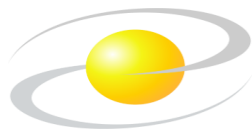


UNIVERZITET CRNE GORE  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET U PODGORICI



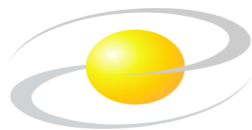
MARIJA ĆINĆUR

**NAPREDNO UPRAVLJANJE  
VISOKONAPONSKIM PREKIDAČIMA  
SA CILJEM OGRANIČENJA  
SKLOPNIH PRENAPONA**

- MASTER RAD -

Podgorica, 2021

UNIVERZITET CRNE GORE  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET U PODGORICI



MARIJA ĆINČUR

**NAPREDNO UPRAVLJANJE  
VISOKONAPONSKIM PREKIDAČIMA  
SA CILJEM OGRANIČENJA  
SKLOPNIH PRENAPONA**

- MASTER RAD -

Podgorica, 2021

## PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANDU

Ime i prezime: **Marija Ćinćur**

Datum i mjesto rođenja: 12.09.1992.g. , Bijelo Polje, Crna Gora

Prethodno završene studije:

Osnovne studije: Elektrotehnički fakultet Podgorica, Univerzitet Crne Gore,

smjer: Energetika i automatika, 180 ECTS kredita, 2015.

Specijalističke studije: Elektrotehnički fakultet Podgorica, Univerzitet Crne Gore,

smjer: Elektroenergetski sistemi, 60 ECTS kredita, 2016.

## INFORMACIJE O MASTER RADU

Elektrotehnički fakultet, Podgorica

Studijski program: Energetika i automatika – Elektroenergetski sistemi

Naslov rada: **Napredno upravljanje visokonaponskim prekidačima sa ciljem ograničenja sklopnih prenapona**

## UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave master rada: 26.02.2020. godine

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: 19.06.2020. godine

Komisija za ocjenu teme i podobnosti magistranda:

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

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

Datum odbrane:

Datum promocije:

## **PREDGOVOR**

U magistarskom radu, koji je pred Vama, nastojala sam da dokažem da se nivo sklopnih prenapona, uzrokovanih uključenjem dalekovoda, može ograničiti tehnikom kontrolisanih operacija prekidača. Primjena prethodno pomenute tehnike je omogućena zahvaljujući tehnološkom napretku u razvoju visokonaponskih prekidača. Naime, u okviru rada je razvijen optimalni algoritam koji na osnovu stanja u dijelu sistema, tj. naponskih i strujnih prilika u vremenu neposredno prije sklopne operacije i drugih analiziranih uticajnih parametara, definiše optimalne parametre za napredno upravljanje prekidačem u visokonaponskim razvodnim postrojenjima, tj. određuje optimalni vremenski trenutak uključenja prekidača, kako bi generisani sklopni prenaponi, uzrokovani uključenjem dalekovoda, imali minimalnu amplitudu. Takođe, sprovedeno je istraživanje u okviru kojeg je testirana funkcionalost razvijenog optimalnog algoritma, kako na primjeru jednostavnog elektroenergetskog sistema, tako i na primjeru dijela realnog elektroenergetskog sistema i izvedeni određeni zaključci koji ukazuju da je primjena tehnike kontrolisanih operacija prekidača i više nego poželjna u svim savremenim elektroenergetskim sistemima.

Svom mentoru, prof. dr Vladanu Raduloviću se zahvaljujem na predloženoj temi ovog magistarskog rada, koja je za mene bila veoma interesantna i inspirativna. Posebno mu se zahvaljujem na izdvojenom vremenu, svesrdnoj pomoći, savjetima i razumjevanju koje mi je pružio tokom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se takođe svim svojim prijateljima i kolegama na nesebično pruženoj pomoći i podršci. Posebno se zahvaljujem svojoj porodici na iskrenoj i neizmjerljivoj podršci, ljubavi i razumjevanju.

## IZVOD RADA

Prenaponi su jedan od glavnih uzroka pojave kvarova u elektroenergetskom sistemu. Zbog pojačanja električnog polja pri pojavi prenapona dolazi do dielektričnog naprezanja izolacije mreže i opreme u elektroenergetskom sistemu. Ukoliko intenzitet ovog naprezanja pređe podnosive vrijednosti izdržljivosti izolacije, dolazi do pojave proboja ili preskoka izolacije, što posljedično dovodi do kvarova. Time se narušava pouzdanost napajanja potrošača, pa je analiza uzroka, karakteristika i posljedica prenaponskih stanja u elektroenergetskom sistemu od izuzetne važnosti kako bi se izvršio pravilan izbor opreme i primjenile odgovarajuće zaštitne mjere. U navedenom procesu posebnu pažnju treba posvetiti sklopnim prenaponima uzrokovanim operacijama prekidača u visokonaponskim razvodnim postrojenjima u elektroenergetskom sistemu.

Dosadašnja istraživanja pokazuju da se nivo sklopnih prenapona može ograničiti tehnikom kontrolisanih operacija prekidača, koja je omogućena zahvaljujući tehnološkom napretku u razvoju visokonaponskih prekidača. Predmet istraživanja ovog rada su napredne tehnike za upravljanje visokonaponskim prekidačima sa ciljem ograničenja sklopnih prenapona. Cilj istraživanja je određivanje optimalnog algoritma koji bi na osnovu stanja u dijelu sistema u vremenu neposredno prije sklopne operacije prekidačem odredio optimalni trenutak operacije uključanja prekidača, kako bi generisani prenaponi imali najmanju amplitudu.

Proračun sklopnih prenapona se bazira na rješavanju parcijalnih diferencijalnih jednačina u vremenu. U dosadašnjim istraživanjima korišćene su determinističke metode na simulacionim modelima. U predviđenim istraživanjima u okviru ovog magistarskog rada primjenjivaće se analiza osjetljivosti, kojom će biti definisani parametri sistema i početnih uslova koji dominantno utiču na vrijednost karakteristika sklopnih prenapona u različitim slučajevima. Sve sprovedene analize baziraju se na numeričkim proračunima i simulacijama razvijenim u programskom paketu Matlab-u (moduo Simulink).

Simulacije su pokazale da dominantan uticaj na vrijednost amplitude sklopnih prenapona, uzrokovanih uključanjem dalekovoda, imaju vremenski trenutak uključanja prekidača i vrijeme trajanja beznaponske pauze. U slučaju kontrolisanog uključanja dalekovoda postižu se sklopni prenaponi značajno manjih vrijednosti amplituda, u poređenju sa nekontrolisanim uključanjem. Dalje, poređenjem rezultata kontrolisanog uključanja dalekovoda nakon duge i kratke beznaponske pauze zaključeno je da se u slučaju kratke beznaponske pauze dobijaju sklopni prenaponi značajno većih vrijednosti amplituda. Takođe, zaključeno je da se sa povećanjem dužine dalekovoda, kao jednog od parametara sistema, pri istim optimalnim vremenskim trenucima uključanja prekidača, povećava i vrijednost amplitude sklopnih prenapona.

U cilju provjere performansi razvijenog algoritma i kontrolera za napredno upravljanje prekidačima, sprovedeno je istraživanja i simulacija implementacije razvijenog optimalnog algoritma na primjeru dijela realnog elektroenergetskog sistema, tačnije izvršena je simulacija uključanja dalekovoda 110kV u TS 400/110kV „Podgorica 2“ koja pripada crnogorskom elektroprenosnom sistemu, i dobijeni su uspješni rezultati. Pokazano je da se sa porastom vrijednosti opterećenja 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“

smanjuje vrijednost amplitude sklopnih prenapona na kraju 110kV DV Podgorica 2 – Budva. Zaključeno je da vrijednost amplitude sklopnih prenapona raste što vremenski trenuci u kojem dolazi do pojave efekta rasipanje polova prekidača više prednjače odgovarajućim optimalnim vremenskim trenucima uključenja prekidača, a takođe i sa porastom vrijednosti vremenskog kašnjenja referentnih naponskih signala, usled tehničkih razloga.

