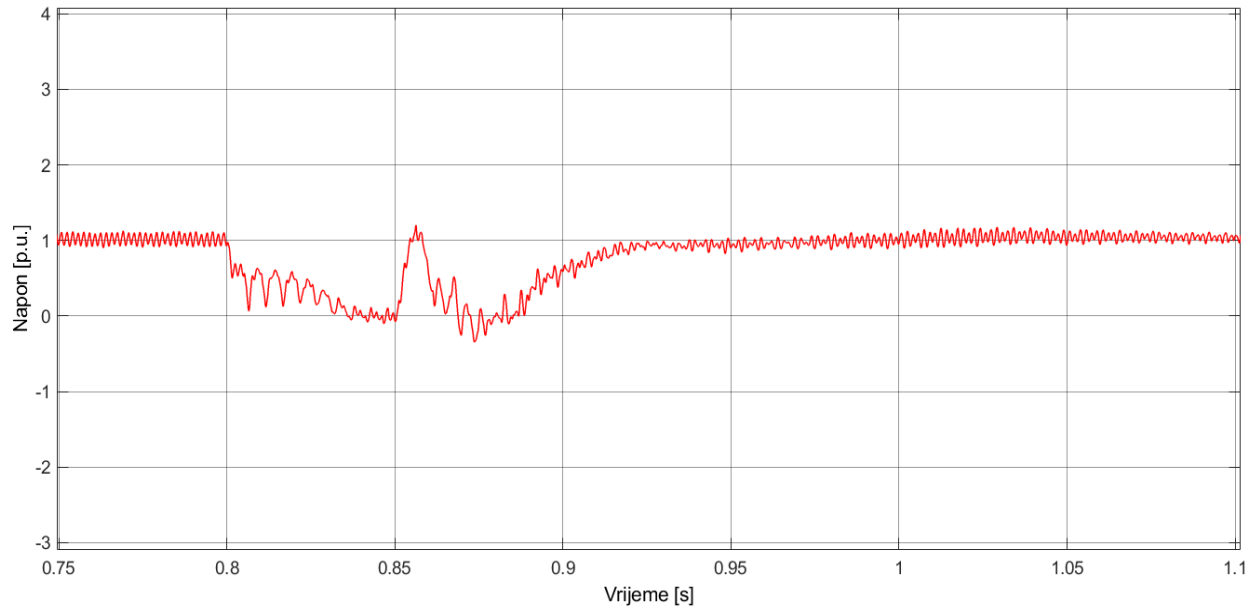
Slika 94. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 6 – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona

Kao što se može vidjeti na slikama 89, 90, 91, 92, 93. i 94. jedino na mjernom mjestu 1 dolazi do pojave prenapona koji ugrožavaju izolaciju.

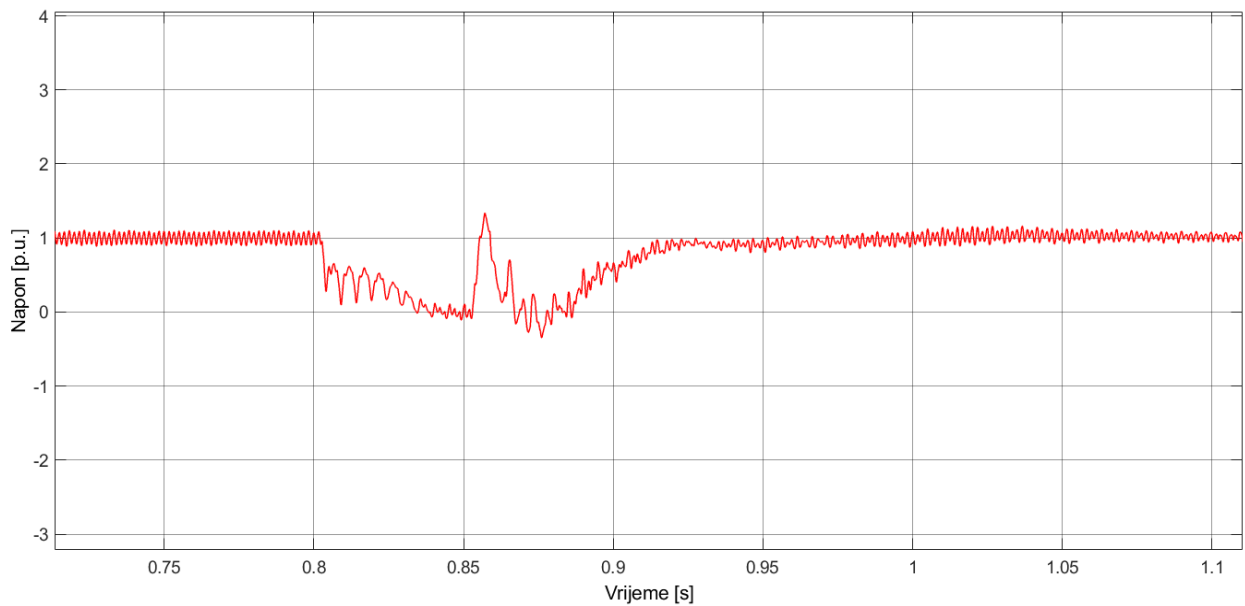
U cilju pronalazjenja optimalnog rješenja sa aspekta broja i mjesta ugradnje odvodnika prenapona u sistemu kako bi se izvršila koordinacija izolacije za konkretno razmatrani slučaj, u Simulink-u je izvršen veliki broj simulacija u kojima je vršeno priključivanje odvodnika prenapona na različitim lokacijama u sistemu. Optimalno rješenje za konkretno razmatrani slučaj predstavlja instaliranje odvodnika prenapona na mjernom mjestu 1, zaštitnog nivoa 713 kV. Vremenske promjene napona na svim mjernim mjestima nakon instaliranja odvodnika prenapona su prikazani na slikama 95, 96, 97, 98, 99. i 100.



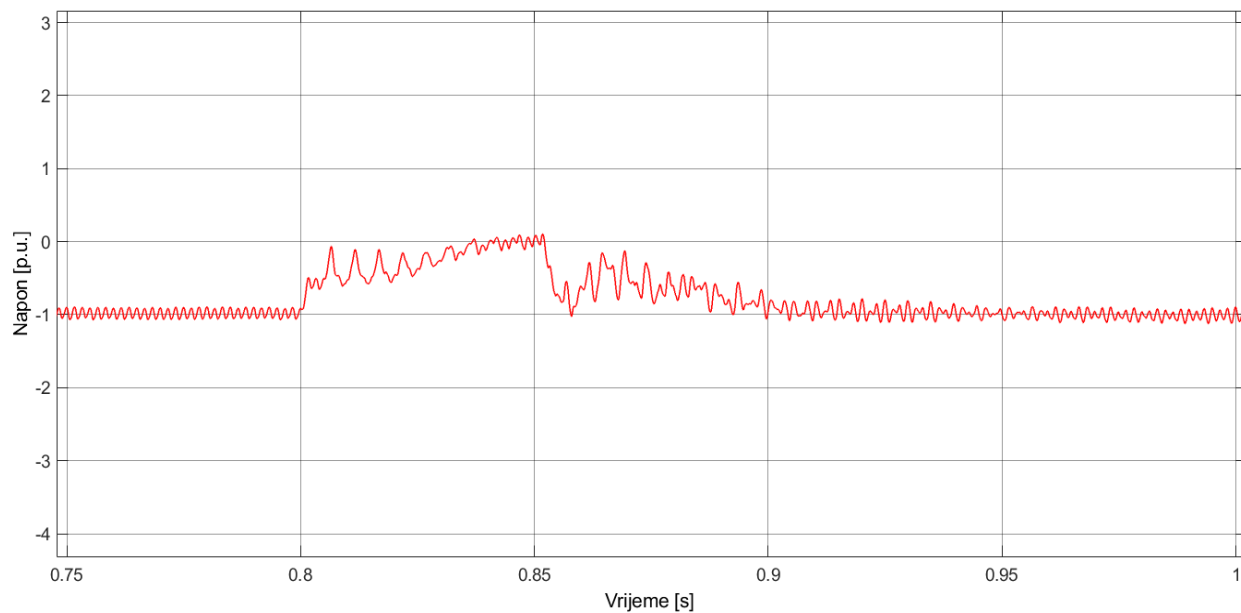
Slika 95. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 1 – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona



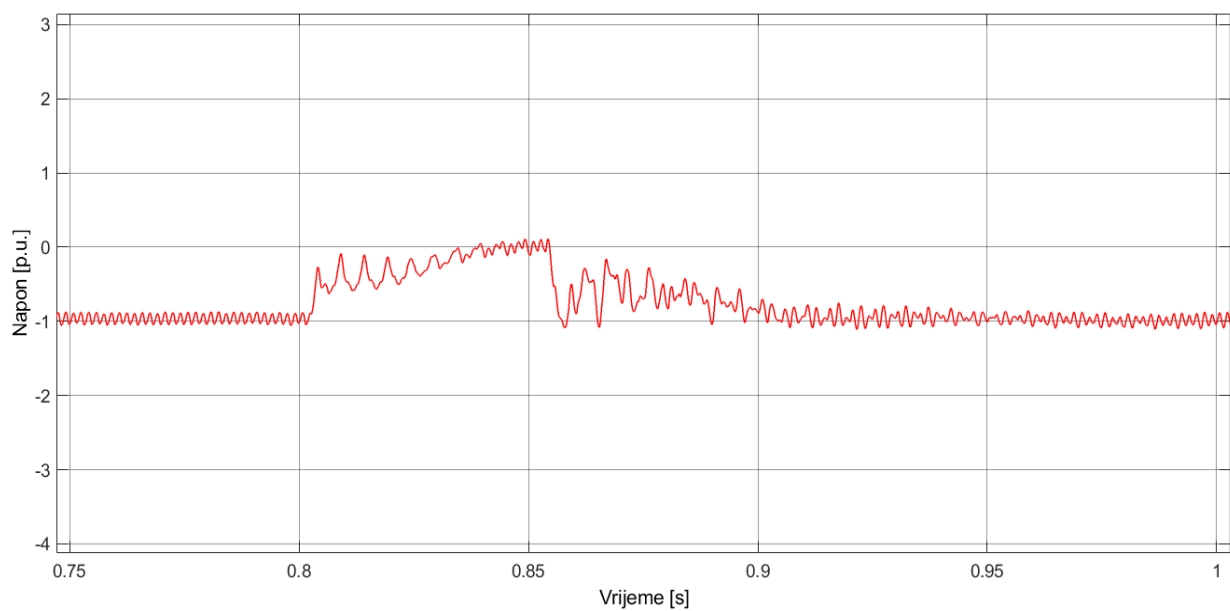
Slika 96. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 2 – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona



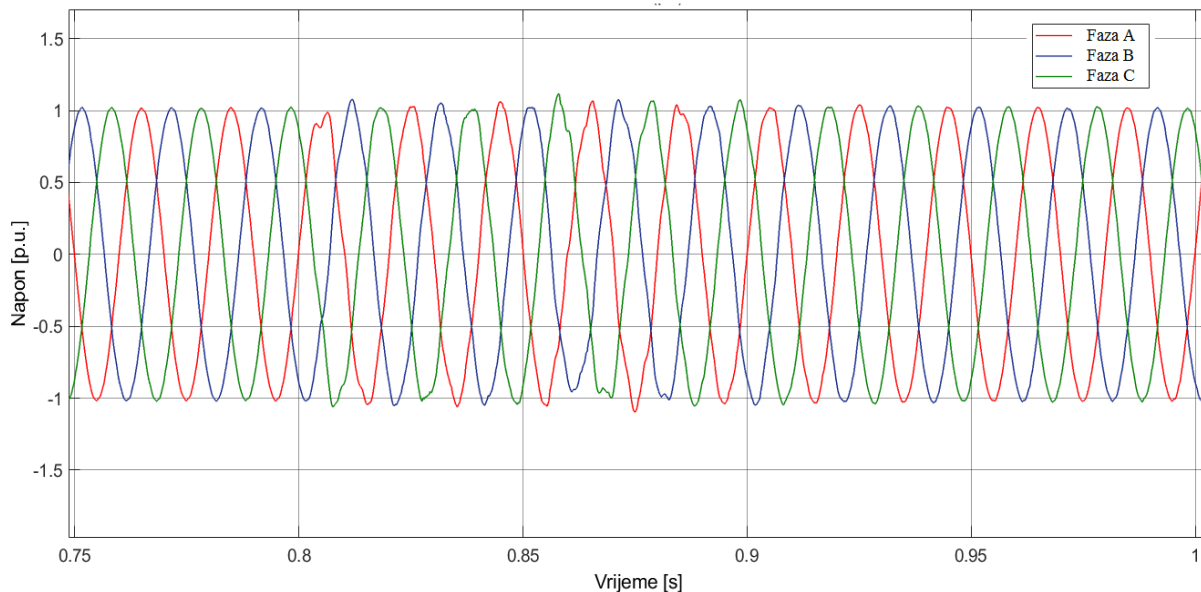
Slika 97. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 3 – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona



Slika 98. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 4 – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona



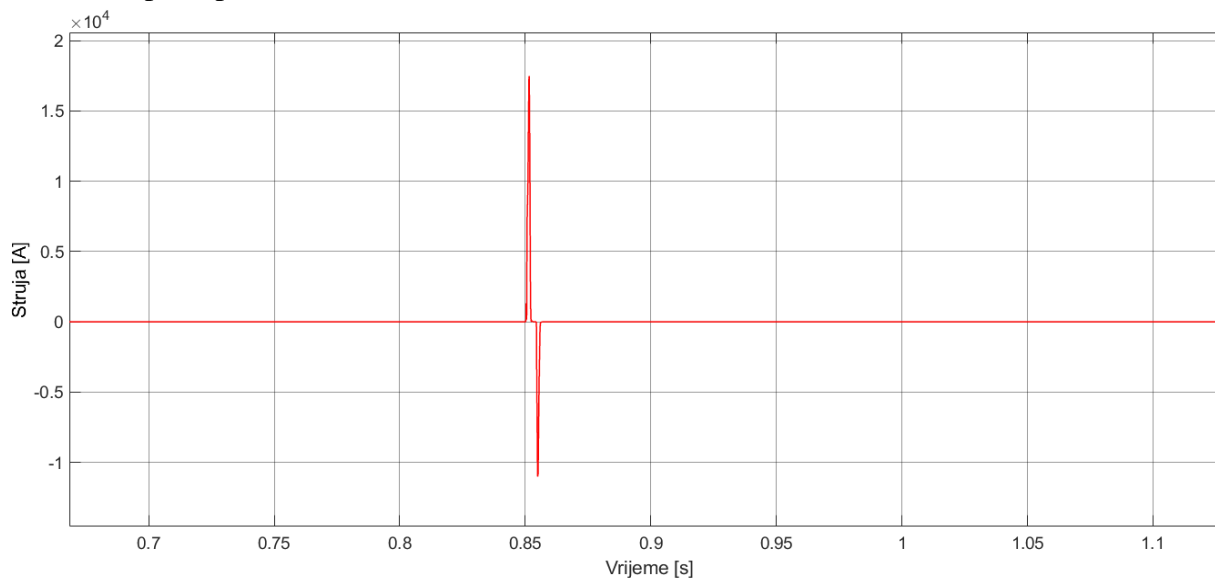
Slika 99. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 5 – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona



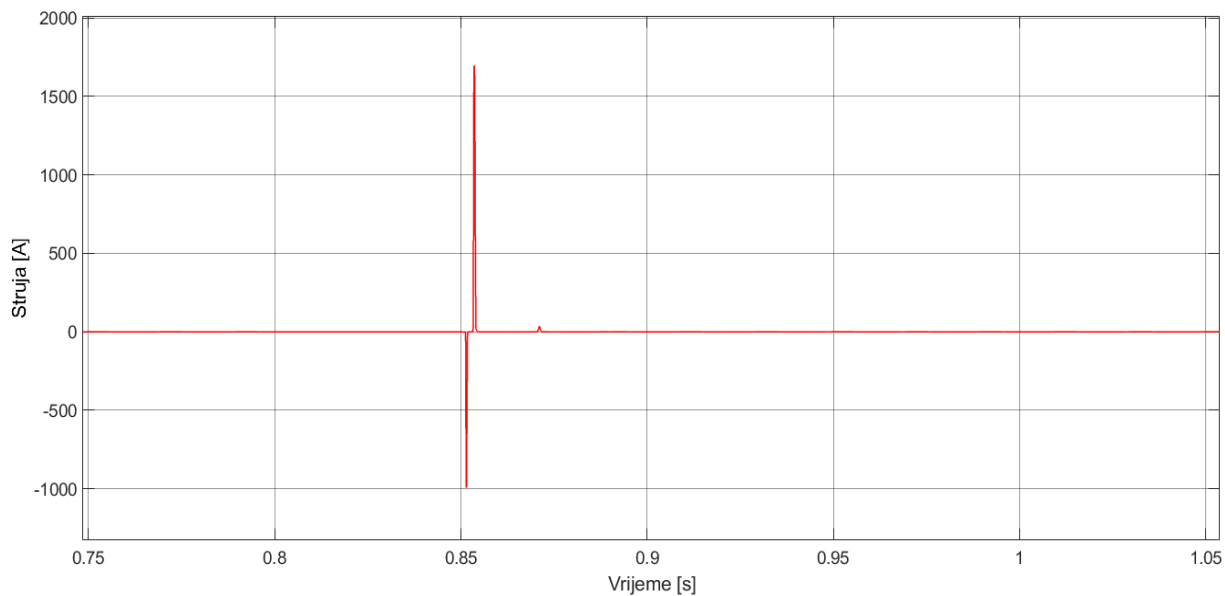
Slika 100. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 6 – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona

Kao što se može vidjeti sa slike 95. nakon instaliranja odvodnika prenapona, napon na mjernom mjestu 1 dostiže maksimalnu vrijednost od 2.866 p.u. (u fazi A). Ova vrijednost je niža od granične vrijednosti pri kojoj dolazi do ugrožavanja izolacije od 3.22 p.u. Takođe, na svim ostalim mjernim mjestima naponi ne dostižu granične vrijednosti pri kojima dolazi do ugrožavanja izolacije.