Praktična primjena dobijenih rezultata se ogleda u smanjenju troškova koji se odnose na dimenzionisanje izolacije mreže i opreme, kao i primjene zaštitnih uređaja, s obzirom da je sprovedenim istraživanjima dokazano da se sklopni prenaponi mogu ograničiti razvijenim tehnikama upravljanja prekidačem.

**Ključne riječi:** sklopni prenaponi, visokonaponski prekidači, kontrolisano uključanje

## **ABSTRACT**

Surges are one of the main causes of failures in the power system. Due to the amplification of the electric field during the occurrence of overvoltage, the dielectric stress of the insulation of the network and equipment in the power system occurs. If the intensity of this stress exceeds the tolerable values of the insulation withstand level, the occurrence of breakthrough or leap insulation, which consequently leads to failures. This degrades the reliability of consumer power supply, so the analysis of the causes, characteristics and consequences of overvoltage conditions in the power system is extremely important in order to make the right choice of equipment and apply appropriate protective measures. In this process, special attention should be paid to switching overvoltages caused by circuit breaker operations in high voltage switchgear in the power system.

Previous research shows that the level of switching overvoltages can be limited by the technique of controlled circuit breaker operations, which is made possible thanks to technological advances in the development of high voltage circuit breakers. The subject of this paper are advanced techniques for controlling high voltage circuit breakers in order to limit switching overvoltages. The aim of the research is to determine the optimal algorithm that based on the state of the system at the time immediately before the circuit breaker operation determine the optimal time instant of the switching operation, so that the generated overvoltages have the lowest amplitude.

The calculation of switching overvoltages is based on solving partial differential equations in time. Deterministic methods on simulation models have been used in previous research. In the planned research within this master's thesis, sensitivity analysis will be applied, which will define the parameters of the system and the initial conditions that dominantly affect the value of the characteristics of switching overvoltages in different cases. All conducted analyzes are based on numerical calculations and simulations developed in the Matlab software package (Simulink module).

Simulations have shown that the dominant influence on the value of the amplitude of switching overvoltage due to transmission line closing, have the time instant of the switching operation and the duration of the voltage-free break. In the case of controlled closing of the transmission line, switching overvoltages of significantly lower values of the amplitude are achieved, compared to uncontrolled closing. Furthermore, by comparing the results of the controlled closing of the transmission line after a long and short voltage-free break, it was concluded that in the case of a short voltage-free break, switching overvoltages of significantly higher values of the amplitude are obtained. Also, it was concluded that with the increase of the transmission line length, as one of the parameters of the system, at the same optimal time instants of the circuit breaker closing operation, the value of the amplitude of switching overvoltages increases.

In order to check the performance of the developed algorithm and the controller for the advanced control of the circuit breakers, was conducted research and simulation of the implementation of the developed optimal algorithm on the example of a part of a real power

system, more specifically conducted a simulation of closing 110kV transmission line in the TS 400/110kV „Podgorica 2“, belonging Montenegro transmission system, and successful results were obtained. It has been shown that with the increase of the load value of the 110kV transmission lines in the TS 400/110kV „Podgorica 2“, the value of the amplitude of switching overvoltages at the end of the 110kV transmission line Podgorica 2 – Budva decreases. It was concluded that the value of the amplitude of switching overvoltages increases as the time instants in which the effect of switching pole scattering occurs more leading by the corresponding optimal time instants of the circuit breaker closing operation, and also with increasing value of time delay of reference voltage signals, due to technical reasons.

The practical application of the obtained results is reflected in the reduction of costs related to the dimensioning the insulation of the network and equipment, as well as the use of protective devices, since research has shown that switching overvoltages can be limited by developed circuit breaker control techniques.

**Key words:** switching overvoltages, high voltage circuit breakers, controlled switching



# SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
2. Prenaponi u elektroenergetskim sistemima.....	4
2.1. Prenaponi atmosferskog porijekla.....	7
2.2. Unutrašnji prenaponi.....	9
2.2.1. Sklopni (komutacioni) prenaponi.....	11
3. Visokonaponski prekidači.....	16
3.1. Vrste prekidača.....	17
3.1.1. Prekidači sa vazdušnim gašenjem luka.....	18
3.1.2. Pneumatski prekidači.....	18
3.1.3. Prekidači sa magnetnim oduvavanjem luka.....	19
3.1.4. Uljni prekidači.....	20
3.1.5. Malouljni prekidači.....	21
3.1.6. Hidromatski (ekspanzioni) prekidači.....	22
3.1.7. Vakuumski prekidači.....	22
3.1.8. SF <sub>6</sub> prekidači.....	24
3.2. Zahtjevi koje prekidač treba da ispuni.....	25
4. Konvencionalne tehnike ograničenja sklopnih prenapona.....	29
4.1. Odvodnici prenapona.....	30
4.1.1. Zaštitna iskrišta.....	31
4.1.2. Cijevni odvodnici prenapona.....	31
4.1.3. Silicijum-karbidni odvodnici prenapona.....	32
4.1.4. Metal-oksidni odvodnici prenapona.....	34
4.2. Pred-umetnuti otpornik.....	38
5. Tehnika kontrolisanih operacija prekidača.....	43
5.1. Sistem kontrolisanih operacija prekidača.....	44
5.1.1. Prekidač.....	45
5.1.2. Mjerni transformatori i senzori.....	46
5.1.3. Kontroler.....	46
5.2. Prednosti tehnike kontrolisanih operacija prekidača.....	51

6. Optimalni algoritam za kontrolisano uključenje/isključenje prekidača u visokonaponskim postrojenjima.....	55
6.1. Optimalni algoritam za kontrolisano uključenje dalekovoda.....	60
6.1.1. Optimalni algoritam za kontrolisano uključenje dalekovoda u praznom hodu.....	62
6.1.2. Optimalni algoritam za kontrolisano automatsko ponovno uključenje dalekovoda u praznom hodu.....	63
6.2. Proračun i analiza sklopnih prenapona.....	65
6.2.1. Slučaj uključenja dalekovoda u praznom hodu.....	66
6.2.1.1. Nekontrolisano uključenje.....	67
6.2.1.2. Kontrolisano uključenje.....	70
6.2.2. Slučaj automatskog ponovnog uključenja dalekovoda u praznom hodu.....	76
6.2.2.1. Nekontrolisano automatsko ponovno uključenje.....	76
6.2.2.2. Kontrolisano automatsko ponovno uključenje.....	83
6.2.3. Uticaj različitih faktora na vrijednost amplitude sklopnih prenapona pri uključenju dalekovoda u praznom hodu.....	88
7. Analiza rezultata primjene optimalnog algoritma.....	97
7.1. Tehnički podaci CGES-a.....	97
7.2. Simulacija primjene razvijenog kontrolera na primjeru dalekovodnog polja 110kV u TS 400/110kV „Podgorica 2“.....	100
7.2.1. Tehnički podaci TS 400/110kV „Podgorica 2“.....	101
7.2.2. Proračun parametara elemenata TS 400/110kV „Podgorica 2“.....	104
7.2.2.1. Proračun parametara jake mreže.....	104
7.2.2.2. Parametri transformatora.....	105
7.2.2.3. Proračun parametara 110kV dalekovoda.....	106
7.2.3. Model TS 400/110kV „Podgorica 2“.....	110
7.2.4. Proračun i analiza sklopnih prenapona.....	114
7.2.4.1. Slučaj kontrolisanog uključenja 110kV dalekovoda Podgorica 2 – Budva.....	115
7.2.4.2. Slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda Podgorica 2 – Budva.....	117
7.2.5. Uticaj različitih faktora na vrijednost amplitude sklopnih prenapona pri uključenju dalekovoda u praznom hodu.....	122
7.2.5.1. Uticaj vrijednosti opterećenja 110kV dalekovoda na vrijednost amplitude dobijenih sklopnih prenapona.....	122
7.2.5.2. Uticaj efekta kašnjenja referentnih naponskih signala na vrijednost amplitude dobijenih sklopnih prenapona.....	128
7.2.5.3. Uticaj efekta pred-iskrenja na vrijednost amplitude dobijenih sklopnih prenapona.....	131
8. Zaključak.....	135
9. Literatura.....	140

## SADRŽAJ SLIKA

Slika 1. Podjela prenapona prema faktoru prenapona i trajanju.....	5
Slika 2. Posmatrani sistem u slučaju uključenja voda.....	12
Slika 3. Zamjenska šema posmatranog sistema.....	12
Slika 4. Prikaz maksimalnog prenapona pri uključenju voda u praznom hodu.....	14
Slika 5. Prikaz maksimalnog prenapona pri isključenju voda u kratkom spoju.....	15
Slika 6. Komora za gašenje luka komprimiranim vazduhom u kojoj vazduh struji poprečno na luk.....	19
Slika 7. Princip rada prekidača sa magnetnim oduvavanjem električnog luka.....	20
Slika 8. Princip rada uljnog prekidača.....	21
Slika 9. Princip rada malouljnog prekidača sa poprečnim oduvavanjem električnog luka.....	22
Slika 10. Vakuumski prekidač.....	23
Slika 11. Sastavni dijelovi autopneumatskog SF <sub>6</sub> prekidača.....	25
Slika 12. Signali koji se obično mogu posmatrati tokom operacije uključenja prekidača.....	27
Slika 13. Cijevni odvodnik prenapona (1 – cijev odvodnika, 2 – uzemljena elektroda, 3 – elektroda pod naponom, S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> – iskrišta).....	32
Slika 14. Silicijum-karbidni odvodnik prenapona.....	33
Slika 15. Vremenski dijagram napona i struja pri nailasku atmosferskog prenaponskog talasa na SiC odvodnik prenapona.....	34
Slika 16. ZnO odvodnik prenapona.....	35
Slika 17. Volt-amperska karakteristika ZnO odvodnika prenapona.....	35
Slika 18. Vremenski dijagram napona i struje pri nailasku atmosferskog prenaponskog talasa na ZnO odvodnik prenapona.....	36
Slika 19. Šematski prikaz kontrolisanog metal-oksidnog odvodnika prenapona.....	37
Slika 20. Primjena pred-umetnutog otpornika kod prekidača.....	38
Slika 21. Pražnjenje zaostalog naelektrisanja na vodu preko pred-umetnutog otpornika ("line trapped charge" = zaostalo naelektrisanje na dalekovodu).....	39
Slika 22. Uticaj vremena uključenja pred-umetnog otpornika kod prekidača na vrijednost maksimalne amplitude prenapona (R – otpornost pred-umetnutog otpornika, L – dužina voda).....	40

Slika 23. Uticaj dužine voda na vrijednost maksimalne amplitude prenapona ( $R$ – otpornost pred-umetnutog otpornika, $t_R$ – vrijeme uključenje pred-umetnutog otpornika prije zatvaranja glavnih kontakata prekidača).....	41
Slika 24. Osnovni elementi sistema kontrolisanih operacija prekidača.....	45
Slika 25. Blok dijagram hardvera kontrolera.....	47
Slika 26. Primjer ekrana web interfejs-a savremenog kontrolera, koji prikazuje sve nedavne kontrolisane operacije prekidača, kao i detaljne podatke o poslednjoj kontrolisanoj operaciji prekidača.....	49
Slika 27. Primjer ekrana web interfejs-a kontrolera koji prikazuje stvarne grafike operativnih vremena uključenja kontrolisanog prekidača.....	50
Slika 28. Dio jednopolne šeme za napajanje kondenzatorskih baterija.....	50
Slika 29. Poređenje maksimalnih amplituda sklopnih prenapona uzrokovanih automatskim ponovnim uključenjem prenosnog dalekovoda [34].....	53
Slika 30. Sistem kontrolisanih operacija prekidača.....	55
Slika 31. Vremenski redosled kontrolisanog isključenja.....	57
Slika 32. Vremenski redosled kontrolisanog uključenja.....	58
Slika 33. Vremenski redosled kontrolisanog uključenja.....	59
Slika 34. Optimalni algoritam za kontrolisano uključenje dalekovoda.....	61
Slika 35. Optimalni algoritam za kontrolisano uključenje/isključenje prekidača.....	61
Slika 36. Uticaj elektromagnetne sprege između faza dalekovoda na optimalne vremenske trenutke uključenja prekidača.....	62
Slika 37. Optimalni vremenski trenuci kontrolisanog uključenja dalekovoda u praznom hodu.....	63
Slika 38. Optimalni vremenski trenuci za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda bez kompenzacije reaktivne energije.....	64
Slika 39. Optimalni vremenski trenutak za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda sa kompenzacijom reaktivne energije.....	64
Slika 40. Šema posmatranog EES-a.....	65
Slika 41. Model posmatranog sistema u Matlab-u (moduo Simulink) za slučaj nekontrolisanog uključenja dalekovoda u praznom hodu.....	67
Slika 42. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj nekontrolisanog uključenja dalekovoda u praznom hodu.....	68
Slika 43. Talasni oblik napona napajanja i napona na kraju dalekovoda za slučaj nekontrolisanog uključenja dalekovoda u praznom hodu, u fazi A.....	69
Slika 44. Talasni oblik napona napajanja i napona na kraju dalekovoda za slučaj nekontrolisanog uključenja dalekovoda u praznom hodu, u fazi B.....	69

Slika 45. Talasni oblik napona napajanja i napona na kraju dalekovoda za slučaj nekontrolisanog uključenja dalekovoda u praznom hodu, u fazi C.....	70
Slika 46. Model posmatranog sistema u Matlab-u (moduo Simulink) za slučaj kontrolisanog uključenja dalekovoda u praznom hodu.....	71
Slika 47. Model razvijenog kontrolera.....	72
Slika 48. Detaljni prikaz modela razvijenog kontrolera, za jednu fazu.....	73
Slika 49. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog uključenja dalekovoda u praznom hodu.....	75
Slika 50. Talasni oblik napona napajanja i napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog uključenja dalekovoda u praznom hodu.....	75
Slika 51. Model posmatranog sistema u Matlab-u (moduo Simulink) za slučaj nekontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda u praznom hodu.....	77
Slika 52. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj nekontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda u praznom hodu za vremenski period prije isključenja prekidača, kao i neposredno nakon isključenja prekidača, tj. od 0s do 0,1s .....	78
Slika 53. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj nekontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda u praznom hodu za vrijeme trajanja beznaponske pauze, tj. vremenski period neposredno nakon isključenja prekidača, kao i neposredno prije APU prekidača, tj. od 0,1s do 1,35s .....	78
Slika 54. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj nekontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda u praznom hodu za vremenski period neposredno prije APU prekidača, kao i nakon APU prekidača, tj. od 1,35s do 1,6s .....	79
Slika 55. Talasni oblik napona napajanja i napona na kraju dalekovoda za slučaj nekontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda u praznom hodu za vremenski period prije isključenja prekidača, kao i neposredno nakon isključenja prekidača, tj. od 0s do 0,1s .....	79
Slika 56. Talasni oblik napona napajanja i napona na kraju dalekovoda za slučaj nekontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda u praznom hodu za vrijeme trajanja beznaponske pauze, tj. vremenski period neposredno nakon isključenja prekidača, kao i neposredno prije APU prekidača, tj. od 0,1s do 1,35s .....	80
Slika 57. Talasni oblik napona napajanja i napona na kraju dalekovoda za slučaj nekontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda u praznom hodu za vremenski period neposredno prije APU prekidača, kao i nakon APU prekidača, tj. od 1,35s do 1,6s .....	80
Slika 58. Talasni oblik napona napajanja i napona na kraju dalekovoda za slučaj nekontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda u praznom hodu za vremenski period neposredno prije APU prekidača, kao i nakon APU prekidača, tj. od 1,35s do 1,6s u fazi A.....	81
Slika 59. Talasni oblik napona napajanja i napona na kraju dalekovoda za slučaj nekontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda u praznom hodu za	