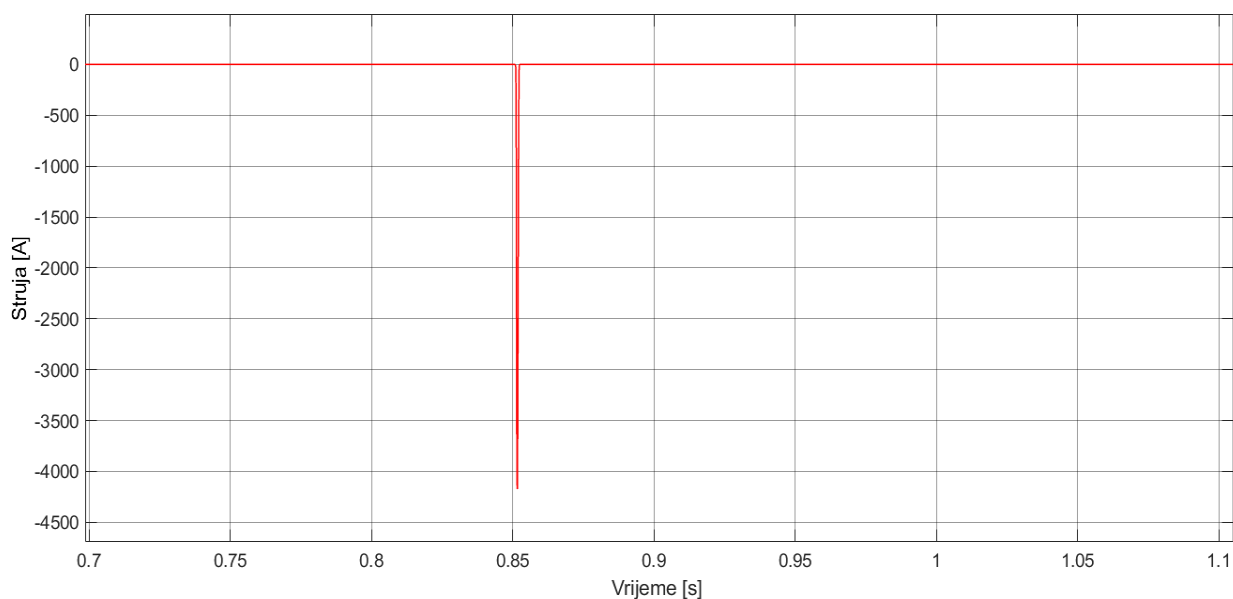
Kako bi se provjerila energetska naprezanja odvodnika prenapona prilikom proticanja struje odvođenja, na slikama 101, 102. i 103. su prikazane vremenske promjene struje kroz odvodnike prenapona.



Slika 101. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza A) – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW)



Slika 102. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza B) – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW)



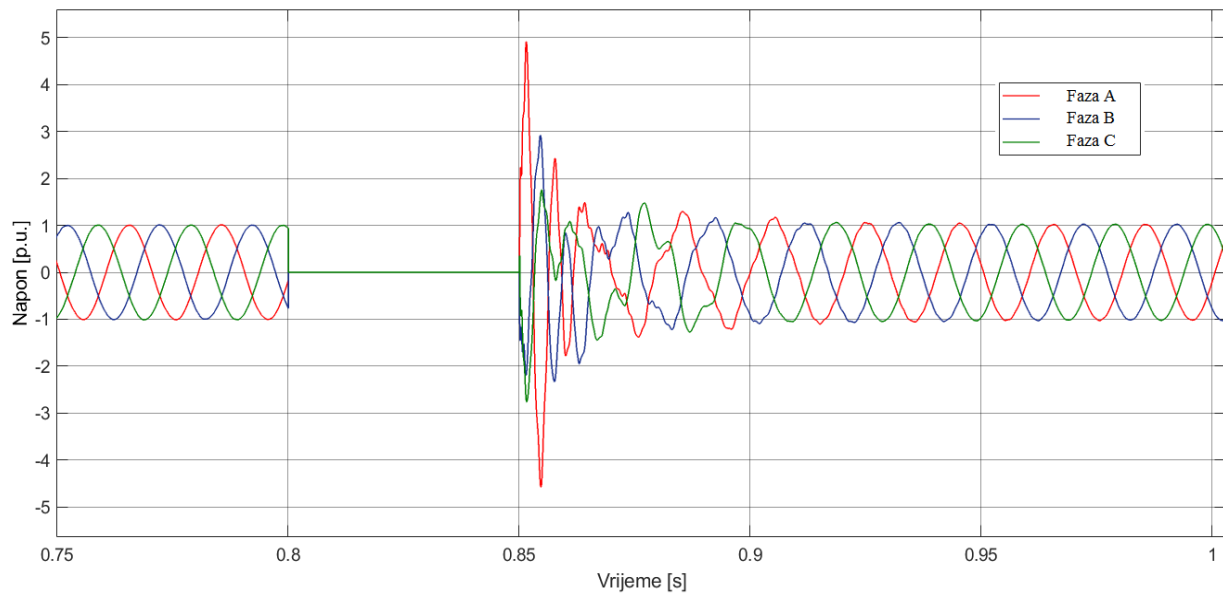
Slika 103. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza C) – bipolarna konfiguracija (750 km i 840 MW)

Sa slika 101, 102. i 103. se vidi da vrijednost struje kroz odvodnik prenapona priključen na fazu A prelazi 10 kA dok kod odvodnika prenapona priključenih na ostale dvije faze struja ne prelazi tu vrijednost. Kako struja kod jednog odvodnika prenapona prelazi graničnu vrijednost od 10 kA to se na ovom mjestu mora postaviti odvodnik prenapona za posebne uslove rada.

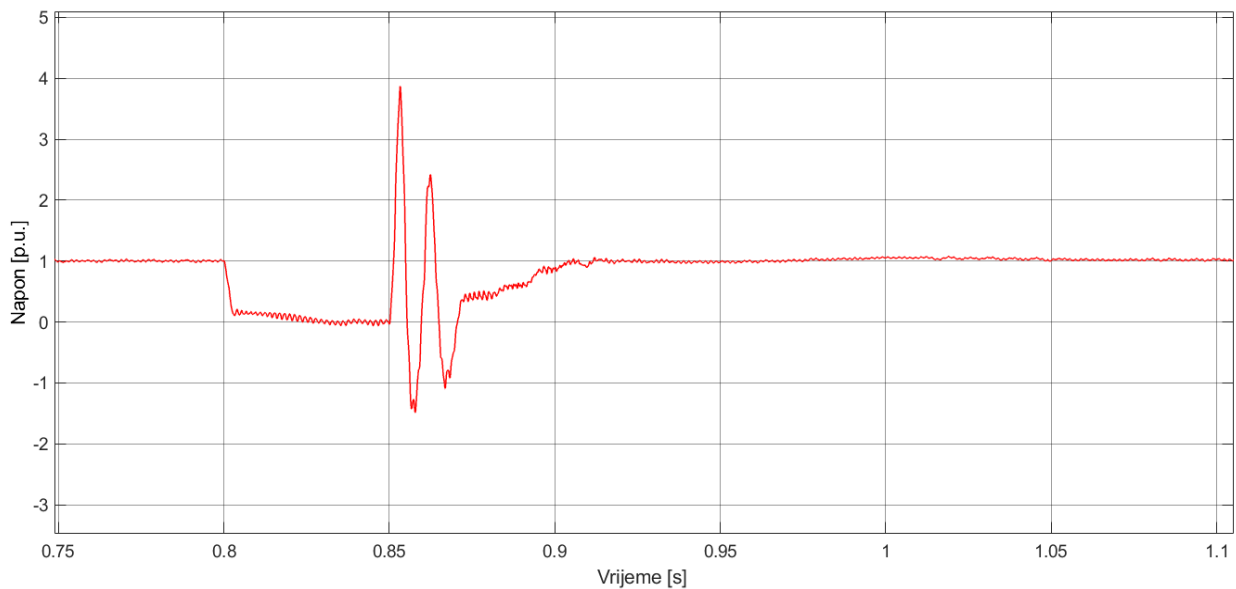
Postavljanjem odvodnika prenapona na mjernom mjestu 1 i vodeći računa o energetskim ograničenjima, može se zaključiti da je izvršena koordinacija izolacije za posmatrani slučaj.

Primjer 2 : Koordinacija izolacije za najkritičniji slučaj po izolaciju na mjernim mjestima 2 i 3

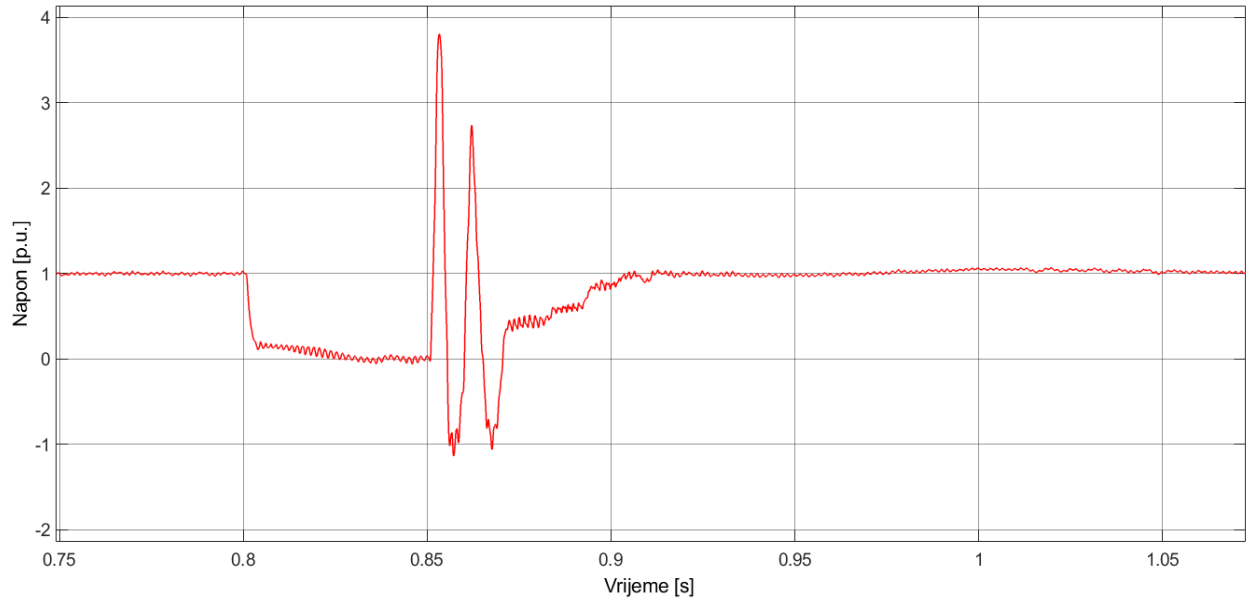
Kombinacija dužine i snage kroz HVDC sistem pri kojoj se ima maksimalna vrijednost prenapona na mjernim mjestima 2 i 3 je : 210 km i 420 MW. Pri ovim vrijednostima dužine i snage HVDC sistema na mjernim mjestima 2 i 3 prenapon dostiže vrijednosti od 3.869 p.u. i 3.807 p.u., respektivno. Vremenske promjene napona na svim mjernim mjestima su prikazane na slikama 104, 105, 106, 107, 108. i 109.



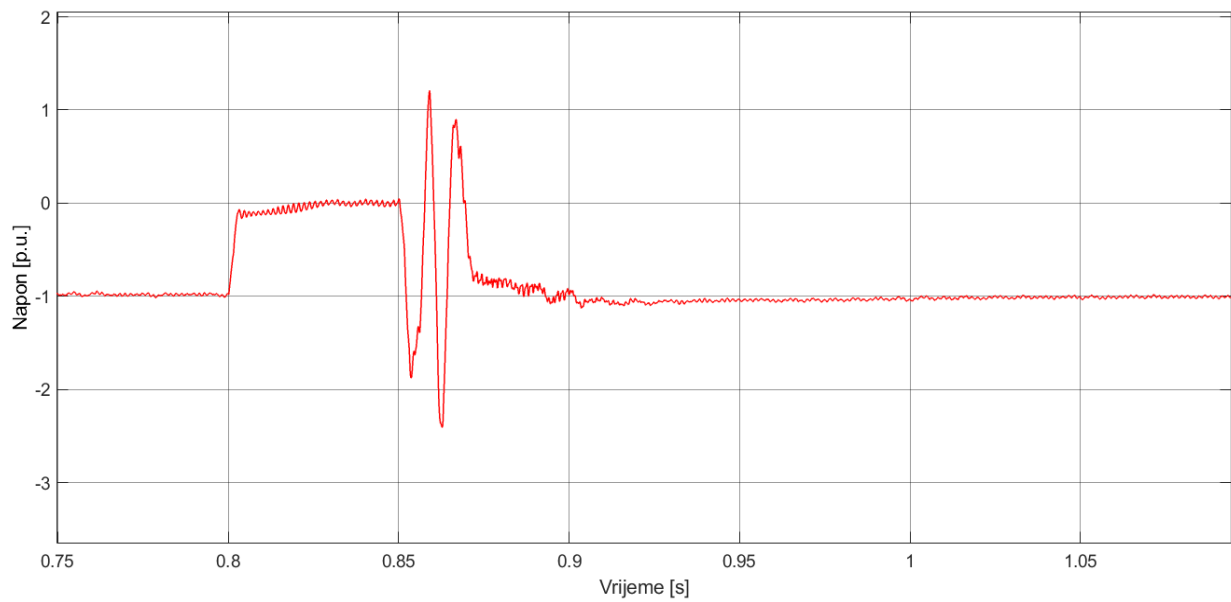
Slika 104. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 1 – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona



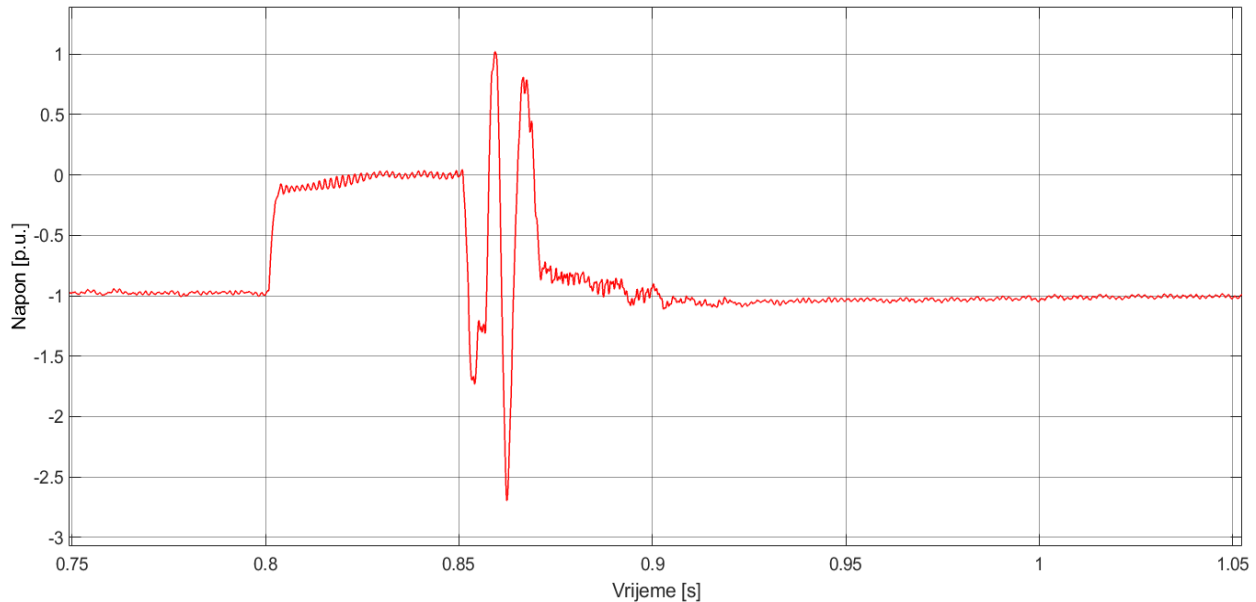
Slika 105. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 2 – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona



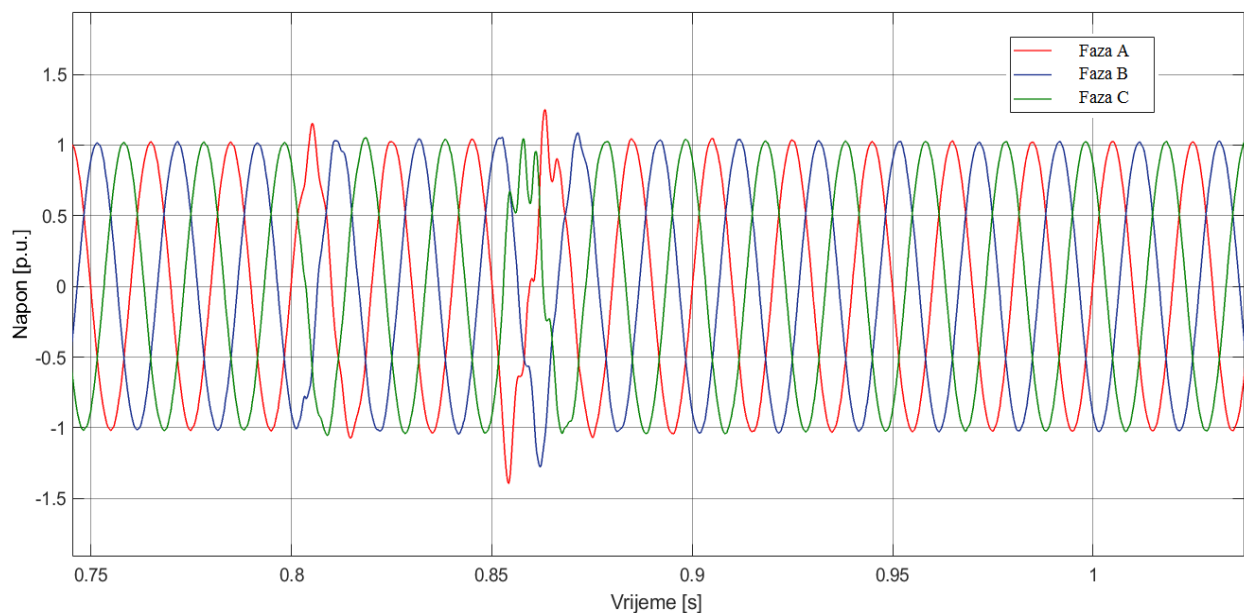
Slika 106. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 3 – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona



Slika 107. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 4 – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona



Slika 108. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 5 – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona

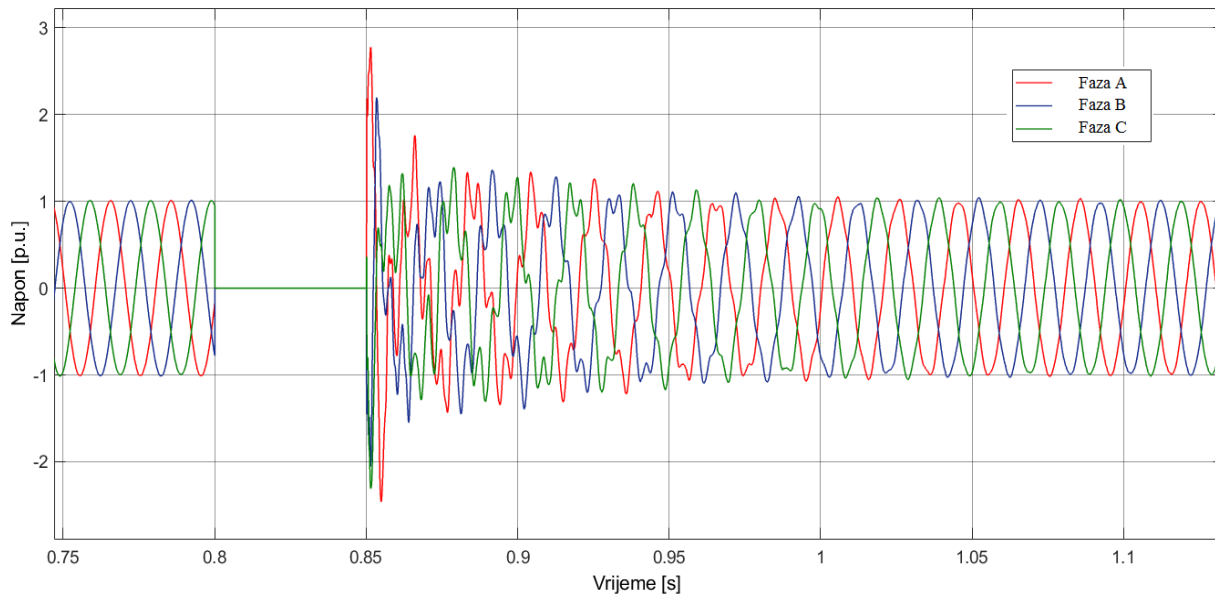


Slika 109. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 6 – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona

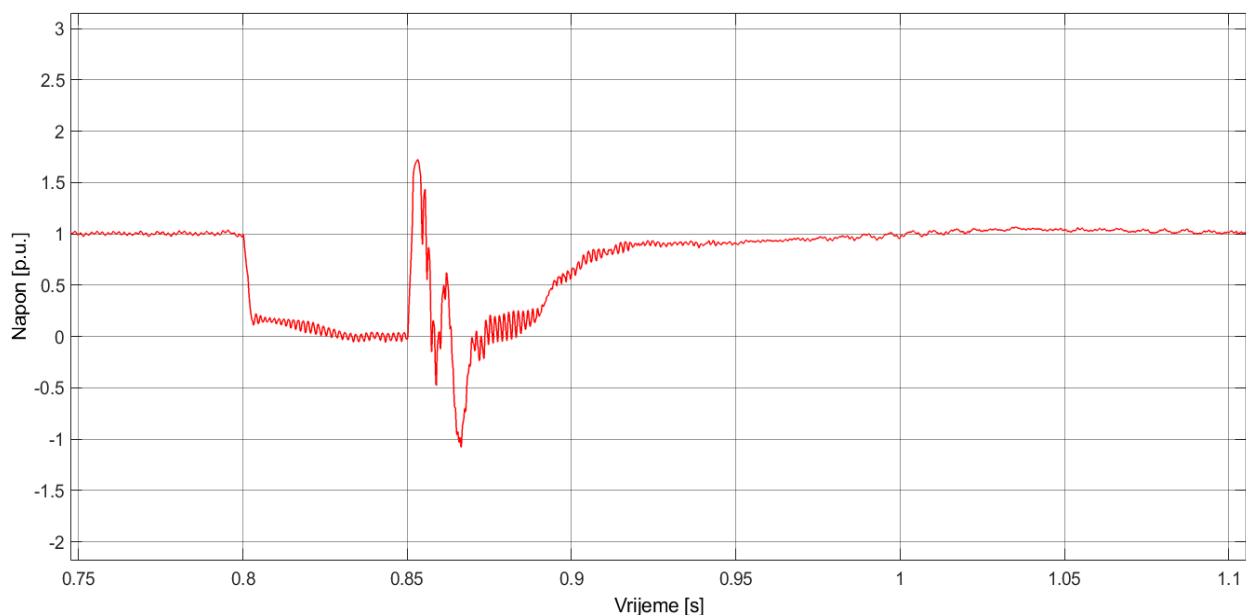
Kao što se može vidjeti sa slika 104, 105, 106. i 108.. na mjernim mjestima 1, 2, 3 i 5 dolazi do pojave prenapona koji ugrožavaju izolaciju.

U cilju pronalazjenja optimalnog rješenja sa aspekta broja i mjesta ugradnje odvodnika prenapona u sistemu kako bi se izvršila koordinacija izolacije za konkretno razmatrani slučaj, u Simulink-u je izvršen veliki broj simulacija u kojima je vršeno priključivanje odvodnika prenapona na različitim lokacijama u sistemu. Optimalno rješenje za konkretno razmatrani slučaj

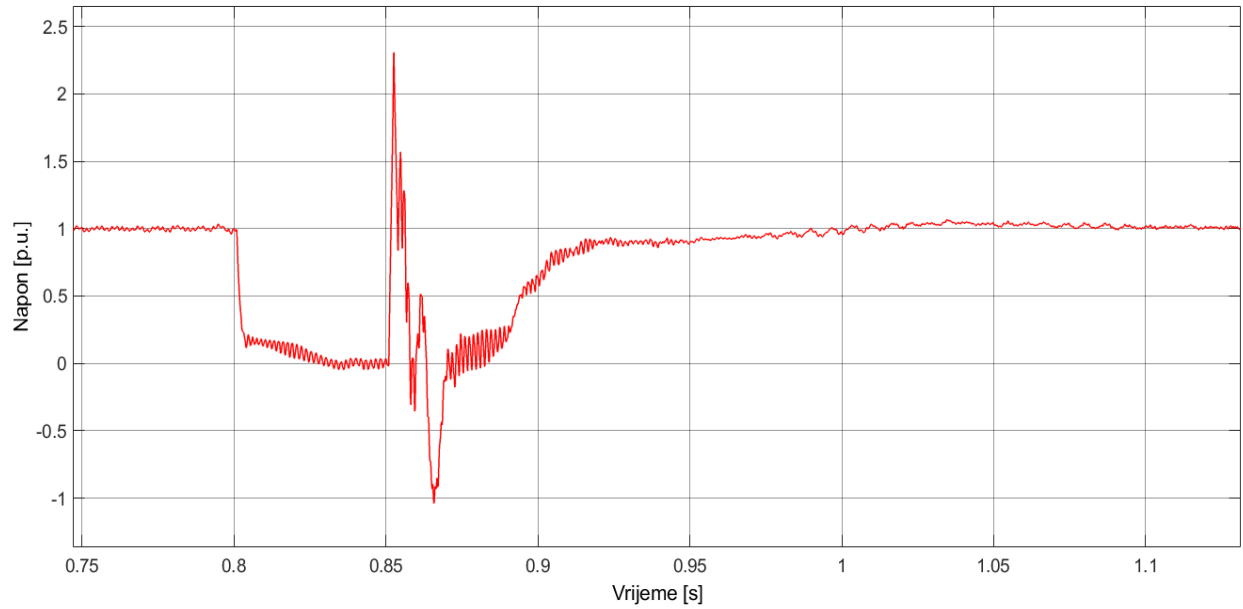
predstavlja instaliranje odvodnika prenapona na mjernom mjestu 1 zaštitnog nivoa 713 kV i odvodnika prenapona na mjernom mjestu 2 zaštitnog nivoa 872 kV. Vremenske promjene napona na svim mjernim mjestima nakon instaliranja odvodnika prenapona su prikazane na slikama 110, 111, 112, 113, 114. i 115.



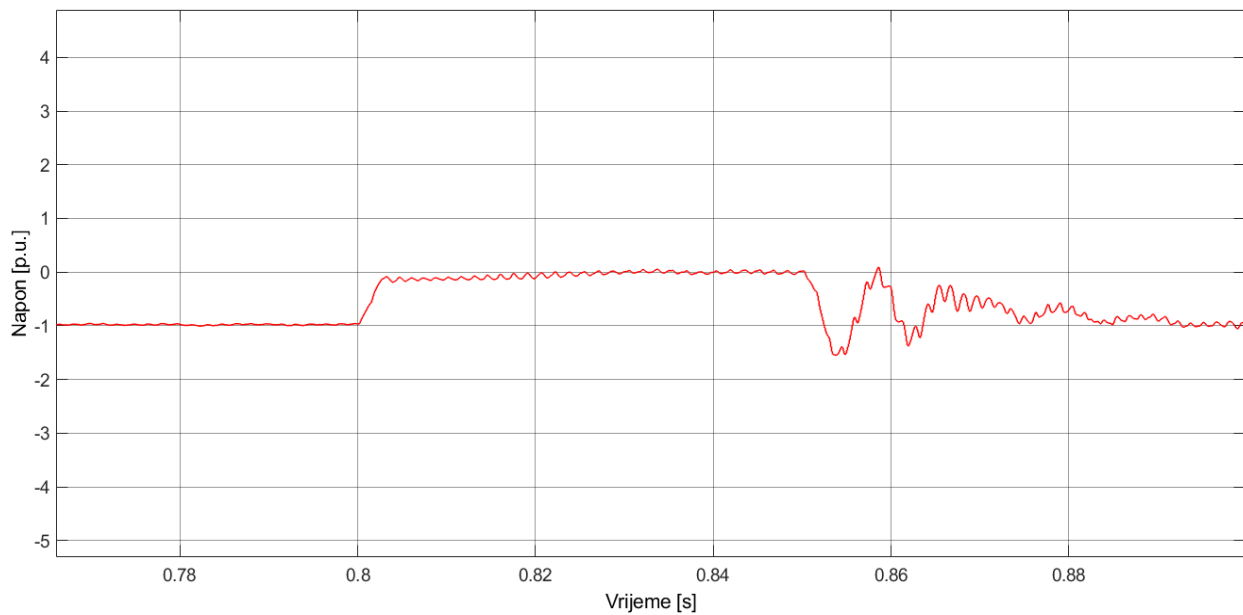
Slika 110. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 1 – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona



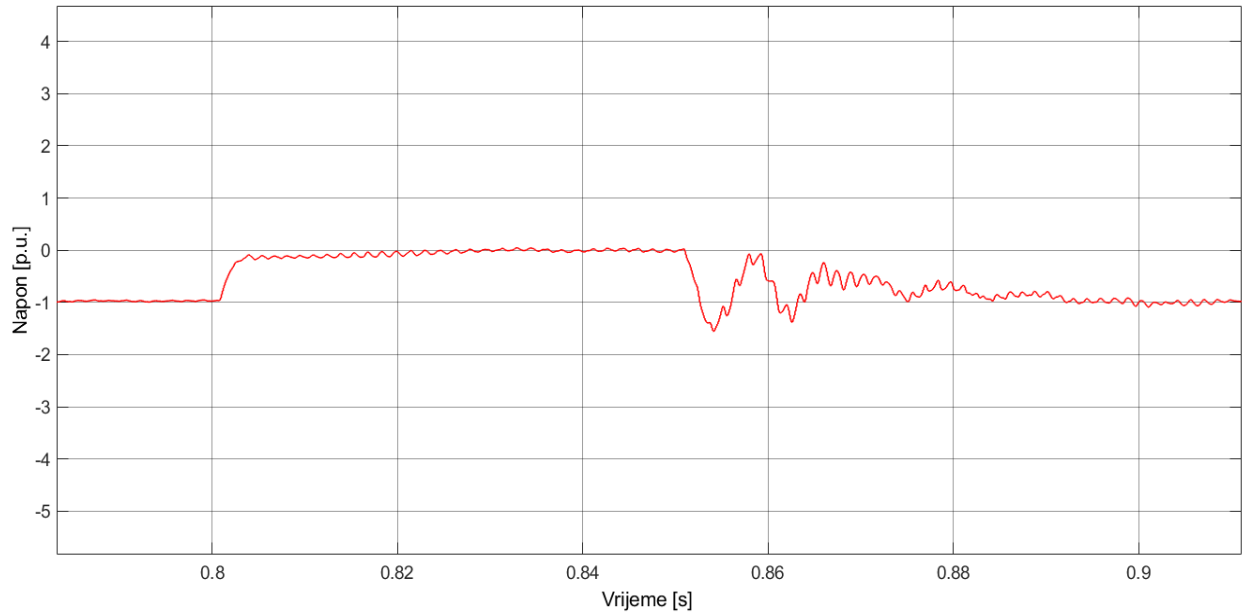
Slika 111. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 2 – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona



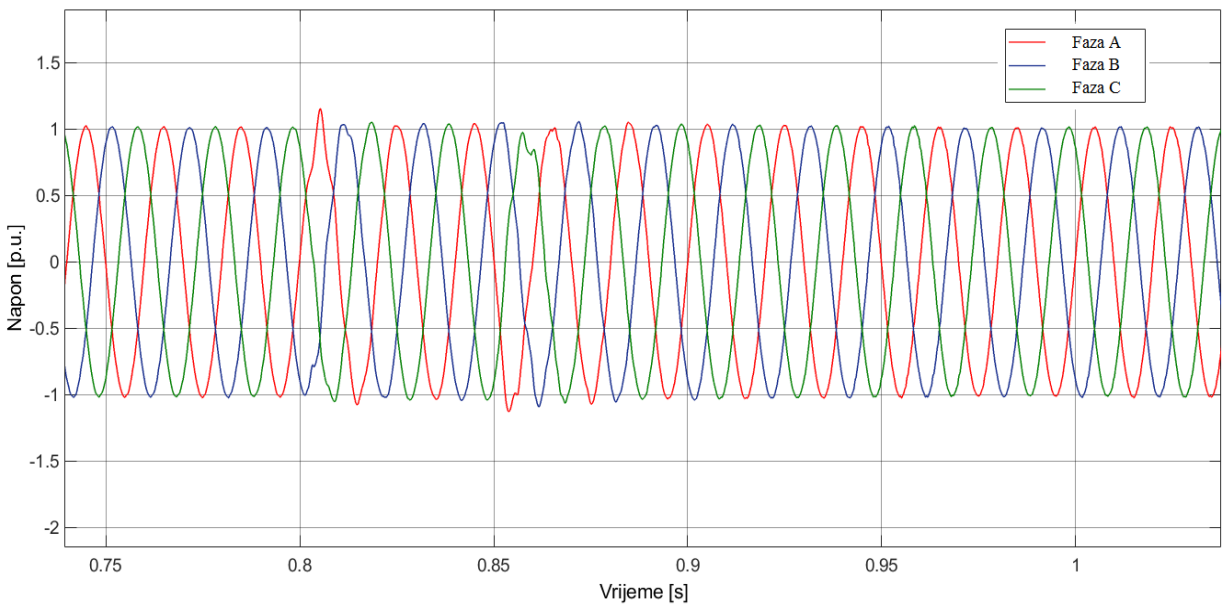
Slika 112. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 3 – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona



Slika 113. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 4 – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona



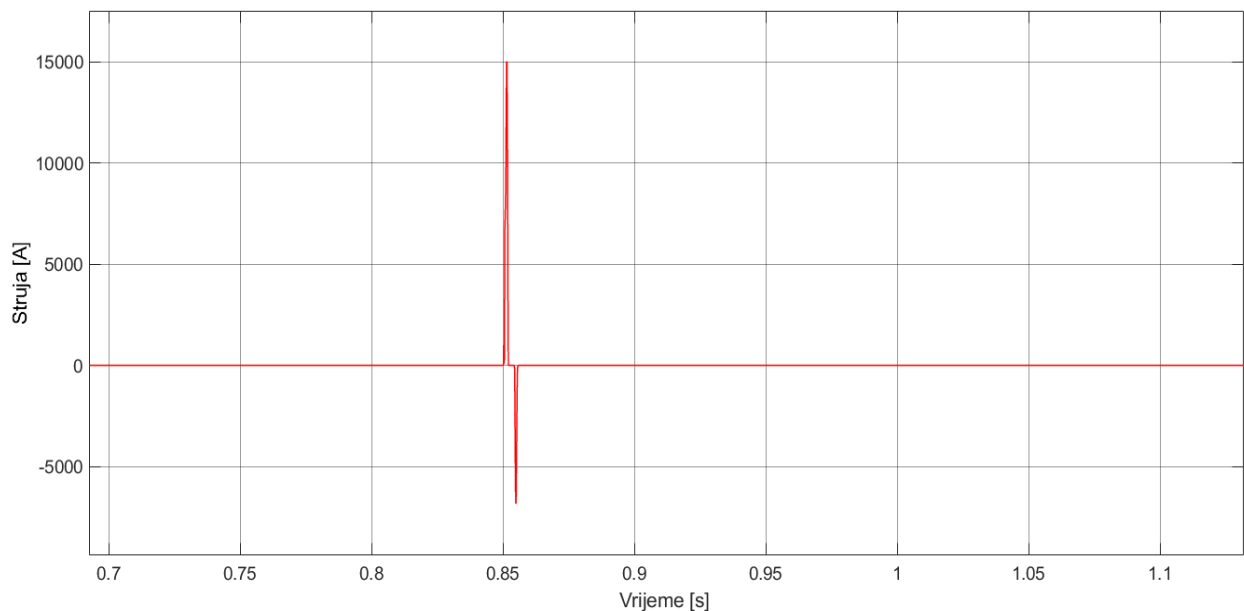
Slika 114. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 5 – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona



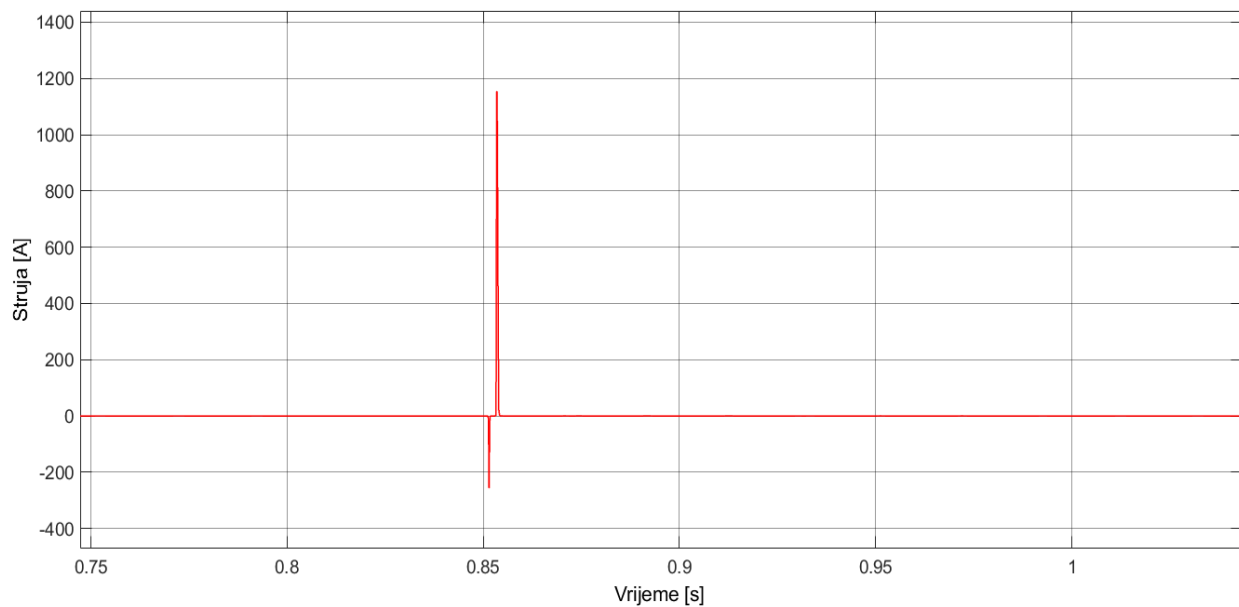
Slika 115. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 6 – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona

Kao što se može vidjeti sa slika 111. i 112. nakon instaliranja odvodnika prenapona, napon na mjernim mjestima 2 i 3 dostiže maksimalnu vrijednost od 1.724 p.u. i 2.306 p.u., respektivno. Ove vrijednosti su niže od granične vrijednosti pri kojoj dolazi do ugrožavanja izolacije od 2.6 p.u. Takođe, na svim ostalim mjernim mjestima naponi ne dostižu granične vrijednosti pri kojima dolazi do ugrožavanja izolacije.