vremenski period neposredno prije APU prekidača, kao i nakon APU prekidača, tj. od 1,35s do 1,6s u fazi B.....	81
Slika 60. Talasni oblik napona napajanja i napona na kraju dalekovoda za slučaj nekontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu za vremenski period neposredno prije APU prekidača, kao i nakon APU prekidača, tj. od 1,35s do 1,6s u fazi C.....	82
Slika 61. Model posmatranog sistema u Matlab-u (moduo Simulink) za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu.....	83
Slika 62. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu za vremenski period prije isključenja prekidača, kao i neposredno nakon isključenja prekidača, tj. od 0s do 0,1s .....	85
Slika 63. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu za vrijeme trajanja beznaponske pauze, tj. vremenski period neposredno nakon isključenja prekidača, kao i neposredno prije APU prekidača, tj. od 0,1s do 1,35s .....	85
Slika 64. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu za vremenski period neposredno prije APU prekidača, kao i nakon APU prekidača, tj. od 1,35s do 1,6s .....	86
Slika 65. Talasni oblik napona napajanja i napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu za vremenski period prije isključenja prekidača, kao i neposredno nakon isključenja prekidača, tj. od 0s do 0,1s .....	86
Slika 66. Talasni oblik napona napajanja i napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu za vrijeme trajanja beznaponske pauze, tj. vremenski period neposredno nakon isključenja prekidača, kao i neposredno prije APU prekidača, tj. od 0,1s do 1,35s .....	87
Slika 67. Talasni oblik napona napajanja i napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu za vremenski period neposredno prije APU prekidača, kao i nakon APU prekidača, tj. od 1,35s do 1,6s ...	87
Slika 68. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu, pri čemu do pojave rasipanja polova prekidača dolazi 0,1ms ranije od optimalnih vremenskih trenutaka uključanja prekidača.....	90
Slika 69. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu, pri čemu do pojave rasipanja polova prekidača dolazi 0,2ms ranije od optimalnih vremenskih trenutaka uključanja prekidača.....	91
Slika 70. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu, pri čemu do pojave rasipanja polova prekidača dolazi 0,3ms ranije od optimalnih vremenskih trenutaka uključanja prekidača.....	91
Slika 71. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu, pri čemu do pojave rasipanja polova prekidača dolazi 0,4ms ranije od optimalnih vremenskih trenutaka uključanja prekidača.....	92

Slika 72. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog uključenja dalekovoda u praznom hodu, pri čemu do pojave rasipanja polova prekidača dolazi 0,5ms ranije od optimalnih vremenskih trenutaka uključenja prekidača.....	92
Slika 73. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog uključenja dalekovoda u praznom hodu, pri čemu do pojave rasipanja polova prekidača dolazi 1ms ranije od optimalnih vremenskih trenutaka uključenja prekidača.....	93
Slika 74. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog uključenja dalekovoda u praznom hodu, pri čemu je dužina dalekovoda 50km.....	94
Slika 75. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog uključenja dalekovoda u praznom hodu, pri čemu je dužina dalekovoda 100km.....	95
Slika 76. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog uključenja dalekovoda u praznom hodu, pri čemu je dužina dalekovoda 150km.....	95
Slika 77. Detaljniji prikaz šeme crnogorskog elektroprenosnog sistema.....	99
Slika 78. Prekidač HPGE 11/15.....	100
Slika 79. Prekidač LTB 145 D1/B.....	100
Slika 80. Jednopolna šema TS 400/110kV „Podgorica 2“.....	102
Slika 81. Proračun parametara jednosistemskog 110kV dalekovoda, poprečnog presjeka provodnika Al/Fe 240/40 mm <sup>2</sup> /mm <sup>2</sup> .....	107
Slika 82. Proračun parametara jednosistemskog 110kV dalekovoda, poprečnog presjeka provodnika Al/Fe 2x(240/40) mm <sup>2</sup> /mm <sup>2</sup> .....	108
Slika 83. Proračun parametara jednosistemskog 110kV dalekovoda, poprečnog presjeka provodnika Al/Fe 150/25 mm <sup>2</sup> /mm <sup>2</sup> .....	109
Slika 84. Prikaz modela TS 400/110kV „Podgorica 2“.....	110
Slika 85. Detaljniji prikaz modela jake mreže i transformatora 1.....	111
Slika 86. Detaljniji prikaz modela jake mreže i transformatora 2.....	112
Slika 87. Prikaz dijela dalekovodnih polja koja su priključena na 110kV sekciju sabirnica 1.....	113
Slika 88. Prikaz dijela dalekovodnih polja koja su priključena na 110kV sekciju sabirnica 1 i 110kV sekciju sabirnica 2.....	113
Slika 89. Prikaz dijela dalekovodnih polja koja su priključena na 110kV sekciju sabirnica 2.....	114
Slika 90. Talasni oblik napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog uključenja dalekovoda u praznom hodu.....	116
Slika 91. Talasni oblik napona napajanja, tj. jake mreže i napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog uključenja dalekovoda u praznom hodu.....	117
Slika 92. Talasni oblik napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog APU dalekovoda u praznom hodu za vremenski period prije isključenja prekidača, kao i neposredno nakon isključenja prekidača, tj. od 0s do 0,1s .....	118

- Slika 93. Talasni oblik napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu za vrijeme trajanja beznaponske pauze, tj. vremenski period neposredno nakon isključenja prekidača, kao i neposredno prije APU prekidača, tj. od 0,1s do 1,36s .....119
- Slika 94. Talasni oblik napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu za vremenski period neposredno prije APU prekidača, kao i nakon APU prekidača, tj. od 1,36s do 1,5s .119
- Slika 95. Talasni oblik napona napajanja, tj. jake mreže i napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu za vremenski period prije isključenja prekidača, kao i neposredno nakon isključenja prekidača, tj. od 0s do 0,1s .....120
- Slika 96. Talasni oblik napona napajanja, tj. jake mreže i napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu za vrijeme trajanja beznaponske pauze, tj. vremenski period neposredno nakon isključenja prekidača, kao i neposredno prije APU prekidača, tj. od 0,1s do 1,36s .....120
- Slika 97. Talasni oblik napona napajanja, tj. jake mreže i napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu za vremenski period neposredno prije APU prekidača, kao i nakon APU prekidača, tj. od 1,36s do 1,5s .....121
- Slika 98. Talasni oblik napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu u DV polju Budva, pri maksimalnim opterećenjima 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“.....124
- Slika 99. Talasni oblik napona napajanja, tj. jake mreže i napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu u DV polju, pri maksimalnim opterećenjima 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“.....125
- Slika 100. Talasni oblik napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu u DV polju Budva, pri minimalnim opterećenjima 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“.....126
- Slika 101. Talasni oblik napona napajanja, tj. jake mreže i napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu u DV polju Budva, pri minimalnim opterećenjima 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“.....127
- Slika 102. Talasni oblik napona napajanja, tj. jake mreže i napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu, pri efektu kašnjenja referentnih naponskih signala od jednog semplinga.....129
- Slika 103. Talasni oblik napona napajanja, tj. jake mreže i napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu, pri efektu kašnjenja referentnih naponskih signala od dva semplinga.....130
- Slika 104. Talasni oblik napona napajanja, tj. jake mreže i napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu, pri efektu kašnjenja referentnih naponskih signala od tri semplinga.....130



Slika 105. Talasni oblik napona napajanja, tj. jake mreže i napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu, pri čemu do pojave rasipanja polova prekidača dolazi 0,1ms ranije od optimalnih vremenskih trenutaka uključanja prekidača.....132

Slika 106. Talasni oblik napona napajanja, tj. jake mreže i napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu, pri čemu do pojave rasipanja polova prekidača dolazi 0,2ms ranije od optimalnih vremenskih trenutaka uključanja prekidača.....133

Slika 107. Talasni oblik napona napajanja, tj. jake mreže i napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 – Budva za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu, pri čemu do pojave rasipanja polova prekidača dolazi 0,3ms ranije od optimalnih vremenskih trenutaka uključanja prekidača.....133

## SADRŽAJ TABELA

Tabela 1. Parametri izvora i dalekovoda.....	66
Tabela 2. Apsolutne vrijednosti amplituda i vrijednosti koeficijenata sklopnih prenapona za slučaj nekontrolisanog uključenja dalekovoda u praznom hodu.....	70
Tabela 3. Apsolutne vrijednosti amplituda i vrijednosti koeficijenata sklopnih prenapona za slučaj kontrolisanog uključenja dalekovoda u praznom hodu.....	76
Tabela 4. Apsolutne vrijednosti amplituda i vrijednosti koeficijenata sklopnih prenapona za slučaj nekontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda u praznom hodu.....	82
Tabela 5. Apsolutne vrijednosti amplituda i vrijednosti koeficijenata sklopnih prenapona za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda u praznom hodu.....	88
Tabela 6. Vrijednosti koeficijenata sklopnih prenapona na kraju dalekovoda za slučajeve prediskrenja od 0,1ms , 0,2ms , 0,3ms , 0,4ms , 0,5ms i 1ms ranije od optimalnih vremenskih trenutaka uključenja prekidača.....	93
Tabela 7. Vrijednosti koeficijenata sklopnih prenapona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog uključenja dalekovoda u praznom hodu pri različitim dužinama dalekovoda od 50km, 100km i 150km.....	96
Tabela 8. Trafostanice CGES-a.....	97
Tabela 9. Dužine 400kV dalekovoda koji ulaze u TS 400/110kV „Podgorica 2“.....	103
Tabela 10. Dužine 110kV dalekovoda poprečnog presjeka provodnika Al/Fe 240/40 mm <sup>2</sup> /mm <sup>2</sup> .....	103
Tabela 11. Dužine 110kV dalekovoda poprečnog presjeka provodnika Al/Fe 150/25 mm <sup>2</sup> /mm <sup>2</sup> .....	103
Tabela 12. Vrijednosti struje trolejnog kratkog spoja u TS 400/110kV „Podgorica 2“ na naponskom nivou 400kV.....	105
Tabela 13. Karakteristike trafo-a u TS 400/110kV „Podgorica 2“.....	105
Tabela 14. Parametri trafo-a u TS 400/110kV „Podgorica 2“.....	106
Tabela 15. Konstrukcioni podaci Al/Fe provodnika.....	106
Tabela 16. Konstrukcioni podaci zaštitnog užeta.....	106
Tabela 17. Parametri jednosistemskog 110kV dalekovoda, poprečnog presjeka provodnika Al/Fe 240/40 mm <sup>2</sup> /mm <sup>2</sup> .....	107
Tabela 18. Parametri jednosistemskog 110kV dalekovoda, poprečnog presjeka provodnika Al/Fe 2x(240/40) mm <sup>2</sup> /mm <sup>2</sup> .....	108

Tabela 19. Parametri jednosistenskog 110kV dalekovoda, poprečnog presjeka provodnika Al/Fe 150/25 mm <sup>2</sup> /mm <sup>2</sup> .....	109
Tabela 20. Srednje vrijednosti opterećenja 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“.....	115
Tabela 21. Maksimalne vrijednosti opterećenja 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“.....	123
Tabela 22. Minimalne vrijednosti opterećenja 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“.....	125
Tabela 23. Vrijednosti koeficijenata sklopnih prenapona na kraju 110kV DV Podgorica 2 – Budva, za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu u DV polju Budva, pri minimalnim, srednjim i maksimalnim opterećenjima 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“.....	128
Tabela 24. Vrijednosti koeficijenata sklopnih prenapona na kraju 110kV DV Podgorica 2 – Budva, za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu u DV polju Budva, pri efektu kašnjenja referentnih naponskih signala od jednog, dva i tri semplinga.....	131
Tabela 25. Vrijednosti koeficijenata sklopnih prenapona na kraju 110kV DV Podgorica 2 – Budva, za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu u DV polju Budva, pri čemu do pojave rasipanja polova prekidača dolazi 0,1ms, 0,2ms i 0,3ms ranije od optimalnih vremenskih trenutaka uključanja prekidača.....	134

## 1. UVOD

Tokom perioda eksploatacije svi elementi elektroenergetskog sistema (EES) izloženi su kontinuiranim strujnim i naponskim naprezanjima. U normalnim radnim uslovima vrijednosti napona i struje su bliske nazivnim (nominalnim) vrijednostima, a dozvoljena odstupanja su definisana propisima i standardima. Pored nazivnih vrijednosti napona, u EES-u se pojavljuju i znatno viši naponi koji su uzrokovani prelaznim pojavama (komutacijama prekidača, atmosferskim pražnjenjem i sl.) pa se izolacija opreme i elemenata sistema napreže i relativno sporim dinamičkim i brzim tranzijentnim prenaponima. Stoga, izolacija opreme i elemenata sistema mora biti sposobna da izdrži i znatno više napone, jer bi u protivnom slučaju kvarovi u sistemu bili veoma česta pojava i samim tim bi bio narušen kvalitet električne energije i onemogućeno besprekidno napajanje potrošača.

Da bi izolacija izdržala različita naprezanja ona se mora pažljivo dimenzionisati, koordinisati i pravilno ispitati. Za pravilno dimenzionisanje izolacije, sa aspekta naponskih naprezanja, neophodno je prikupiti potrebne podatke za sve elemente sistema i izvršiti proračune kako za nazivne napone, tako i za dielektrična naprezanja uzrokovana prenaponima. Koordinacija izolacije predstavlja skup mjera za sprječavanje štete uzrokovane povišenjem napona, i ona se sprovodi tako da se kvarovi lokalizuju na mjestu gdje neće nanijeti veću materijalnu štetu, ako se ekonomičnim sredstvima ne mogu sasvim ukloniti. Da bi se to postiglo određuje se stepen izolacije elementa EES-a, koji je definisan vrijednošću podnosivih napona koji karakterišu izolaciju tog elementa uzimajući u obzir njegovu dielektričnu čvrstoću. Nakon dimenzionisanja i koordinacije izolacije neophodno je ispitati da li su karakteristike izolacije u okviru definisanih standarda.

Pojava prenapona u elektroenergetskim sistemima je veoma česta i ima brojne negativne efekte, koji se ogledaju u narušavanju, pa čak i u ozbiljnom ugrožavanju eksploatacije elektroenergetskih sistema. Prenaponi koji se javljaju unutar elektroenergetskih sistema se, s obzirom na uzrok nastanka, mogu podijeliti na: spoljašnje prenapone i unutrašnje prenapone. Uzrok nastanka spoljašnjih prenapona je pojava atmosferskog pražnjenja, dok se uzrok unutrašnjih prenapona nalazi u samoj mreži i to su tzv. prenaponi usljed prelaznih procesa. Samim tim, unutrašnji prenaponi se mogu unaprijed procijeniti, jer njihova visina zavisi od elektrostatičke i elektromagnetne energije koja se nalazi u posmatranom sistemu, što je od velikog značaja za siguran i pouzdan rad sistema [1].

Prema svom nastanku unutrašnji prenaponi se mogu podijeliti na [2]: komutacione (sklopne), rezonantne, ferorezonantne i prenapone izazvane intermitentnim gorenjem luka. U okviru ovog rada analizirani su sklopni prenaponi, odnosno prenaponi koji nastaju pri komutacijama prekidača, tj. naglim promjenama režima u kolu, bilo u ustaljenom ili havarijskom režimu.

Komutacija koja se u praksi veoma često izvodi je tzv. energetizacija voda, tj. uključenje voda. Stoga je potrebno uočiti i prepoznati sve prateće pojave koje su uzrokovane operacijom uključanja voda. Prilikom uključanja voda, zavisno od uslova koje imamo pri samom uključanju, može doći do pojave sklopnih prenapona koje se kreću i do trostruke vrijednosti nominalnog napona [3].