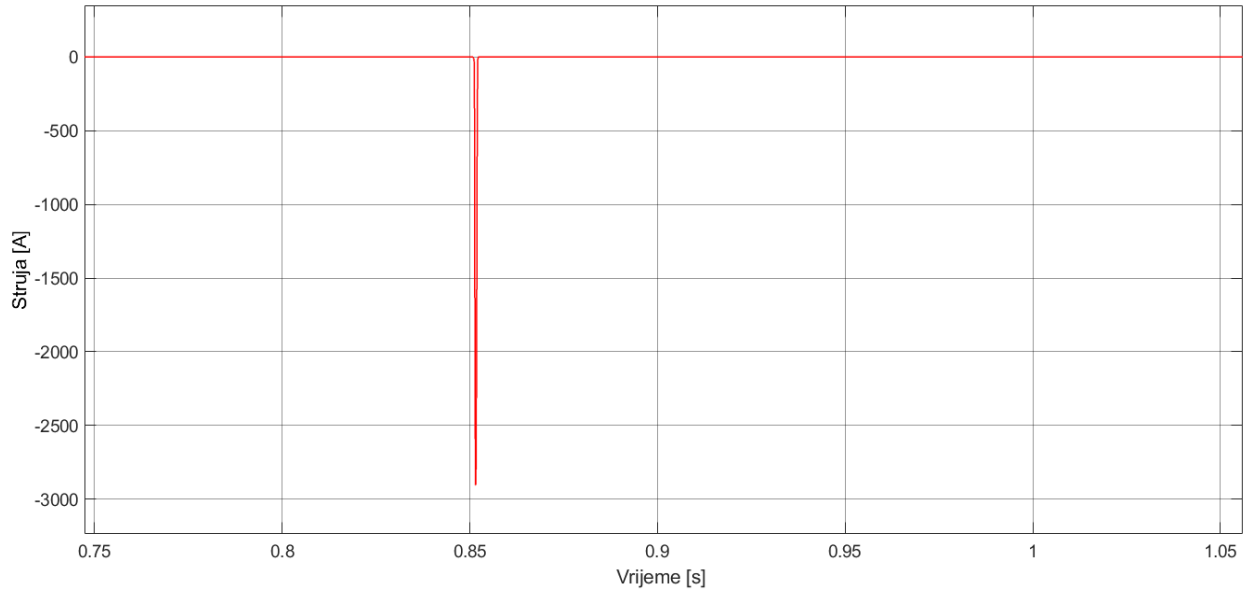
Kako bi se provjerila energetska naprezanja odvodnika prenapona prilikom proticanja struje odvođenja, na slikama 116, 117, 118. i 119. su prikazane vremenske promjene struje kroz odvodnike prenapona.



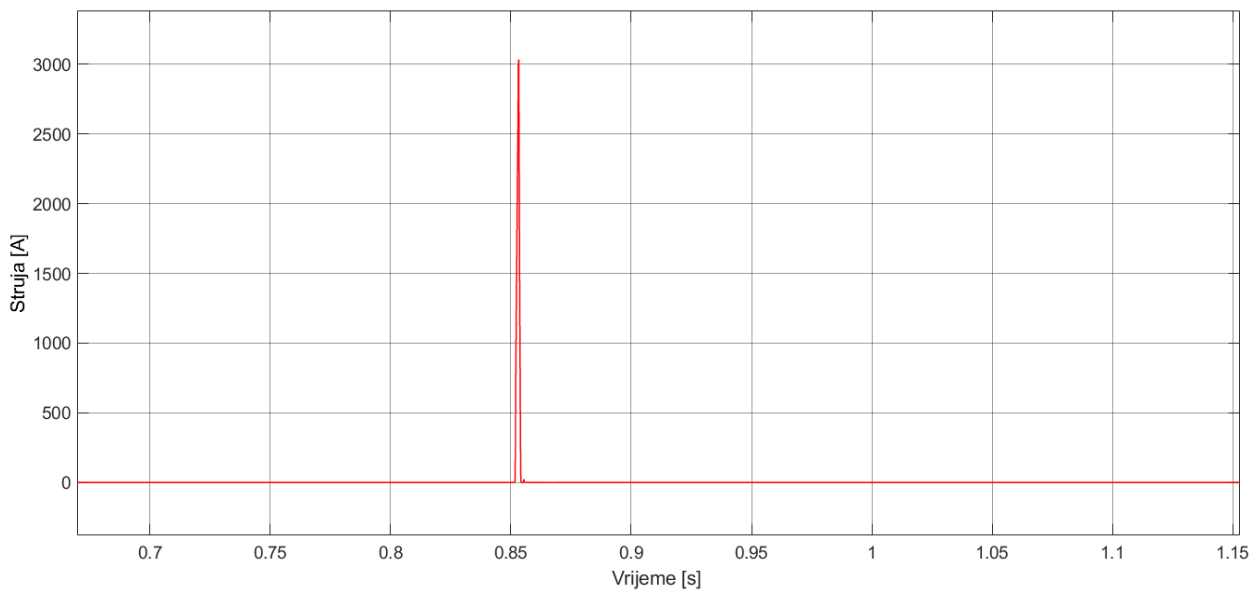
Slika 116. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza A) – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW)



Slika 117. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza B) – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW)



Slika 118. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza C) – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW)



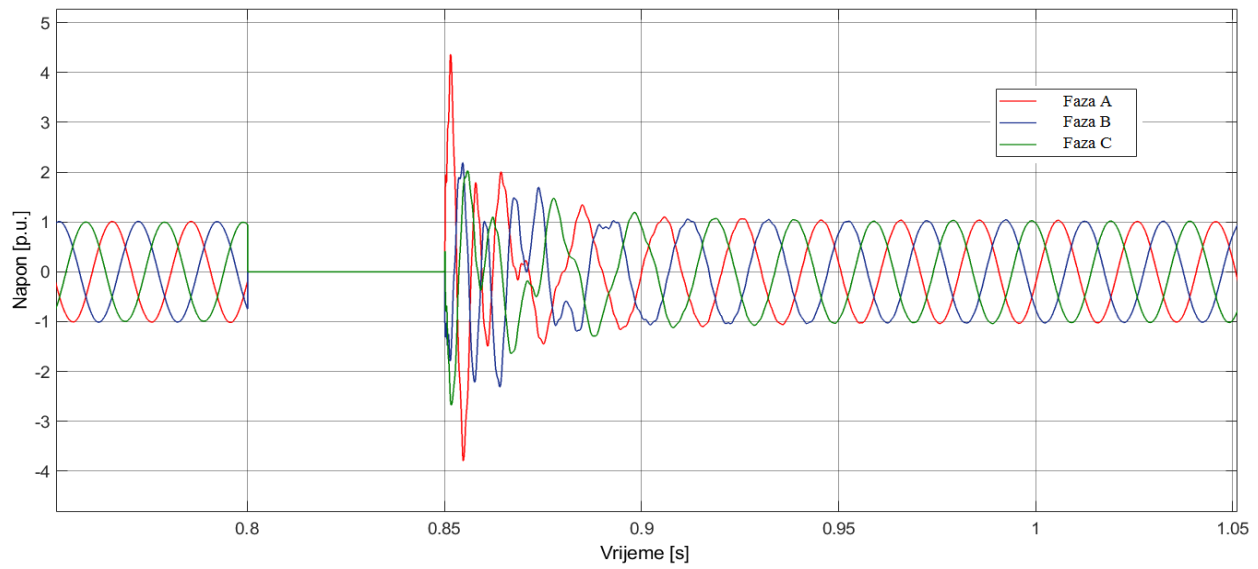
Slika 119. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 2 – bipolarna konfiguracija (210 km i 420 MW)

Sa slike 116. se vidi da jedino kroz odvodnik prenapona koji je priključen na fazu A u AC sistemu na strani ispravljača protiče struja koja ima veću vrijednost od vrijednosti pri kojoj je izmjeren zaštitni nivo odvodnika prenapona. Prema tome na ovom mjestu se mora postaviti odvodnik prenapona za posebne uslove rada.

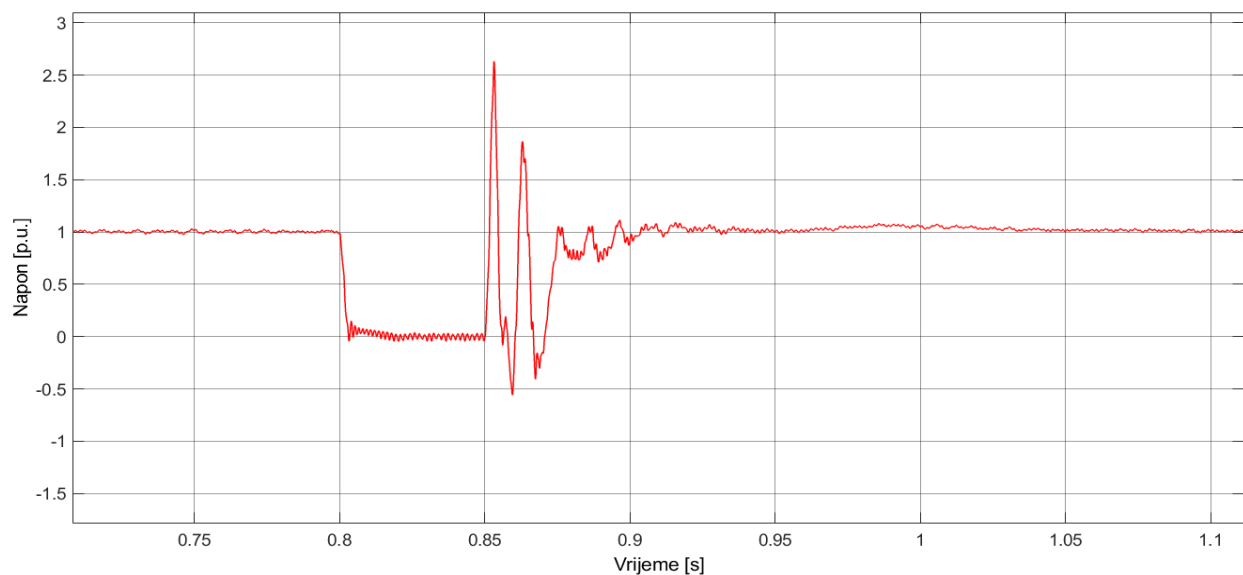
Postavljanjem odvodnika prenapona na mjernim mjestima 1 i 2, kao i vodeći računa o energetske ograničenjima, može se zaključiti da je izvršena koordinacija izolacije za posmatrani slučaj.

Primjer 3 : Koordinacija izolacije za najkritičniji slučaj po izolaciju na mjernom mjestu 4

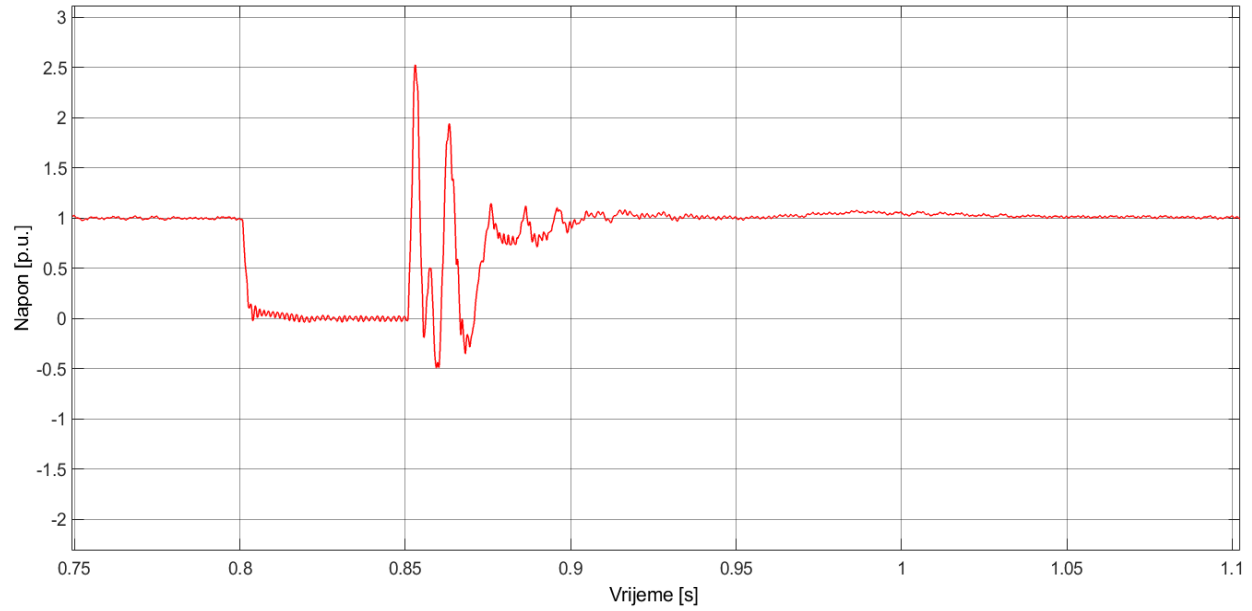
Kombinacija dužine i snage kroz HVDC sistem pri kojoj se ima maksimalna vrijednost prenapona na mjernom mjestu 4 je : 200 km i 480 MW. Pri ovim vrijednostima dužine i snage HVDC sistema na mjernom mjestu 4 prenapon dostiže vrijednost od 3.74 p.u. Vremenske promjene napona na svim mjernim mjestima su prikazane na slikama 120, 121, 122, 123, 124. i 125.



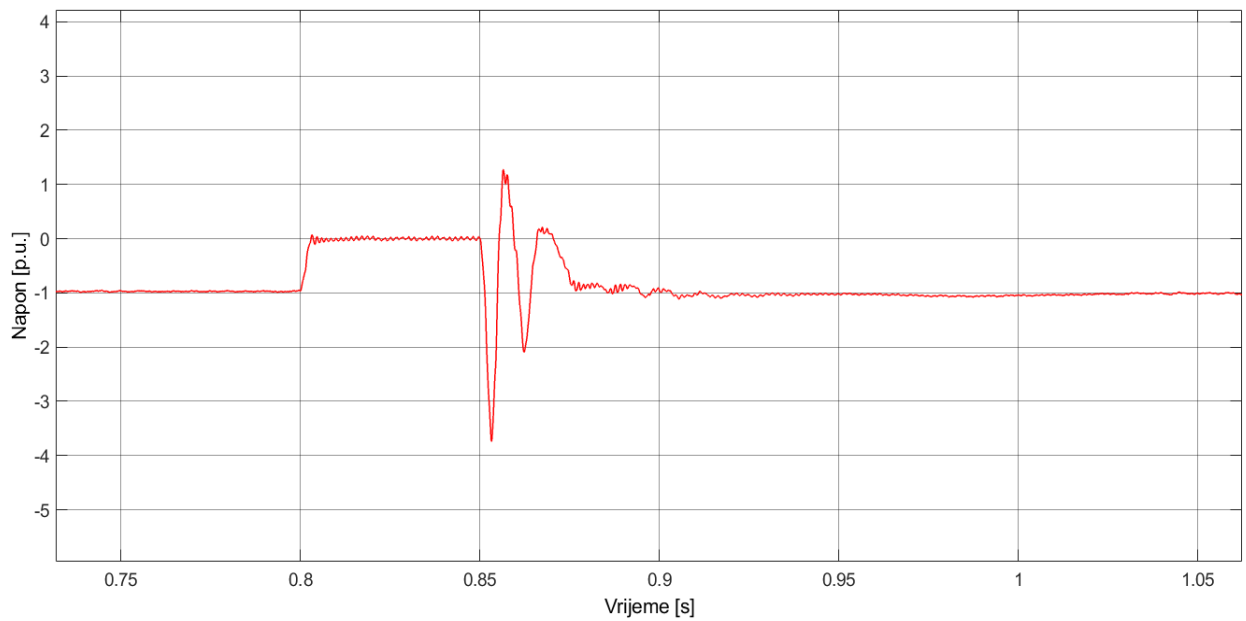
Slika 120. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 1 – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona



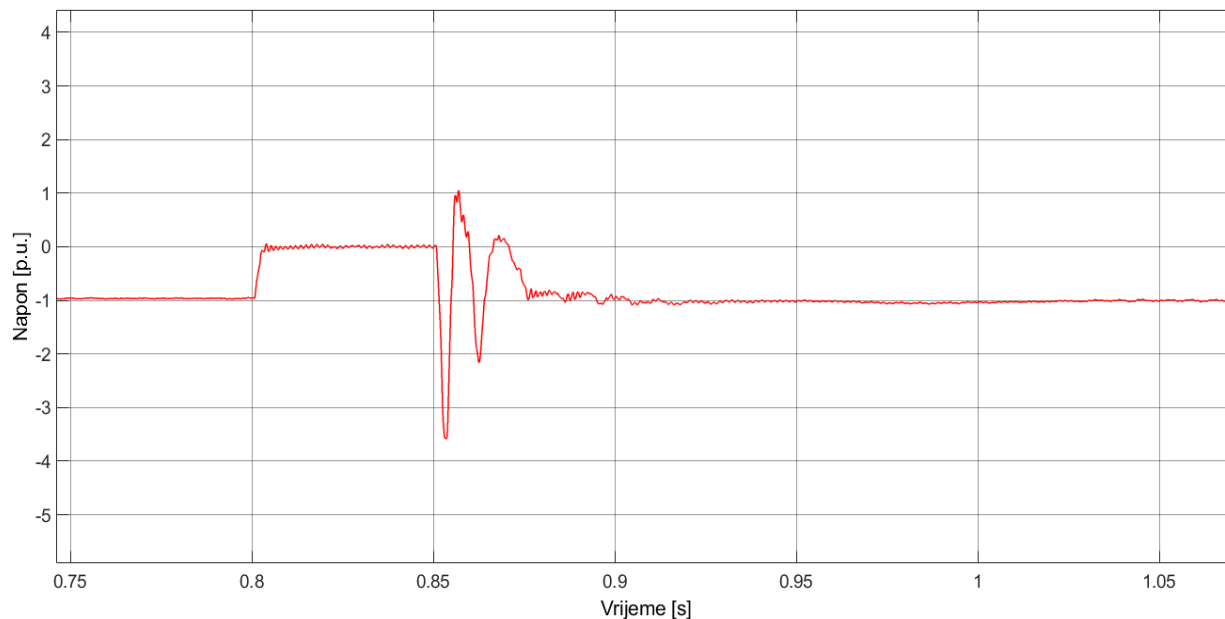
Slika 121. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 2 – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona



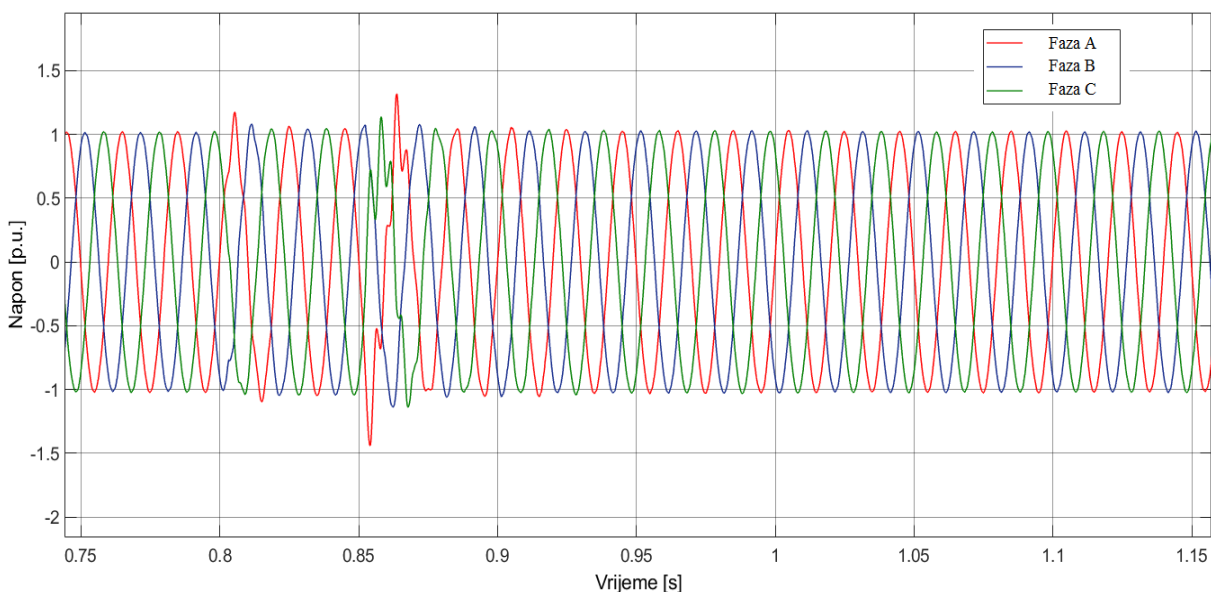
Slika 122. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 3 – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona



Slika 123. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 4 – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona



Slika 124. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 5 – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona

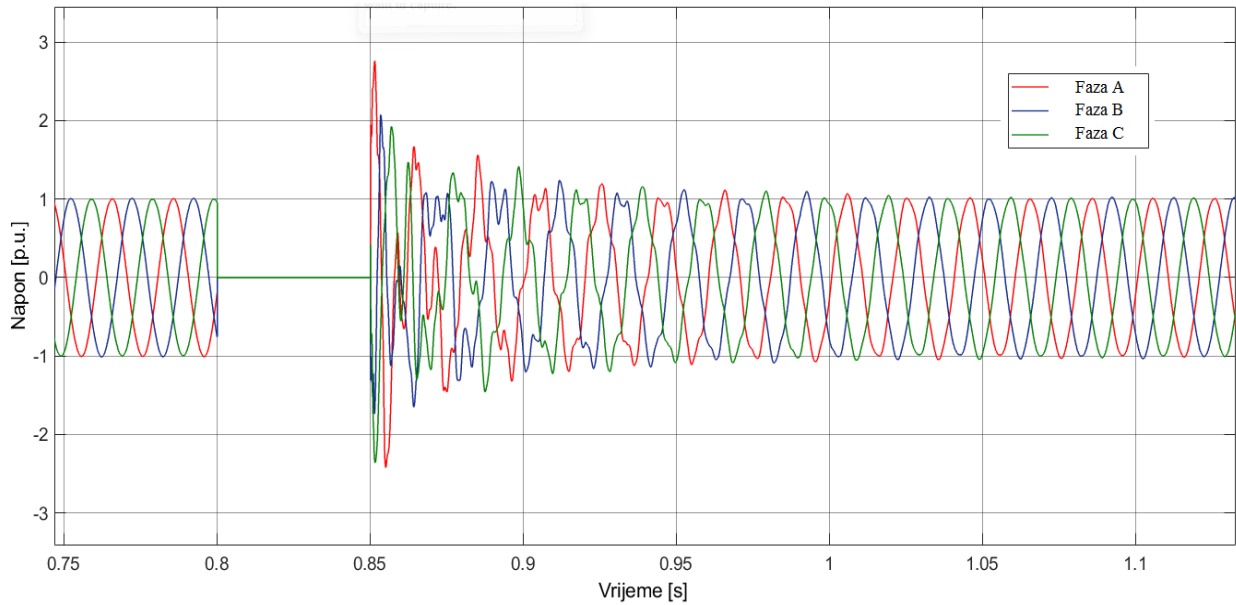


Slika 125. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 6 – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona

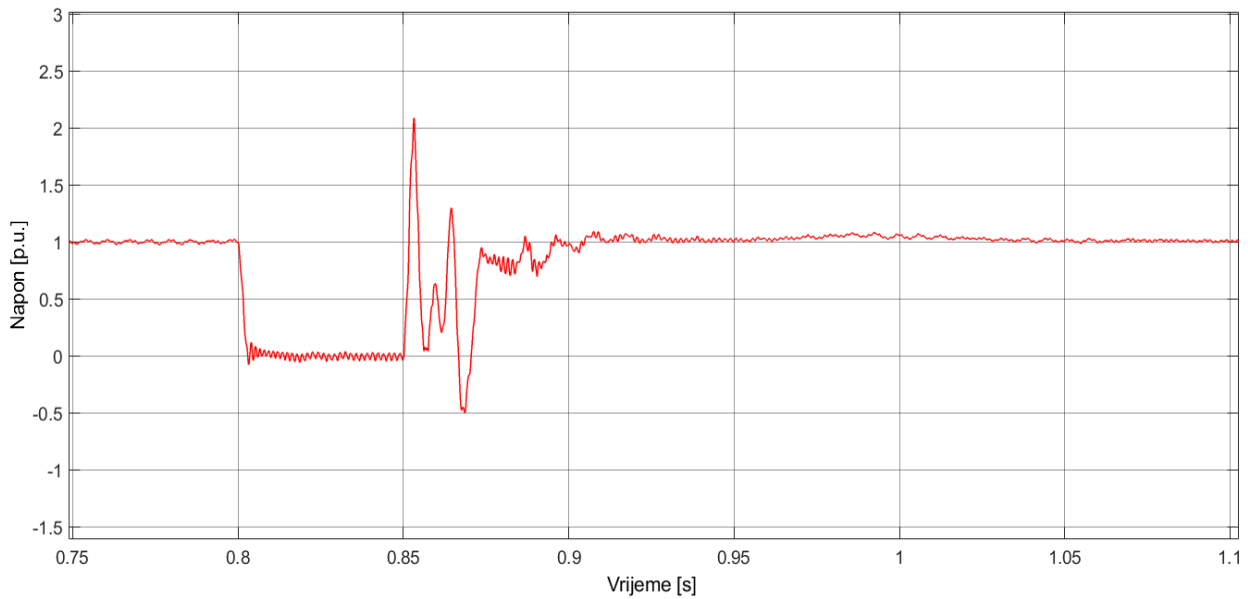
Kao što se može vidjeti na slikama 120, 121, 123. i 124. na mjernim mjestima 1, 2, 4 i 5 dolazi do pojave prenapona koji ugrožavaju izolaciju.

U cilju pronalazjenja optimalnog rješenja sa aspekta broja i mjesta ugradnje odvodnika prenapona u sistemu kako bi se izvršila koordinacija izolacije za konkretno razmatrani slučaj, u Simulink-u je izvršen veliki broj simulacija u kojima je vršeno priključivanje odvodnika prenapona na različitim lokacijama u sistemu. Optimalno rješenje za konkretno razmatrani slučaj

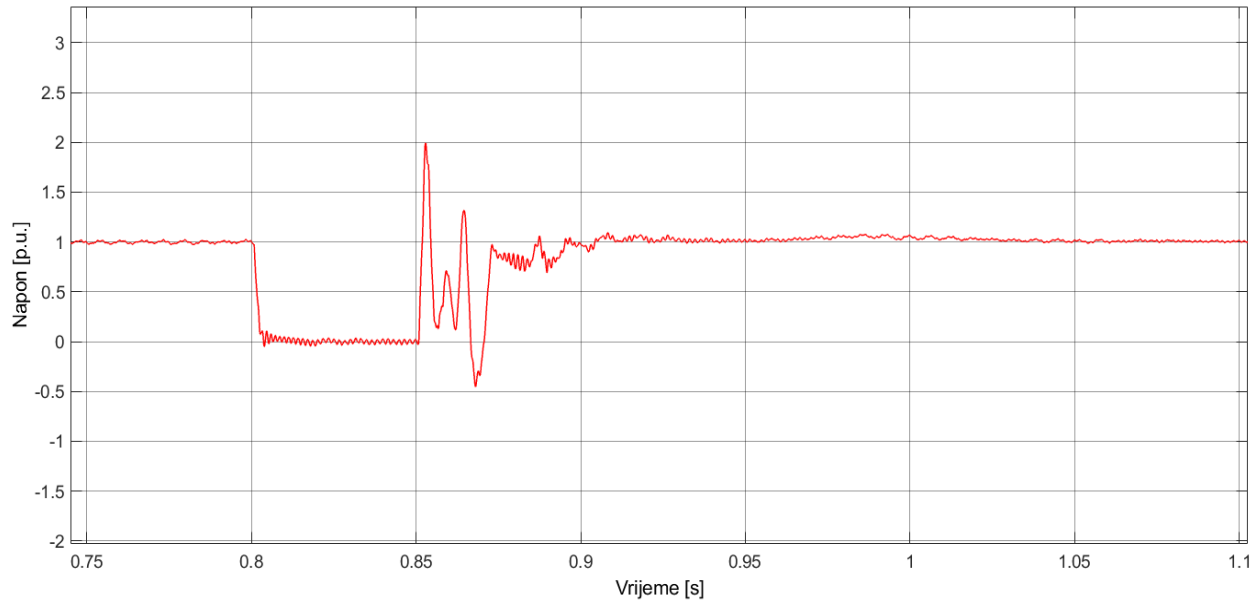
predstavlja instaliranje odvodnika prenapona na mjernom mjestu 1 zaštitnog nivoa 713 kV. Vremenske promjene napona na svim mjernim mjestima nakon instaliranja odvodnika prenapona su prikazane na slikama 126, 127, 128, 129, 130. i 131.



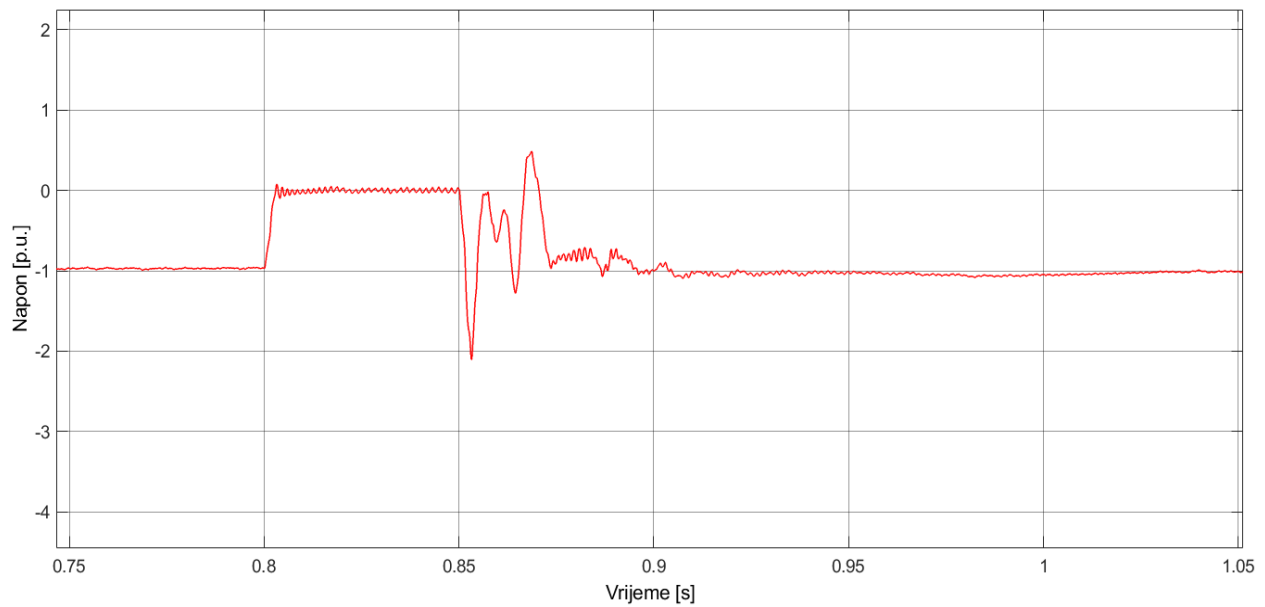
Slika 126. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 1 – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona



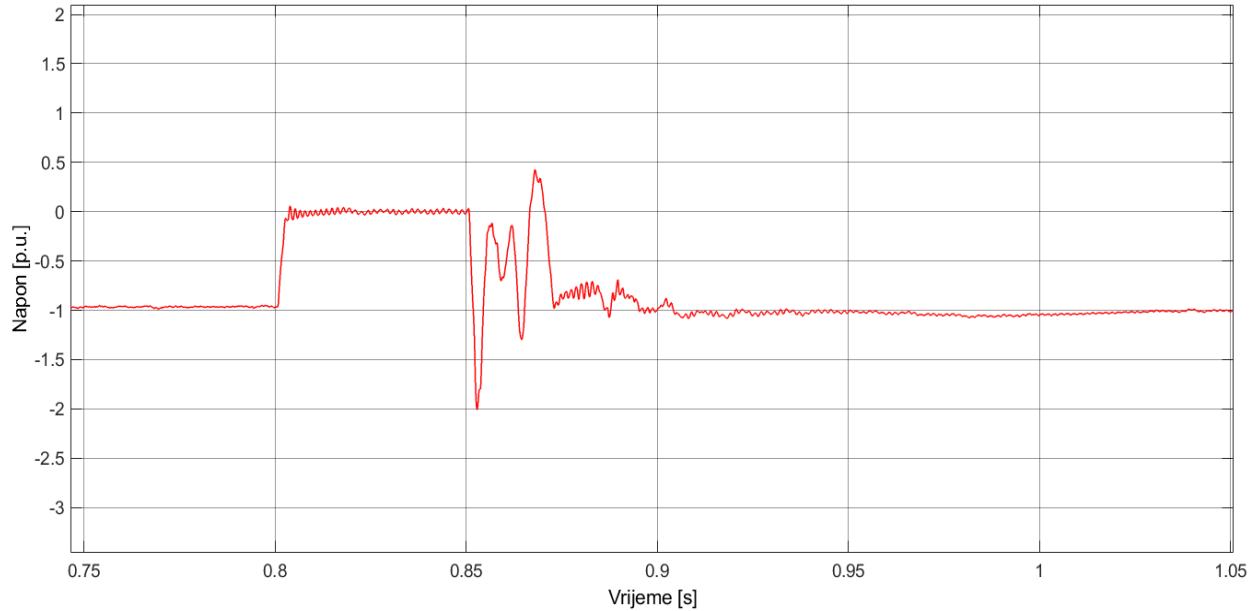
Slika 127. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 2 – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona



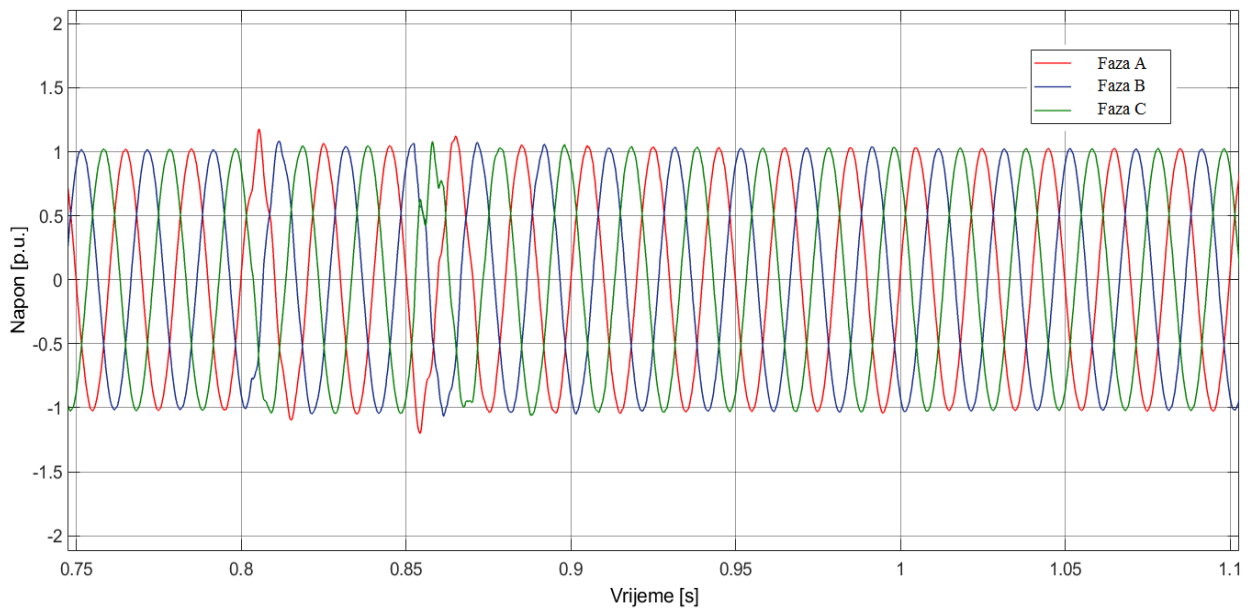
Slika 128. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 3 – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona



Slika 129. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 4 – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona



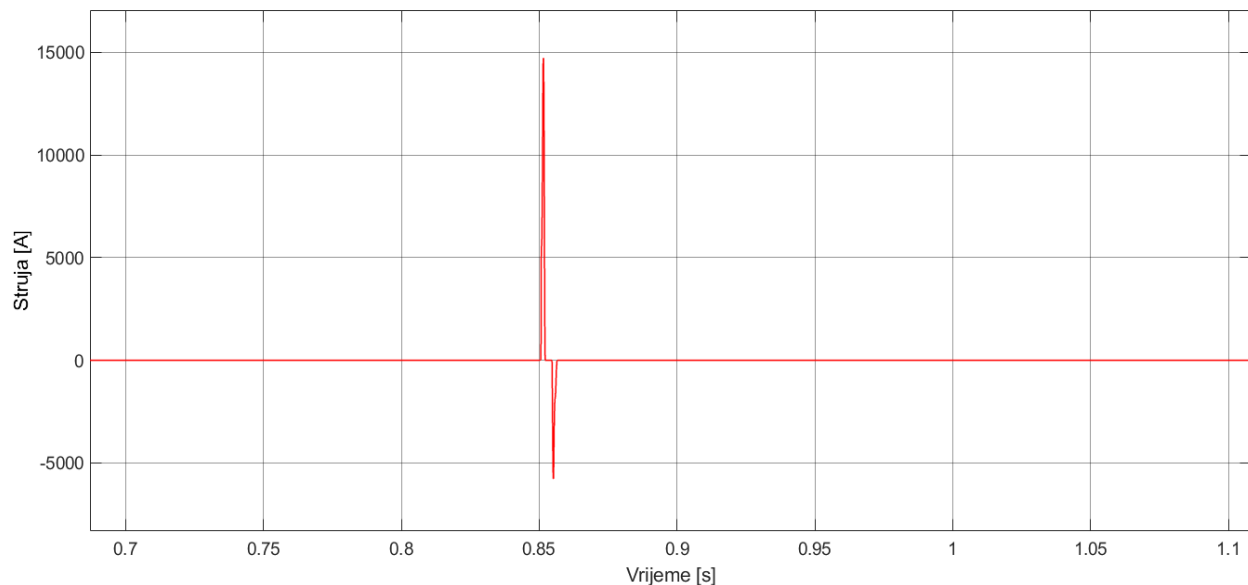
Slika 130. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 5 – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona



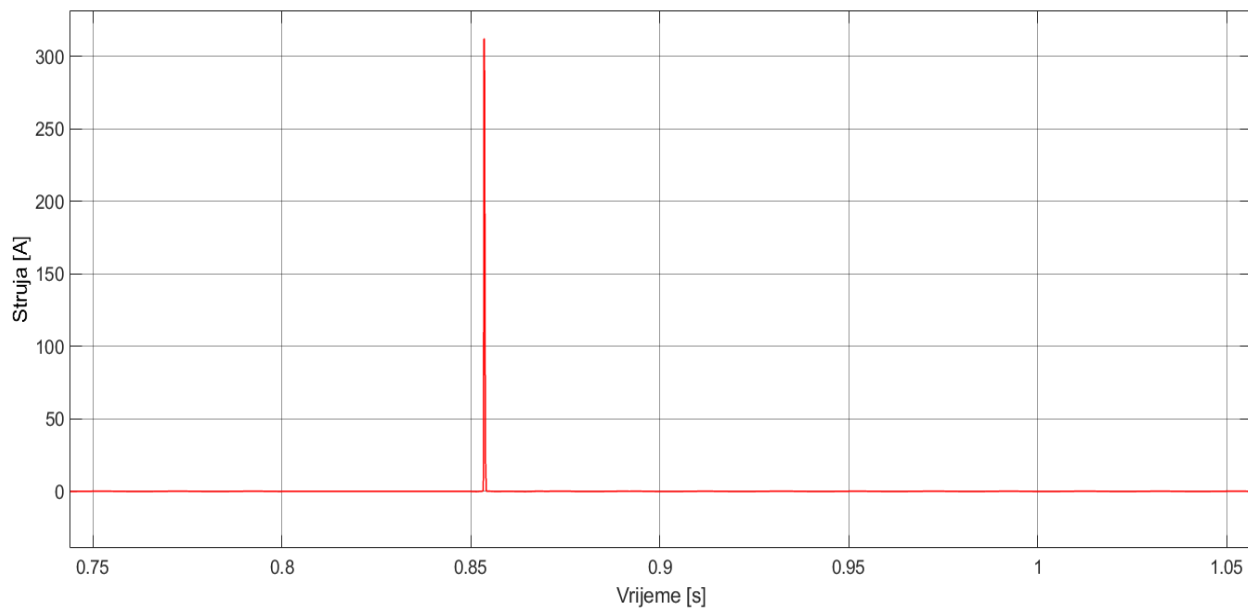
Slika 131. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 6 – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona

Kao što se može vidjeti sa slike 129. nakon instaliranja odvodnika prenapona, napon na mjernom mjestu 4 dostiže maksimalnu vrijednost od 2.107 p.u. Ova vrijednost je niža od granične vrijednosti pri kojoj dolazi do ugrožavanja izolacije od 2.6 p.u. Takođe, na svim ostalim mjernim mjestima naponi ne dostižu granične vrijednosti pri kojima dolazi do ugrožavanja izolacije.

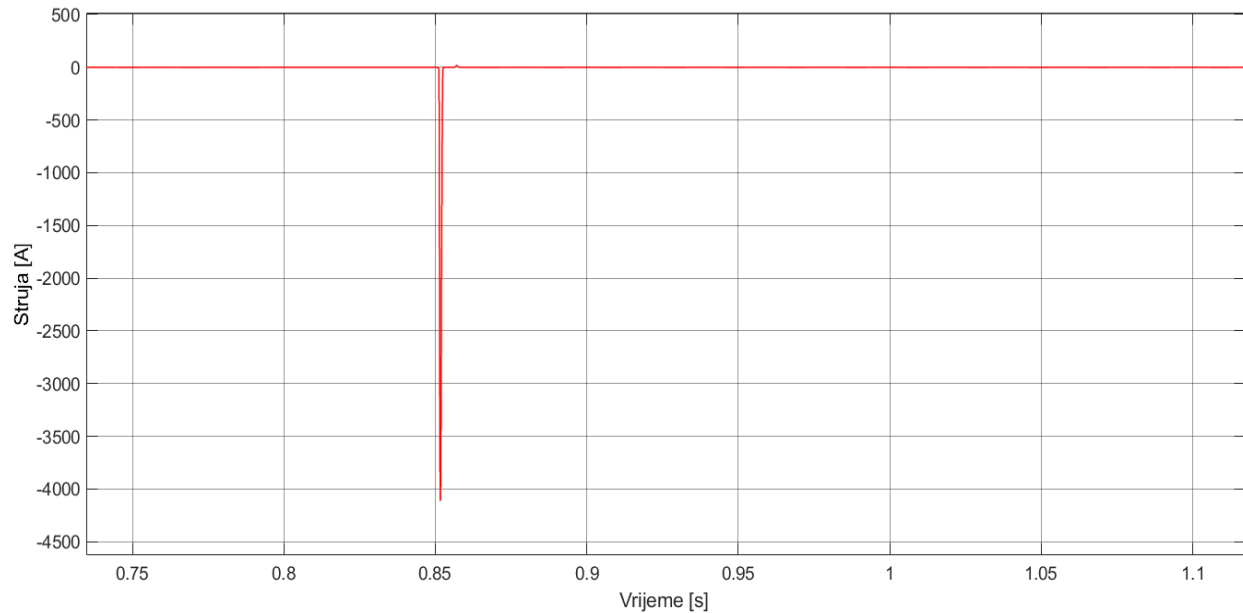
Kako bi se provjerila energetska naprezanja odvodnika prenapona prilikom proticanja struje odvođenja, na slikama 132, 133. i 134. su prikazane vremenske promjene struje kroz odvodnike prenapona.



Slika 132. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza A) – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW)



Slika 133. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza B) – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW)



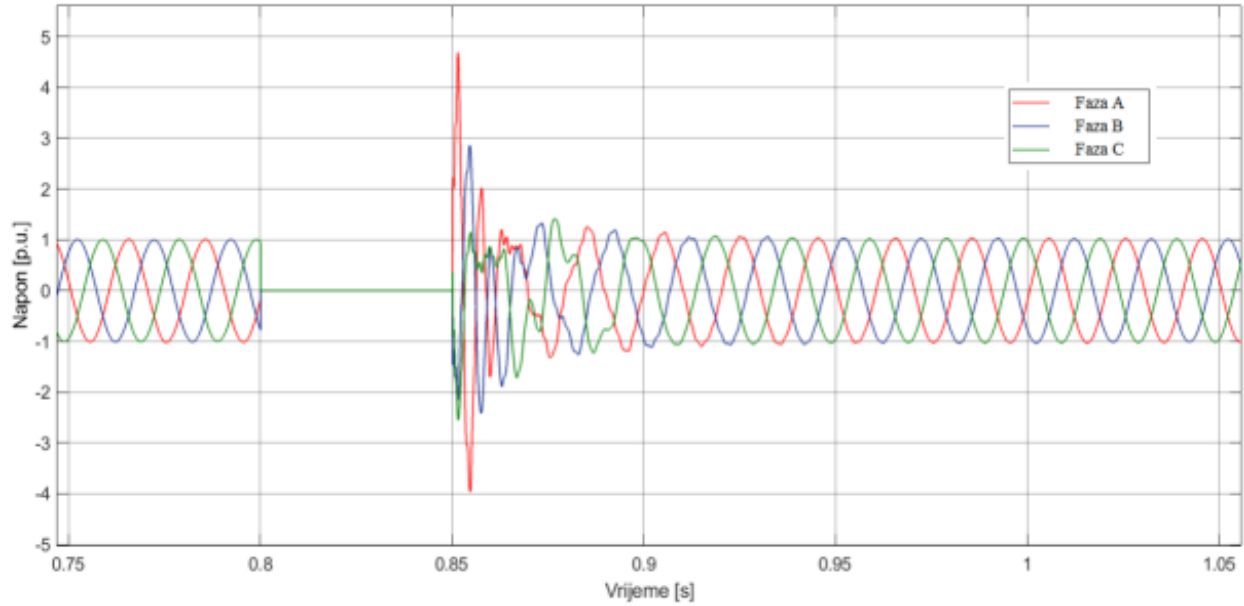
Slika 134. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza C) – bipolarna konfiguracija (200 km i 480 MW)

Sa slika 132, 133. i 134. se vidi da jedino kroz odvodnik prenapona koji je priključen na fazu A u AC sistemu na strani ispravljača protiče struja koja ima veću vrijednost od vrijednosti pri kojoj je izmjeren zaštitni nivo odvodnika prenapona. Prema tome na ovom mjestu se mora postaviti odvodnik prenapona za posebne uslove rada.

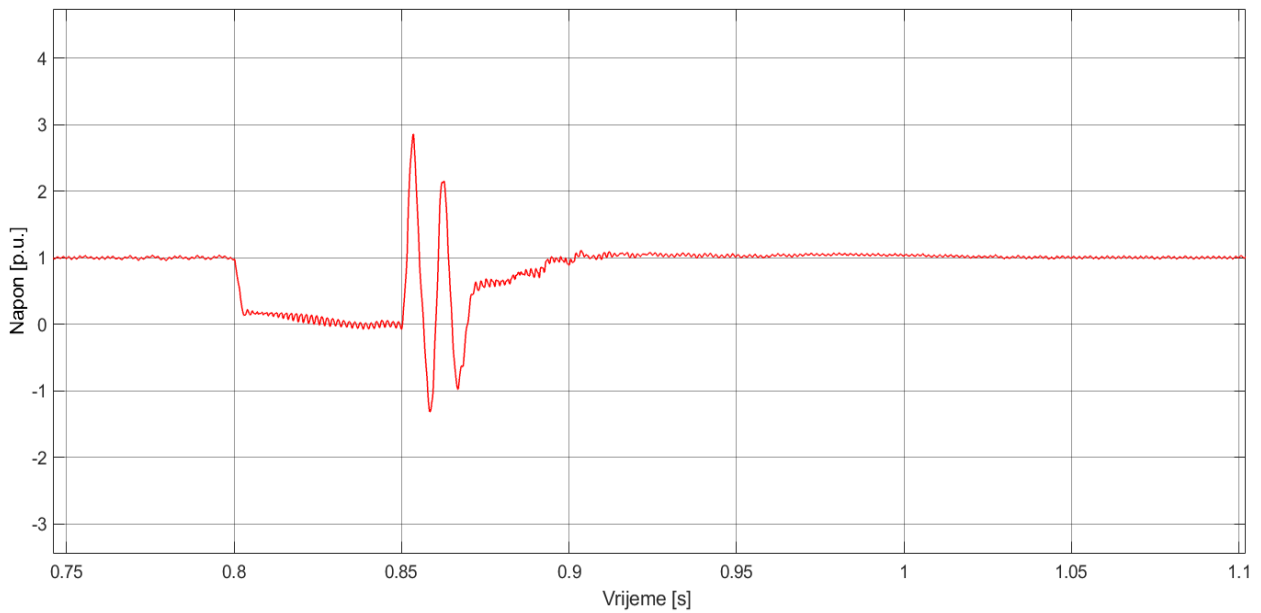
Postavljanjem odvodnika prenapona na mjernom mjestu 1 i vodeći računa o energetskim ograničenjima, može se zaključiti da je izvršena koordinacija izolacije za posmatrani slučaj.

Primjer 4 : Koordinacija izolacije za najkritičniji slučaj po izolaciju na mjernom mjestu 5

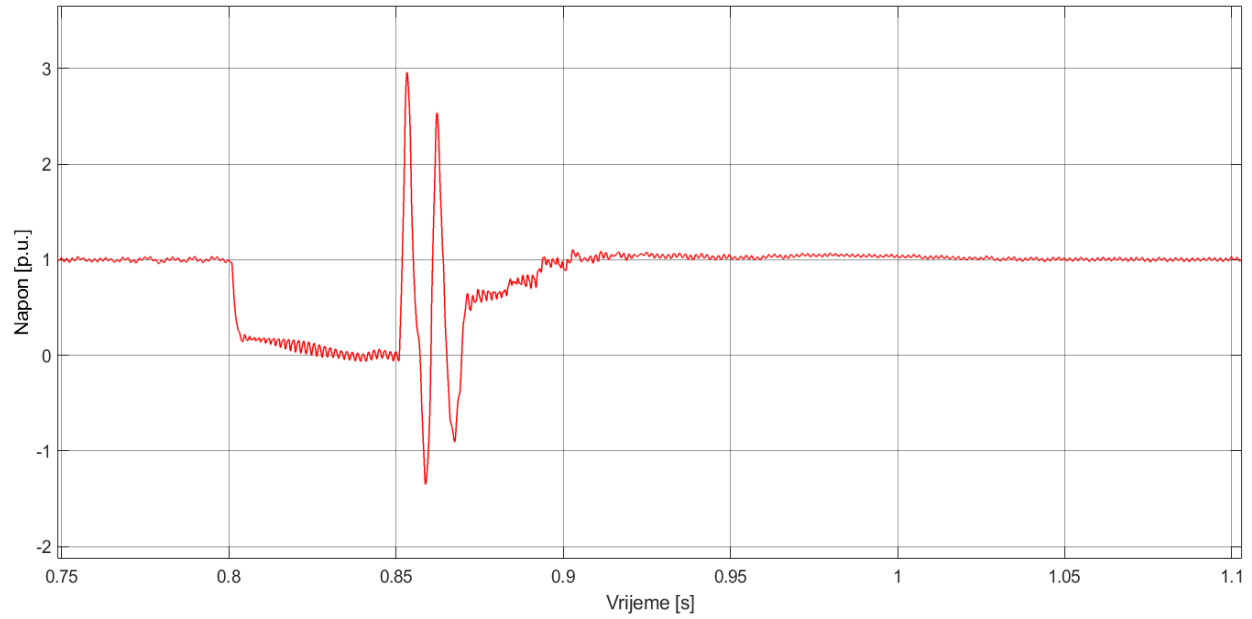
Kombinacija dužine i snage kroz HVDC sistem pri kojoj se ima maksimalna vrijednost prenapona na mjernom mjestu 5 je : 220 km i 420 MW. Pri ovim vrijednostima dužine i snage HVDC sistema na mjernom mjestu 5 prenapon dostiže vrijednost od 3.629 p.u. Vremenske promjene napona na svim mjernim mjestima su prikazane na slikama 135, 136, 137, 138, 139. i 140.



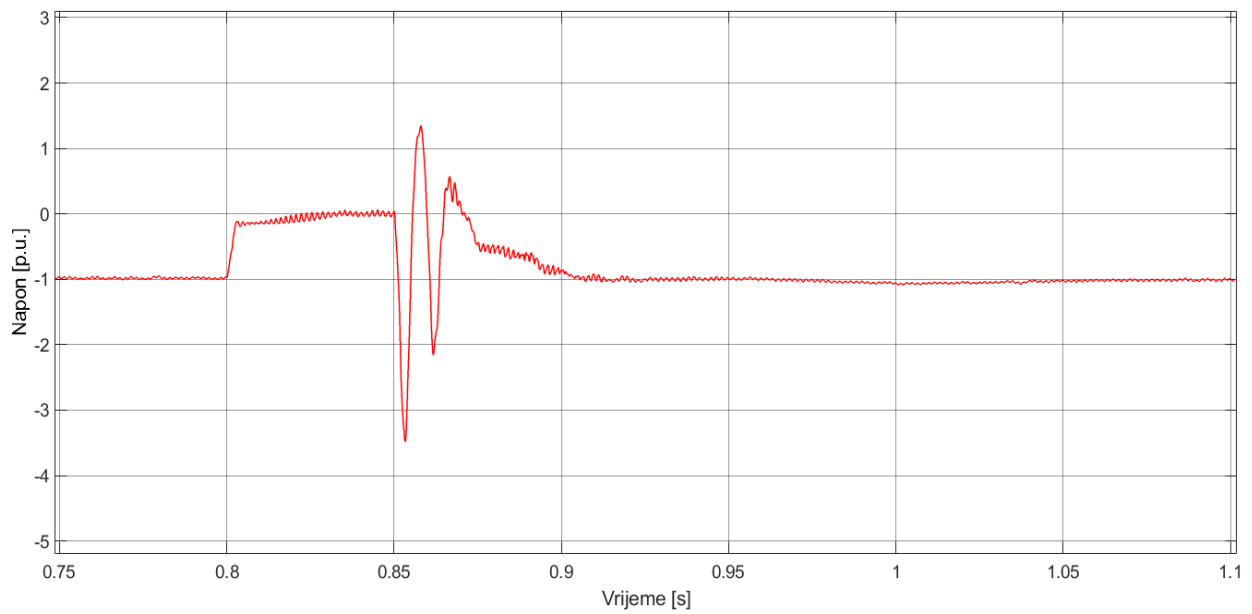
Slika 135. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 1 – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona



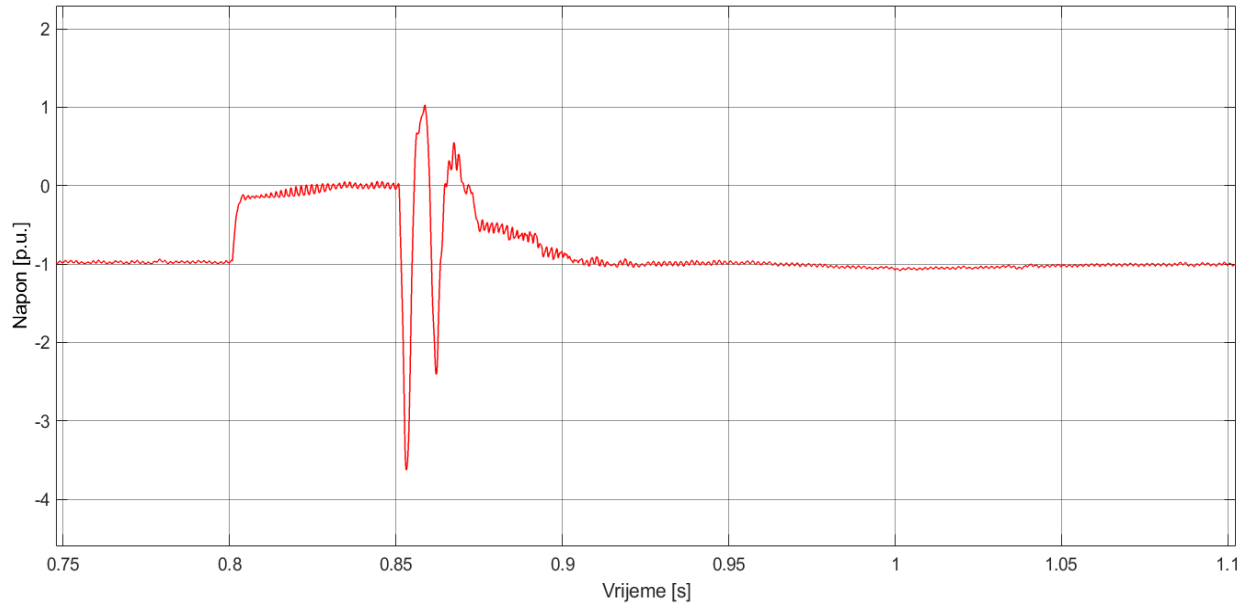
Slika 136. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 2 – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona



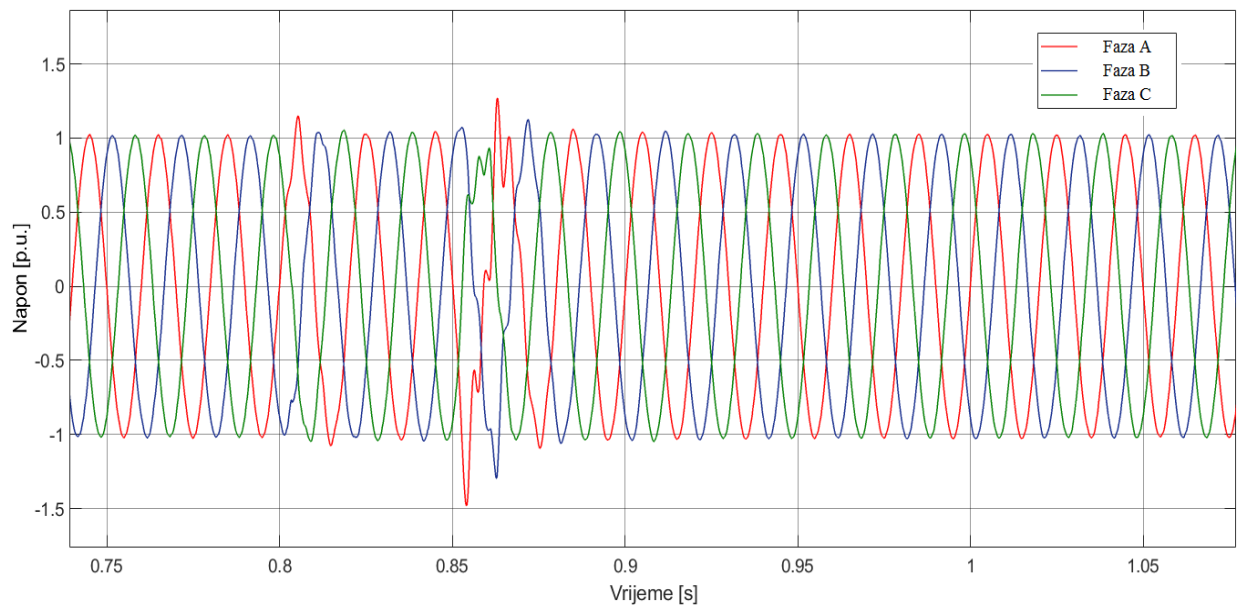
Slika 137. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 3 – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona



Slika 138. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 4 – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona



Slika 139. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 5 – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona

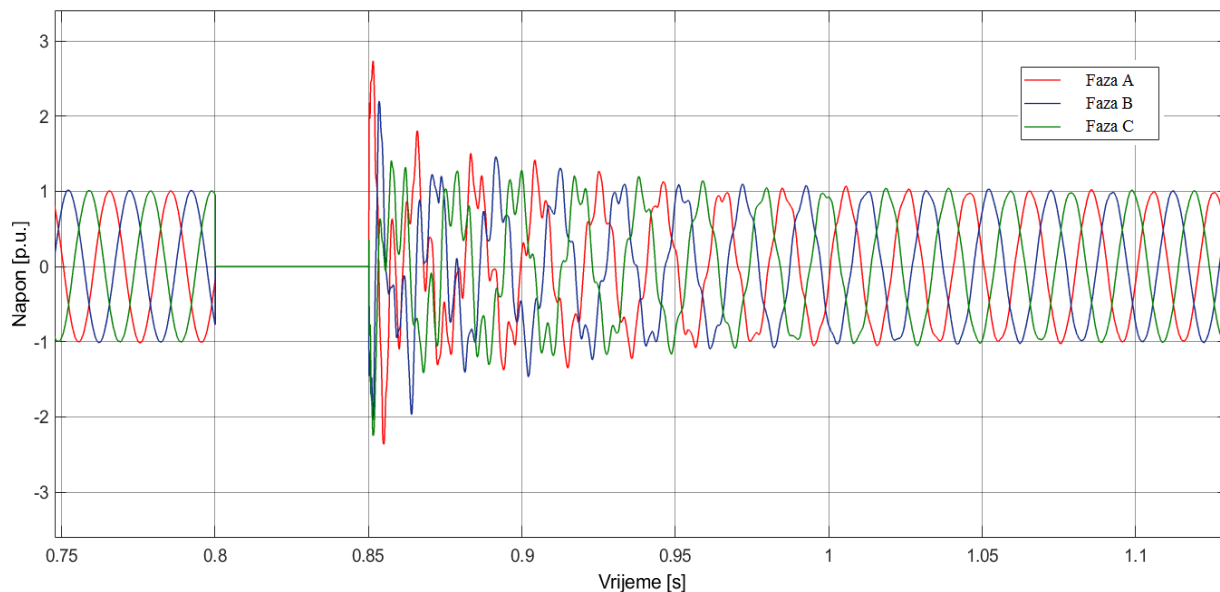


Slika 140. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 6 – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW) prije postavljanja odvodnika prenapona

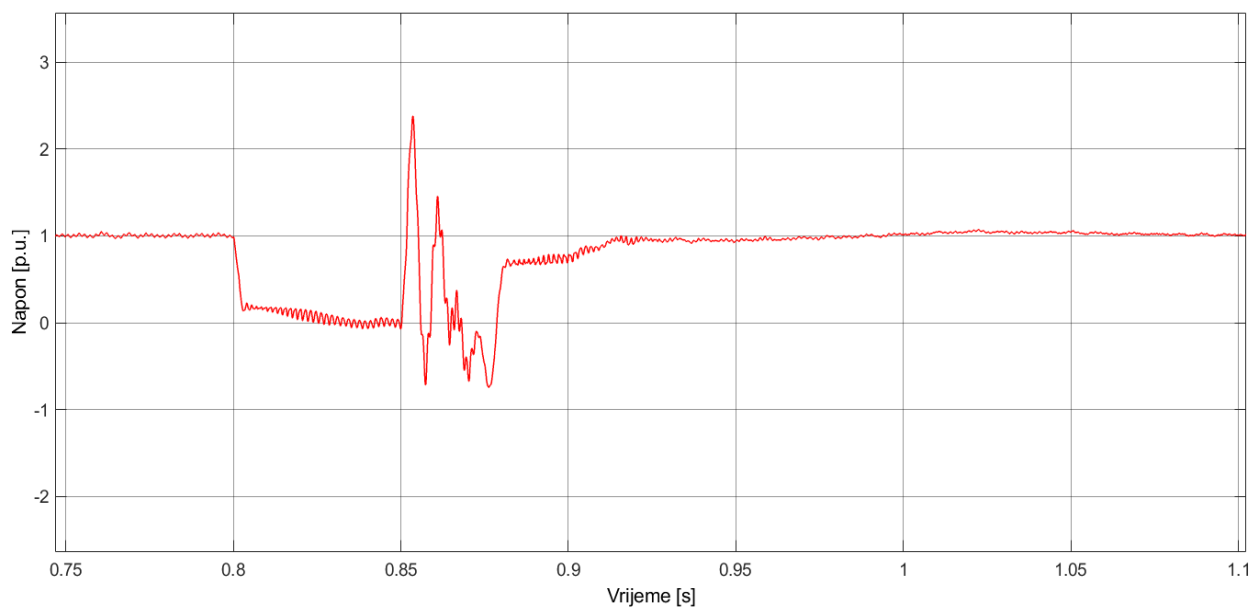
Kao što se može vidjeti na slikama 135, 136, 137, 138. i 139. na mjernim mjestima 1, 2, 3, 4 i 5 dolazi do pojave prenapona koji ugrožavaju izolaciju.

U cilju pronalaženja optimalnog rješenja sa aspekta broja i mjesta ugradnje odvodnika prenapona u sistemu kako bi se izvršila koordinacija izolacije za konkretno razmatrani slučaj, u Simulink-u je izvršen veliki broj simulacija u kojima je vršeno priključivanje odvodnika prenapona na različitim lokacijama u sistemu. Optimalno rješenje za konkretno razmatrani slučaj

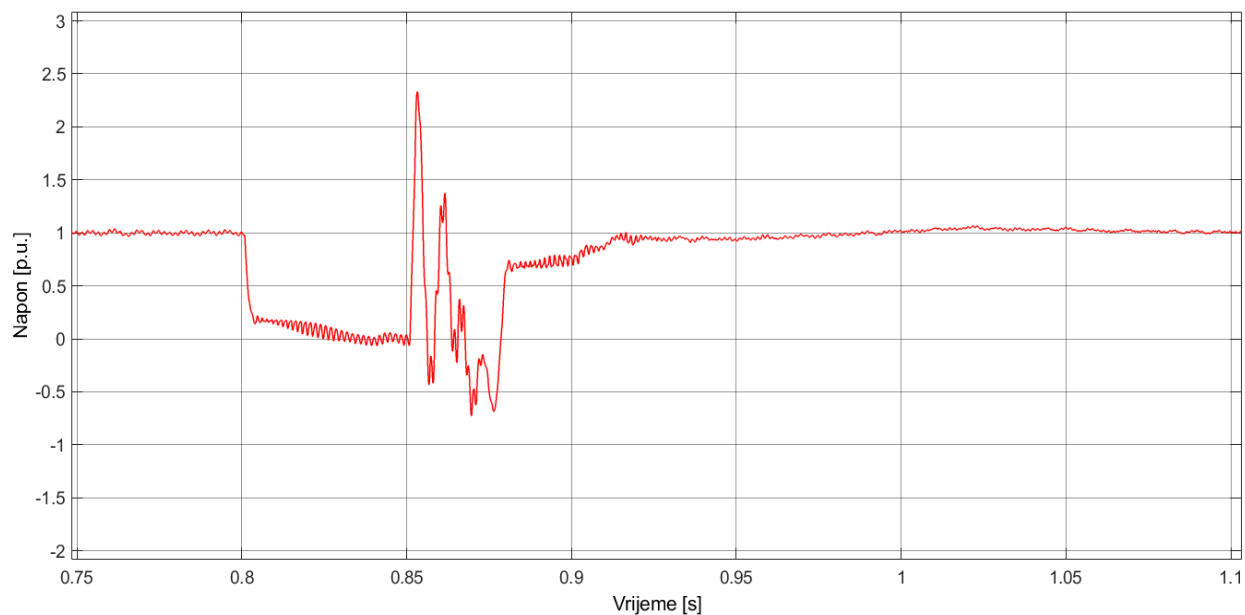
predstavlja instaliranje odvodnika prenapona na mjernom mjestu 1 zaštitnog nivoa 713 kV i odvodnika prenapona na mjernom mjestu 4 zaštitnog nivoa 872 kV. Vremenske promjene napona na svim mjernim mjestima nakon instaliranja odvodnika prenapona su prikazane na slikama 141, 142, 143, 144, 145. i 146.



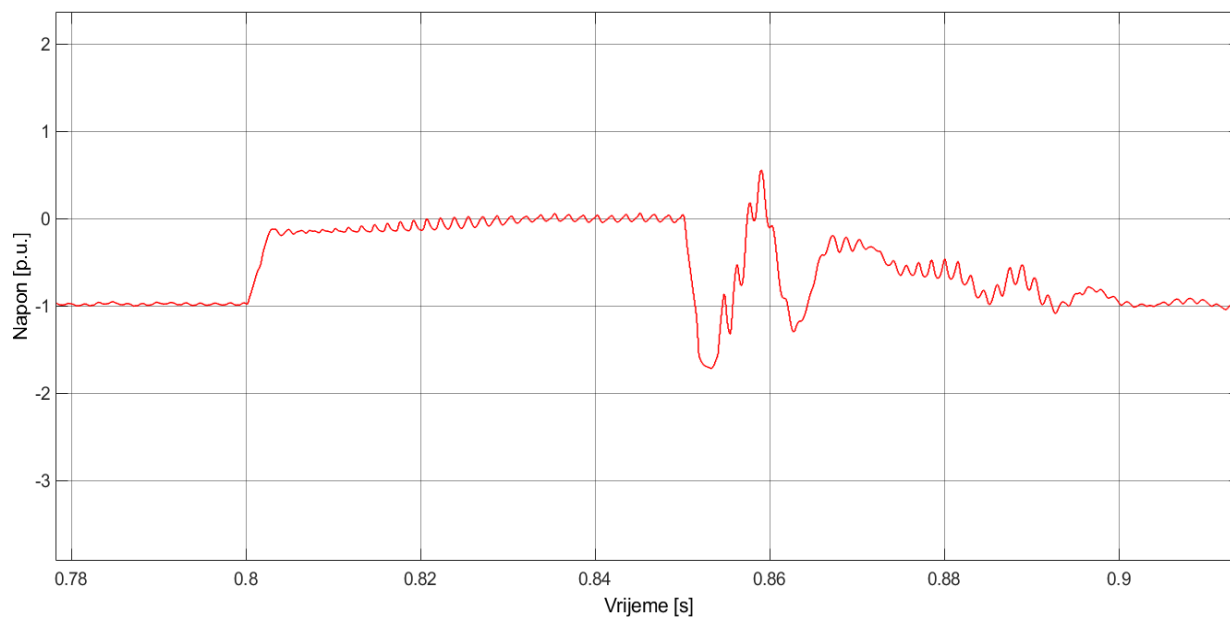
Slika 141. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 1 – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona



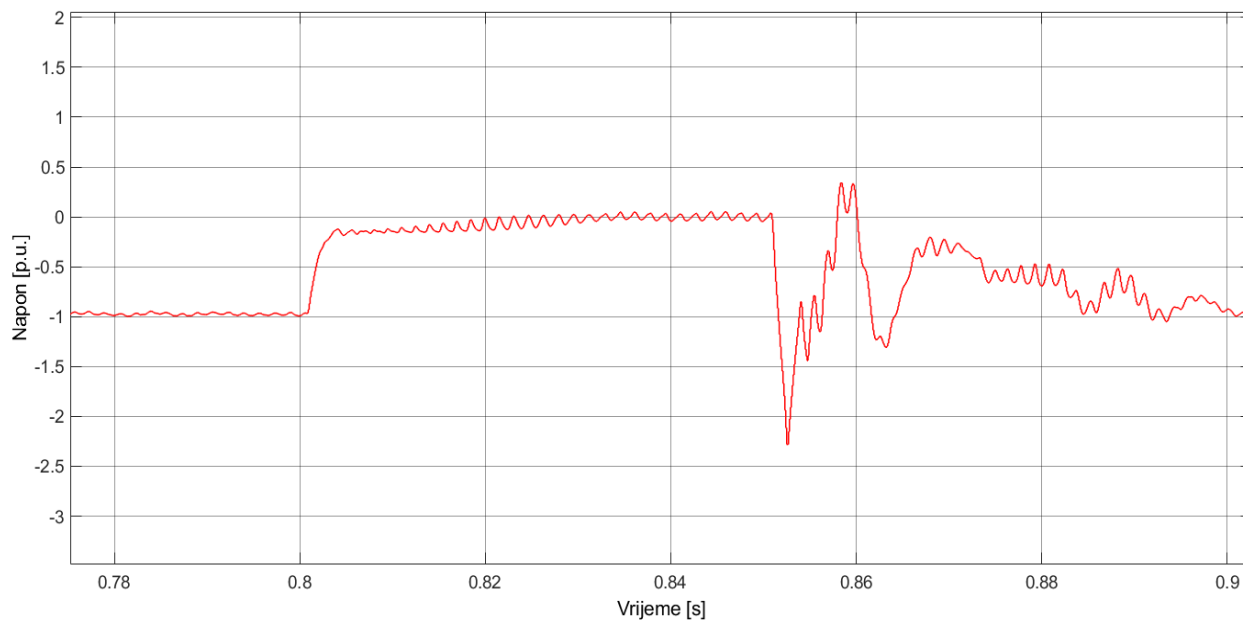
Slika 142. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 2 – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona



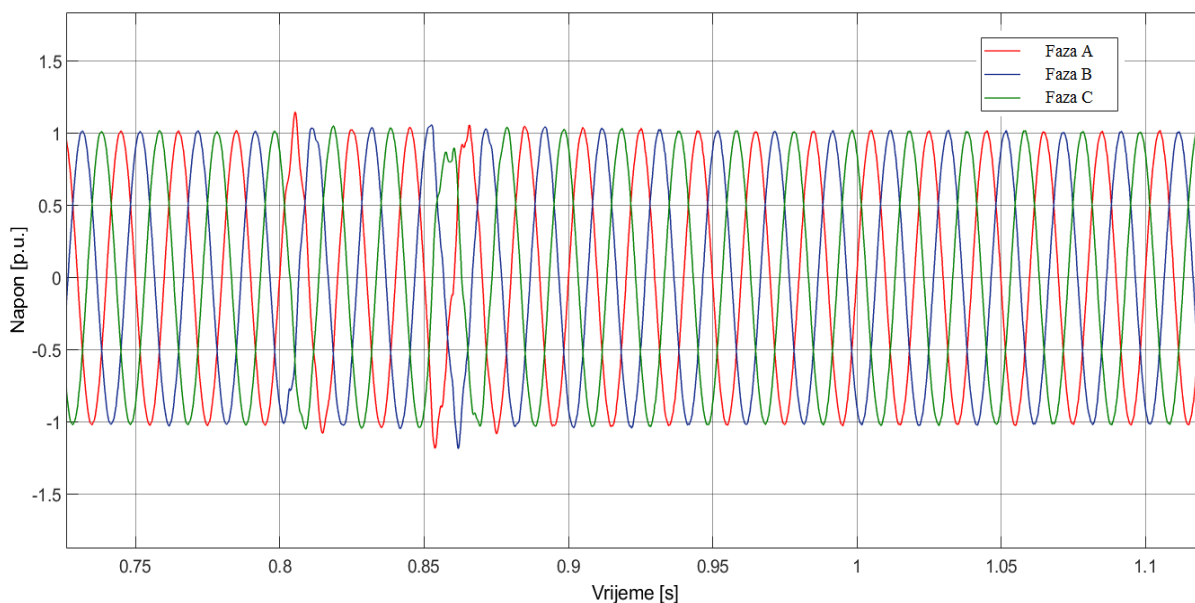
Slika 143. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 3 – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona



Slika 144. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 4 – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona



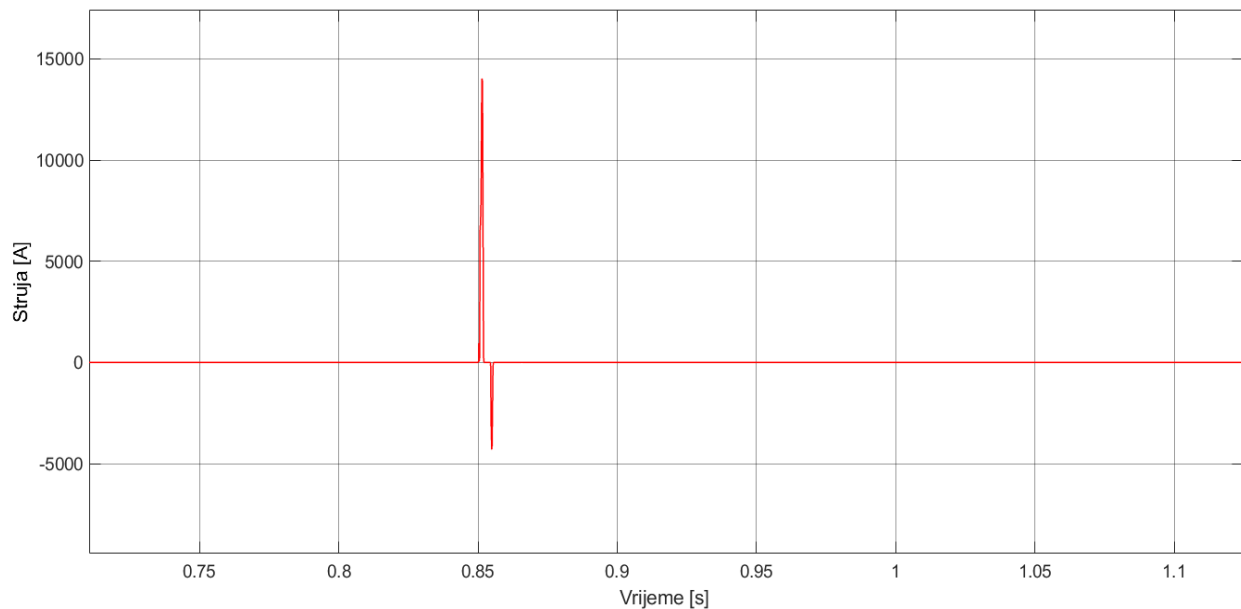
Slika 145. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 5 – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona



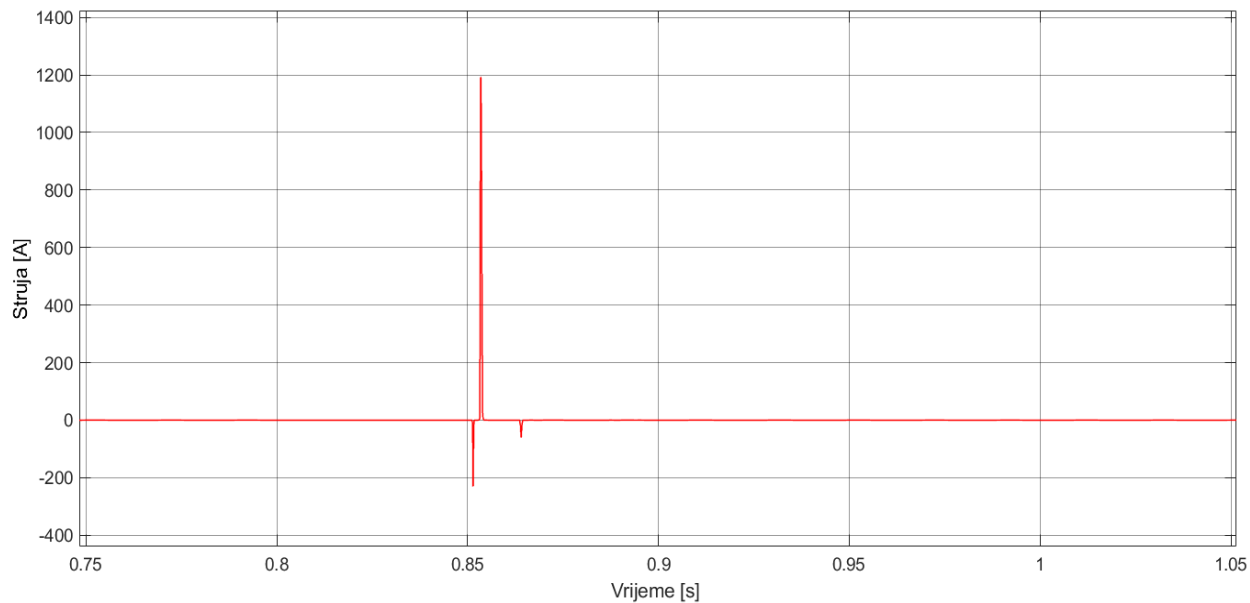
Slika 146. Talasni oblik napona na mjernom mjestu 6 – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW) nakon postavljanja odvodnika prenapona

Kao što se može vidjeti sa slike 145. nakon instaliranja odvodnika prenapona, napon na mjernom mjestu 5 dostiže maksimalnu vrijednost od 2.281 p.u. Ova vrijednost je niža od granične vrijednosti pri kojoj dolazi do ugrožavanja izolacije od 2.6 p.u. Takođe, na svim ostalim mjernim mjestima naponi ne dostižu granične vrijednosti pri kojima dolazi do ugrožavanja izolacije.

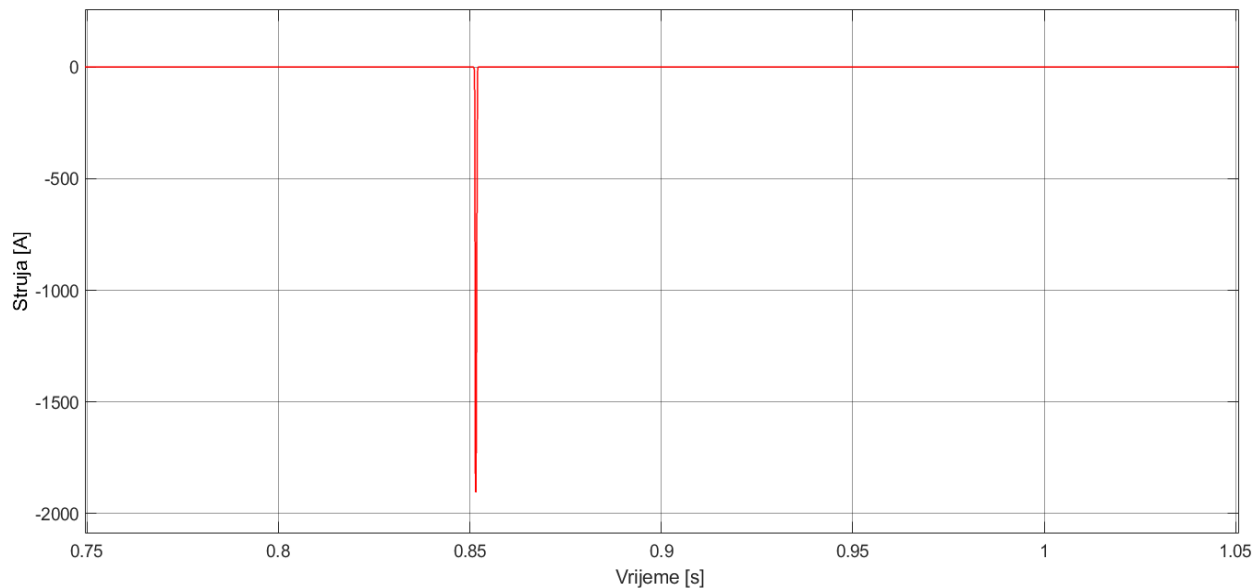
Kako bi se provjerila energetska napreznja odvodnika prenapona prilikom proticanja struje odvođenja, na slikama 147, 148, 149. i 150. su prikazane vremenske promjene struje kroz odvodnike prenapona.



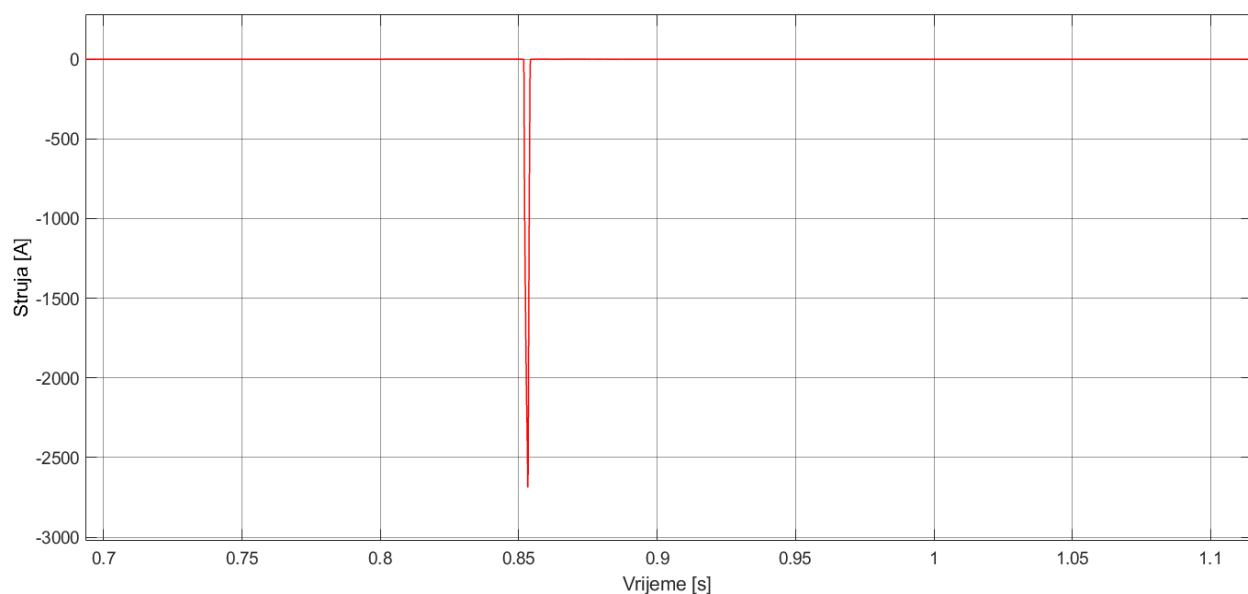
Slika 147. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza A) – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW)



Slika 148. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza B) – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW)



Slika 149. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 1 (faza C) – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW)



Slika 150. Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona priključen na mjernom mjestu 4 – bipolarna konfiguracija (220 km i 420 MW)

Sa slika 147, 148, 149. i 150. se vidi da jedino kroz odvodnik prenapona koji je priključen na fazu A u AC sistemu na strani ispravljača protiče struja koja ima veću vrijednost od vrijednosti pri kojoj je izmjeren zaštitni nivo odvodnika prenapona. Prema tome na ovom mjestu se mora postaviti odvodnik prenapona za posebne uslove rada.

Postavljanjem odvodnika prenapona na mjernim mjestima 1 i 4, kao i vodeći računa o energetskim ograničenjima, može se zaključiti da je izvršena koordinacija izolacije za posmatrani slučaj.

7. Zaključna razmatranja

Kao posljedica konstantnog porasta potreba za električnom energijom javljaju se potrebe za prenosom velikih vrijednosti snaga i to najčešće na velikim udaljenostima. Osnovni cilj kojem se teži prilikom prenosa ovako velikih vrijednosti snaga je da se prenos izvrši na pouzdan i najekonomičniji mogući način. Zbog mnogih tehničkih prednosti u posljednje vrijeme se za prenos velikih vrijednosti snaga na velike udaljenosti sve češće koriste sistemi prenosa električne energije pri jednosmjernom naponu.

Kako u čitavom elektroenergetskom sistemu tako i kod HVDC sistema pojava prenapona predstavlja opasnost po ispravno funkcionisanje izolacije opreme. Kako bi se zaštitila izolacija opreme od štetnog djelovanja prenapona primjenjuju se različite mjere i upotrebljavaju se različiti uređaji. Najčešće se u cilju zaštite od prenapona upotrebljavaju odvodnici prenapona koji se priključuju paralelno šticeenom elementu. Kako bi se izvršila koordinacija izolacije neophodno je razmatrati različite poremećaje u sistemu koji dovode do pojave prenapona i mjeriti napone na mjestima na kojima se planira instaliranje izolacije. U samom HVDC sistemu je moguća pojava izuzetno velikog broja slučajeva koji dovode do pojave prenapona. Međutim, prilikom planiranja šticeenja instalirane izolacije treba voditi računa i o vjerovatnoći pojave određenih poremećaja. Prema tome, pokazuje se da je ekonomski neopravdano primijeniti takvu zaštitu koja bi štitila izolaciju od svakog mogućeg poremećaja u sistemu.

U ovom radu je obrađen problem koordinacije izolacije kod HVDC sistema. Na samom početku rada opisani su sastavni djelovi HVDC sistema, osnovni principi rada HVDC sistema kao i konfiguracije HVDC sistema koje se najčešće nalaze u praksi. U daljem radu je detaljno opisana podjela prenapona u elektroenergetskim sistemima i konkretno u HVDC sistemima i to sa aspekta uzroka nastanka. U nastavku rada je detaljno opisan princip rada odvodnika prenapona, njihove najvažnije karakteristike kao i metodologija za pravilan odabir odvodnika prenapona. U ovom radu sve analize prenapona i prenaponske zaštite HVDC sistema su izvršene u programskom alatu Simulink-u pa su u posebnom poglavlju objašnjeni modelovanje HVDC sistema u Simulink-u i mogućnosti analize prenapona i prenaponske zaštite u Simulink-u.

Kao što je prethodno rečeno, ne postoji utemeljen razlog za šticeenjem izolacije opreme od svih mogućih poremećaja u sistemu. Iz toga razloga, u ovom radu su analizirani samo određeni poremećaji. Simuliranjem ovih poremećaja u Simulink-u i mjerenjem napona na tačno određenim mjestima dobijene su maksimalne vrijednosti napona na mjernim mjestima u zavisnosti od dužine i snage HVDC sistema. Od svih analiziranih poremećaja utvrđeno je da kod obje konfiguracije HVDC sistema jedino u slučaju prolaznog trofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani ispravljača dolazi do pojave prenapona koji ugrožavaju instaliranu izolaciju. Uprvo iz toga razloga, u daljem radu je izvršena koordinacija izolacije za najkritičnije slučajeve dobijene iz prethodne analize. Koordinacija izolacije je vršena na način da se optimizuje broj i mjesto ugradnje odvodnika prenapona u HVDC sistemu. Kroz primjere je pokazano da za potrebe šticeenja izolacije na mjernim mjestima u slučaju prolaznog trofaznog kratkog spoja u AC sistemu na strani ispravljača nije potrebno instalirati odvodnike prenapona na svim mjernim mjestima već samo na određenim. Pri tome, kako je pokazano, u određenim slučajevima je potrebno voditi računa o neophodnosti ugradnje odvodnika prenapona za posebne uslove rada.

Kao opšti zaključak iz razmatranih primjera može se reći da je koordinaciju izolacije neophodno vršiti u zavisnosti od konkretno postojećih parametara, dužine i snage, razmatranog HVDC sistema. Takođe, praktična primjena rezultata dobijenih u ovom radu se ogleda i u smanjenju troškova za odvodnike prenapona koje je neophodno instalirati kako bi se u slučaju određenih poremećaja zaštitila instalirana izolacija.

8. Literatura

- [1] Radenko Ostojić, “ Visokonaponski jednosmjerni prenos“, INFOTEH Jahorina, Vol. 8, pp. 889-893, Mar. 2009.
- [2] Radojle Radetić, “Tiristorski pretvarači”, IP “Nauka” Beograd, Bor, 2004.
- [3] H. Yakupoglu, H. Gozde, M.C. Taplamacioglu, “Technical and economic comparison of HVDC converter technologies”, International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE), Vol. 10, No. 4, pp. 25-30, Dec 2018.
- [4] ENTSO-e, “HVDC Links in System Operations”, Technical paper, Dec. 2019.
- [5] D. Marijanović, “Tehno-ekonomska analiza HVDC sustava“, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2017.
- [6] “229_HVDC_NOTE“, verzija dostupna na https://www.cet.edu.in/noticefiles/229_HVDC_NOTE.pdf, datum pristupa: 18./04/2023 godine.
- [7] H. Ø. Røstøen, Igor Borisov, “High voltage direct current transmission“, Institute of Technology, University of Minnesota, Minneapolis, 2002.
- [8] M. Sanjo, M. Jeffin, J. Sajan, A. Deepak, “Power electronic on-load tap changer for HVDC converter transformer”, Int. J. Innov. Res. Elect., Electron., Instrum. Control Eng., Vol. 7, No. 4, pp. 50–58, Apr. 2019.
- [9] Xinwei Li, Chongru Liu, YuanYuan Lou, “Start-up and recovery method with LCC–HVDC systems participation during AC/DCsystem black-starts”, The Institution of Engineering and Technology (IET), Vol. 14, pp. 362-367, Dec 2019.
- [10] M.V. Czernorucki, M.B.C. Salles, E.C.M. Costa, A.S. Melo, L. Piegari, “ Comprehensive overview on HVDC converter transformer design: additional discussions to the IEC/IEEE 60076-57-129 Standard“, IEEE Access, Vol. 10, pp. 40165-40180, Apr. 2022.
- [11] B. S. Ram, J. A. C. Forrest, G. W. Swift, “Effects of harmonics on converter transformer load losses”, IEEE Trans. Power Del., Vol. PWRD-3, No. 3, pp. 1059–1066, Jul. 1988.
- [12] “Load Loss in HVDC Converter Transformers”, Electra, CIGRE, Paris, France, 1997, pp. 53–57.
- [13] “High voltage direct current transmission-proven technology for power exchange“, verzija dostupna na

https://www.brown.edu/Departments/Engineering/Courses/ENGN1931F/HVDC_Proven_TechnologySiemens.pdf, datum pristupa: 19./04/2023 godine.

[14] H.S.M. Ramadan, “ Non-linear control and stabilization of VSC-HVDC transmission systems”, Universit´e Paris Sud - Paris XI, 2012.

[15] P. Schavemaker, Lou van der Sluis, “Electrical power system essentials”, John Wiley & Sons Ltd, Apr. 2008.

[16] Milan Savić, Zlatan Stojković, “Tehnika visokog napona“, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2001.

[17] Vladan Radulović, “Tehnika visokog napona – predavanja“, Podgorica, 2020.

[18] Ljubiša Milanković, “Tehnika visokog napona“, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 1981.

[19] Chandima Gomes, “On the selection and installation of surge protection devices in a TT wiring system for equipment and human safety“, Safety Science, pp. 861-870, 2011.

[20] CIGRE Working Group 33/14.05, “Guidelines for the application of metal oxide arresters without gaps for HVDC converter stations“, 2005.

[21] Vladan Radulović, "Visokonaponska razvodna postrojenja - predavanja", Podgorica, 2019.

[22] „SimPowerSystems User’s Guide, For Use with Simulink, Hydro-Quebec“, verzija dostupna na <http://www.ifba.edu.br/PROFESSORES/castro/powersys.pdf>, datum pristupa: 28./04/2023 godine.

[23] Lidong Zhang, Lars Dofnas, “A Novel Method to Mitigate Commutation Failures in HVDC Systems”, *Proceedings PowerCon 2002. International Conference on*, Vol. 1, pp. 51–56, Oct. 2002.