Kada atmosfersko pražnjenje udari u fazne provodnike ili zaštitno uže dalekovoda, ili se izvrše sklopne operacije u elektroenergetskom sistemu, talasi prenapona, sa brzinom približno jednakom brzini svjetlosti, se prostiru duž provodnika dalekovoda, usljed čega može doći do narušavanja dielektrične čvrstoće izolacije na nekom mjestu u sistemu i posljedično do pojave kratkog spoja. Kratki spoj se dijagnostikuje preko zaštitnih uređaja, releja, pa se zbog toga dalekovod koji je u kvaru isključuje iz elektroenergetskog sistema. U slučaju da je kratki spoj nastao preko električnog luka, usled brze dejonizacije vazduha i spontanog gašenja električnog luka, prekidač dalekovoda se može brzo ponovo uključiti nakon isključenja. Isključenjem prekidača aktivira se sistem automatskog ponovnog uključanja (APU) koji nakon isteka podešenog vremena trajanja beznaponske pauze šalje signal prekidaču za ponovno uključanje. Brzo isključivanje i uključivanje dalekovoda pod opterećenjem korišćenjem sistema automatskog ponovnog uključanja, uzrokuje nekoliko pojava kao što je pojava zaostalog naleytrisanja na dalekovodu, pa se kao posledica toga generišu tranzijentni prenaponski talasi sa visokofrekventnim opsegom, od 50Hz do 20kHz [4], i brzim prigušenjem. Vrijeme prisustva talasa traje nekoliko ms. Sklopni prenapon je proporcionalan naponskom nivou sistema.

U međunarodnim IEC standardima, tačnije u standardu IEC Std. 60071, sklopni prenaponi predstavljaju važan faktor u dizajnu koordinacije izolacije dalekovoda, posebno u sistemima sa naponskim nivoom iznad 300kV [4]. Maksimalni sklopni prenapon koji se može pojaviti na dalekovodu bi trebao da bude manji od podnosivih napona izolacije izolatora postavljenih na dalekovodu. U tom slučaju se može sa sigurnošću tvrditi da energetizacija dalekovoda, tj. operacija uključanja prekidača, posebno pri brzom automatskom ponovnom uključanju neće dovesti do proboja izolacije izolatora. Maksimalni sklopni prenapon koji se može pojaviti na dalekovodu se može izračunati primjenom tranzijentnih modela sistema ili korišćenjem EMTP softver-a. Ako maksimalni sklopni prenapon prekoračuje podnosive napone izolacije izolatora dalekovoda, tada je izolacija dalekovoda ugrožena i moraju se primjeniti odgovarajuće mjere zaštite.

Dominantan uticaj na vrijednost sklopnih prenapona na vodu ima vrijeme trajanja beznaponske pauze, jer vrijednost zaostalog naleytrisanja na provodnicima zavisi od vremena trajanja beznaponske pauze. Osim vremena trajanja beznaponske pauze, vrijednost prenapona zavisi i od trenutka uključanja prekidača usled APU-a. Do uključanja prekidača može da dođe i prije podešenja APU-a usled stvaranja električnog luka koji se formira prilikom približavanja kontakata prekidača, tzv. efekat pred-iskrenja.

Izolacija opreme i elemenata sistema se od nastalih prenapona mogu zaštititi primjenom odvodnika prenapona. Ograničenje sklopnih prenapona se može postići na konvencionalan način korišćenjem prekidača koji su opremljeni pred-umetnutim otpornicima. Takođe, od skoro se primjenjuje i nova tehnika za ograničenje sklopnih prenapona, a to je tehnika kontrolisanih operacija prekidača. Konvencionalne mjere se primjenjuju za ograničenje sklopnih prenapona nakon njihovog pojavljivanja, pa su samim tim ove metode

neefikasne, nepouzdana i skupe, i ne tretiraju srž problema. Za razliku od njih tehnika kontrolisanih operacija prekidača eliminiše štetne tranzijente pomoću vremenski kontrolisanih operacija uključivanja [1].

Kod tehnike kontrolisanih operacija prekidača, koja je detaljnije analizirana u ovom radu, komande uključivanja ili ponovnog uključivanja prekidača se odlažu tako da se spajanje kontakata dešava u optimalnom trenutku u odnosu na fazni ugao napona napajanja, čime se sprečava generisanje visokih tranzijenata. Brojne studije pokazuju da u nekim slučajevima kontrolisane operacije prekidača mogu značajno da ograniče sklopne prenapone. Međutim, kao najbolje rješenje za ograničenje sklopnih prenapona predlaže se korišćenje tehnike kontrolisanih operacija prekidača u kombinaciji sa odvodnicima prenapona postavljenim na krajevima dalekovoda. Upotreba odvodnika bi obezbjedila bolje rezultate i sigurnost u slučaju neispravnosti sistema kontrolisanih operacija prekidača, a takođe i zaštitu sistema od prenapona uzrokovanih atmosferskim pražnjenjem.

Predmet istraživanja ovog magistarskog rada su napredne tehnike za upravljanje visokonaponskim prekidačima sa ciljem ograničenja sklopnih prenapona. Publikovani rezultati istraživanja u ovoj oblasti pokazuju da se nivo sklopnih prenapona može ograničiti tehnikom kontrolisanih operacija prekidača. Primjena ove tehnike omogućena je zahvaljujući tehnološkom napretku u razvoju visokonaponskih prekidača. Stoga je cilj ovog magistarskog rada određivanje optimalnog algoritma koji bi na osnovu stanja u dijelu sistema, tj. naponskih i strujnih prilika u vremenu neposredno prije sklopne operacije i drugih analiziranih uticajnih parametara, definisao optimalne parametre za napredno upravljanje prekidačem u visokonaponskim razvodnim postrojenjima, tj. odredio optimalni vremenski trenutak uključivanja prekidača, kako bi generisani sklopni prenaponi, uzrokovani uključivanjem dalekovoda, imali minimalnu amplitudu.

Magistarski rad se sastoji iz osam poglavlja. Nakon opšteg uvoda u temu koji je prikazan u uvodnom poglavlju, u drugom poglavlju će biti objašnjeni uzroci nastanka prenapona, i objašnjena podjela prenapona, pri čemu će u fokusu biti sklopni prenaponi. U trećem poglavlju će biti dat pregled i opis uloge, kao i podjela, visokonaponskih prekidača koji se primjenjuju u visokonaponskim postrojenjima, a takođe će biti analizirani i zahtjevi koje prekidač mora da ispuni da bi se mogao koristiti u tehnici kontrolisanih operacija, tj. naprednog upravljanja. Detaljan opis konvencionalnih tehnika, kao i opis njihovih prednosti i nedostataka će biti prikazan u četvrtom poglavlju. U petom poglavlju će biti analizirana tehnika kontrolisanih operacija prekidača i biće određeni optimalni uslovi za upravljanje prekidačima pri kojima se dobijaju najmanje vrijednosti sklopnih prenapona. Optimalni algoritam za kontrolisano uključivanje/isključivanje prekidačem u visokonaponskim postrojenjima, kojim se postiže minimum sklopnih, prikazan je u šestom poglavlju. U okviru sedmog poglavlja biće analizirani rezultati koji su dobijeni primjenom izvedenog optimalnog algoritma. I na kraju, u zaključnim razmatranjima će biti dat osvrt na glavnu ideju i ukazano na doprinos i značaj naučnog istraživanja, kao i ideje daljeg istraživanja.

## 2. PRENAPONI U ELEKTROENERGETSKIM SISTEMIMA

Svako povišenje napona između dvije tačke koje uzrokuje stvaranje električnog polja između njih, koje može biti opasno po oštećenje izolacije između tih tačaka, se definiše kao prenapon. Naime, usljed jakog električnog polja između tih tačaka može doći do preskoka ili proboja izolacije [2].

Prema uzroku nastanka, prenaponi se mogu podijeliti u dvije osnovne grupe:

- spoljašnji ili atmosferski prenaponi i
- unutrašnji ili sklopni prenaponi.

Postoji i druga podjela prenapona po kojoj se prenaponi dijele u zavisnosti od njihove amplitude i dužine trajanja, i oni su prikazani na slici 1. [5]:

- Privremena povišenja napona.
- Najviši pogonski napon, koji se može izraziti efektivnom vrijednošću odgovarajućeg naponskog nivoa.
- Prelazni prenaponi.

Prelazni prenaponi se mogu podijeliti na [5]:

- Sklopne prenapona (sporog porasta čela),
- Atmosferske prenapone (brzog porasta čela),
- Vrlo brze prenapone (engl. *VFT – very fast transient*).

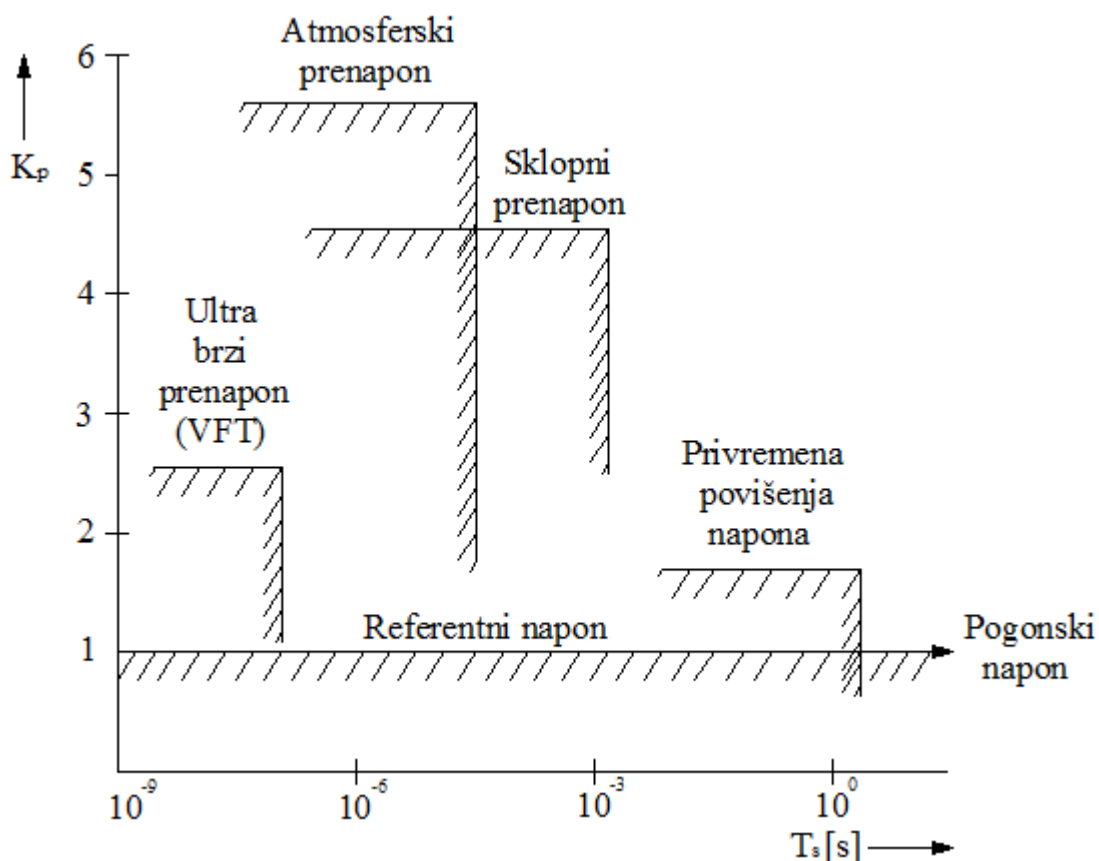
Faktor prenapona  $K_p$  koji je prikazan na ordinati (slika 1.), zavisi od amplitude maksimalnog prenapona i određuje se na sledeći način [5]:

$$K_p = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2} \cdot \frac{U}{\sqrt{3}}} = 1.225 \frac{U_{\max}}{U} \quad (1)$$

gdje je:

$U_{\max}$  – amplituda prenapona (V),

$U$  – efektivna vrijednost pogonskog napona (linijski napon) (V).



Slika 1. Podjela prenapona prema faktoru prenapona i trajanju.

Prelazne pojave uzrokovane atmosferskim pražnjenjem i sklopnim operacijama generišu glavni dio prelaznih pojava sistema. Važno je procijeniti amplitudu ovih prelaznih pojava kako bi se utvrdio nivo izolacije opreme elektroenergetskog sistema i ujedno izvršila i koordinacija izolacije. Sklopni prenaponi mogu dovesti do pojave velikih prenaponskih naprezanja elektroenergetske opreme, kao i same mreže.

Posmatrajući na primjer jedno visokonaponsko razvodno postrojenje naponskog nivoa 400kV, mogu se definisati sledeći uzroci nastanka prenaponskih talasa [6]:

- atmosfersko pražnjenje u razvodno postrojenje 400 kV i u nadzemne vodove koji ulaze u razvodno postrojenje 400 kV,
- atmosfersko pražnjenje u fazne provodnike koji iz razvodnog postrojenja 400 kV dolaze na priključke transformatora,
- atmosfersko pražnjenje direktno u priključke transformatora,
- atmosfersko pražnjenje u zemlju u relativnoj blizini razvodnog postrojenja 400kV (tzv. indukovani prenaponi)
- komutacije prekidača u razvodnom postrojenju 400 kV.

Veoma je mala vjerovatnoća da atmosfersko pražnjenje direktno pogodi fazne provodnike koji od razvodnog postrojenja idu ka priključcima transformatora. Tada struja



atmosferskog pražnjenja ima malu amplitudu, reda nekoliko kA, ali može da dovede do značajnih prenapona na visokonaponskim priključcima transformatora talasa [6].

Međutim, udar atmosferskog pražnjenja u uzemljene djelove razvodnog postrojenja je moguć. Tada može doći do pojave povratnog preskoka na izolaciji postrojenja i prenaponi velike strmine faznim provodnicima dolaze na priključke transformatora [6]. Ovi prenaponi mogu dostići izuzetno visoke amplitude i značajno naprezati izolaciju visokonaponskog namotaja transformatora.

Na visokonaponskim priključcima transformatora se mogu pojaviti i sklopni prenaponi uzrokovani sklopnim operacijama prekidača u razvodnom postrojenju 400 kV. Prekidači 400 kV se primjenjuju za uključivanje i isključivanje nadzemnih vodova, kao i isključivanje zamljospojeva i kratkih spojeva na vodovima i u razvodnom postrojenju 400 kV [6].

Unutrašnji prenaponi se mogu unaprijed procijeniti, jer njihova amplituda zavisi od elektrostatičke i elektromagnetne energije koja se nalazi u posmatranom sistemu, što je od velikog značaja za siguran i pouzdan rad sistema [1].

Komutacija koja se u praksi veoma često izvodi je tzv. energetizacija voda, tj. uključenje voda. Stoga je potrebno uočiti i prepoznati sve prateće pojave koje su uzrokovane operacijom uključanja voda. Prilikom uključanja voda, zavisno od uslova koji se imaju pri samom uključanju, može doći do pojave sklopnih prenapona koje se kreću i do trostruke vrijednosti nominalnog napona [3].

U zavisnosti od trajanja beznaponske pauze, tj. dužine vremenskog intervala tokom kojeg je vod bio izolavan sa sistema, razlikuju se dva karakteristična slučaja uključanja voda: uključenje voda nakon duge beznaponske pauze i uključenje voda nakon kratke beznaponske pauze, usled djelovanja APU-a. Dominantan uticaj na vrijednost sklopnih prenapona na vodu, uzrokovanih uključanjem voda u praznom hodu, ima vrijeme trajanja beznaponske pauze, jer vrijednost zaostalog napona na provodnicima zavisi od vremena trajanja beznaponske pauze. Osim vremena trajanja beznaponske pauze, vrijednost prenapona zavisi i od trenutka zatvaranja prekidača usled APU. Do zatvaranja električnog kola može da dođe i prije podešenja APU usled električnog luka koji se formira prilikom približavanja kontakata prekidača.

Postoji veliki broj metoda i pristupa proračunu i analizama sklopnih prenapona. Za proračun sklopnih prenapona koriste se dva osnovna pristupa: u vremenskom domenu i u frekventnom domenu. U vremenskom domenu se primjenjuju metode prostiranja talasa i to: diskretna metoda, metoda mrežnog dijagrama, Beržerenova metoda itd. U frekventnom domenu se primjenjuju metode Laplasove i Furijeove transformacije [7].

Vrijednost amplitude sklopnih prenapona koji se mogu pojaviti na dalekovodu se mogu izračunati na konvencionalan način, korišćenjem studija sklopnih tranzijenata. Postoje četiri glavne metode koje se primjenjuju za proračunavanje naponskih tranzijenata, naime, metod Furije-ove transformacije, metod Lattice-ovog dijagrama, metod putujućeg talasa i metod Lumped parametra [8]. Za spovođenje proračuna prelaznih procesa u složenim EES-ima danas se najčešće primjenjuju simulacioni programski paketi koji omogućavaju formiranje modela sistema i simulaciju prelaznih procesa. Prednost korišćenja simulacionih programskih paketa je mogućnost obuhvatanja većeg broja uticajnih faktora, kao i mnogo

kraće vrijeme dobijanja rezultata. Pored ATP/EMTP programa najpoznatiji, najrasprostranjeniji i najčešće primjenjivan, od velikog broja softvera koji postoje na tržištu, je programski paket MATLAB (moduo Simulink) koji je i korišten i u okviru ovog rada [1].

Ispitivanje prenapona u elektroenergetskom sistemu uključuje studiju (proučavanje) njihovih različitih karakteristika, i to: učestalost pojavljivanja, amplitude, trajanje, oblici, itd. Neophodno je da se ova studija izvodi ne samo u tački gdje prenapon nastaje, već i na svim ostalim tačkama duž prenosne mreže do kojih prenaponi mogu doći. Veoma je važno napomenuti da je neophodno povremeno (s vremena na vrijeme) provjeravati nivo izolacije i stanje cijele opreme i svih uređaja, tokom perioda eksploatacije. Ovo se može uraditi samo sprovođenjem eksperimentalnih istraživanja u odgovarajućim licenciranim visokonaponskim laboratorijama ili direktno na posmatranom sistemu [9].

## 2.1. Prenaponi atmosferskog porijekla

Uzrok nastanka atmosferskih prenapona su udari atmosferskog pražnjenja u elemente EES-a. Pri udaru groma dolazi do pražnjenja naelektrisanja nagomilanih u oblacima. Ukoliko atmosfersko pražnjenje pogodi neki element elektroenergetskog sistema (nadzemne vodove, portale visokonaponskih razvodnih postrojenja, prihvatni sistem spoljašnje gromobranske instalacije i sl.), tada se smatra da je došlo do direktnog udara atmosferskog pražnjenja. Osim toga, može nastati indirektni udar atmosferskog pražnjenja, tj. doći do pojave atmosferskog pražnjenja u zemlju ili u susjedne objekte/strukture u relativnoj blizini posmatranog visokonaponskog razvodnog postrojenja.

Najvažnije karakteristike udara atmosferskog pražnjenja su [2]:

- Struja atmosferskog pražnjenja,
- Napon koji se javlja pri udaru atmosferskog pražnjenja,
- Talasni oblik struje,
- Polaritet struje,
- Naelektrisanje koje struja atmosferskog pražnjenja odnosno oblak imaju,
- Učestalost pojave atmosferskog pražnjenja.

Struje atmosferskog pražnjenja kreću se od nekoliko kiloampera do preko 250kA, mada su izmjerene i struje reda 400kA. Većina struja, oko 50% čine struje do 20kA dok je procenat struja preko 200kA manji od 1% [2].

Napon koji nastaje pri udaru atmosferskog pražnjenja je teško mjeriti, pa samim tim nije ni podesna veličina za korišćenje kao karakteristika atmosferskog pražnjenja. Vrijednost napona, tj. potencijalne razlike između oblaka i zemlje se procjenjuje da može biti reda nekoliko miliona volti [2].

Još jedna veoma važna karakteristika udara atmosferskog pražnjenja je talasni oblik struje, pri čemu je tu najvažnija strmina čela talasa, tj. brzina kojom se on uspostavlja.

Učestalost pojave atmosferskih pražnjenja zavisi od meteoroloških i lokalnih geografskih uslova. Jedan od najčešće korištenih opštih meteoroloških parametara koji služi

kao mjerilo grmljavinske aktivnosti na nekom području je keraunički nivo, kojim je definisan prosječan broj dana sa grmljavinom u toku vremenskog perioda od jedne godine na tom području [2].

Najopasniji udari atmosferskog pražnjenja sa stanovišta pouzdanosti sistema i naprezanja opreme su direktni udari atmosferskog pražnjenja, kako zbog visokih napona koji se tada javljaju, tako i zbog velikih struja atmosferskog pražnjenja koje pri tome teku. Pored njih, ne toliko manje opasni su i udari atmosferskog pražnjenja u zemlju, npr. negdje u relativnoj blizini voda, tzv. indirektni udari atmosferskog pražnjenja. U tom slučaju u vodu će se pojaviti indukovani naponi, koji takođe nisu zanemarljivi i mogu biti posebno opasni za postrojenja i vodove nižeg napona. Ukupni indukovani prenaponi koji sadrže i električnu i magnetnu komponentu su najčešće niži od 500kV i nisu opasni za vodove viših napona [2].

Direktni udar atmosferskog pražnjenja se prema IEC Std. 62305-1 [10] modeluje kao idealni strujni izvor čiji se parametri baziraju na rezultatima mjerenja datim u [10]. U literaturi [10] je data jednačina koja opisuje promjenu struje u vremenu u vidu dvostruko eksponencijalnog talasnog oblika:

$$I(t) = I_p \cdot (e^{-a \cdot t} - e^{-b \cdot t}) \quad (2)$$

gdje se vrijednosti parametara "a" i "b" dobijaju iz sledećih relacija:

$$a = \frac{0.69}{T_2}, b = \frac{3.24}{T_1} \quad (3)$$

gdje je:

$I_p$  – amplituda struje (A),

$T_1$  – nazivno vrijeme trajanja čela talasa (10 $\mu$ s),

$T_2$  – nazivno vrijeme trajanja začelja talasa (35 $\mu$ s).

Prenaponi atmosferskog porijekla, uzrokovani direktnim ili indirektnim udarom atmosferskog pražnjenja, mogu ozbiljno da ugroze normalnu eksploataciju elektroenergetskog sistema, te je stoga neophodno preduzeti odgovarajuće zaštitne mjere kako bi se zaštitili elementi EES-a. U tu svrhu primjenjuju se različiti zaštitni elementi i uređaji [2]:

- Gromobrani,
- Zaštitna užad,
- Zaštitna iskrišta.
- Odvodnici prenapona.

Objekti na zemlji se od direktnog udara groma štite primjenom gromobrana, koji na sebe primaju direktne udare groma. Oni su svojim donjim krajem vezani za uzemljenje, a postavljaju se u obliku metalne šipke sa vrhom okrenutim naviše [2]. Gromobrani se izvode u obliku metalne šipke ili u obliku mreže provodnika na krovu objekta.

Zaštitna užad se prvenstveno primjenjuju kao zaštitna sredstva u slučaju direktnog udara atmosferskog pražnjenja, ali takođe imaju i određeni uticaj na smanjenje indukovanih prenapona, uzrokovanih indirektnim udarom atmosferskog pražnjenja. Na vodu bez zaštitnih užadi samo mali broj direktnih udara atmosferskog pražnjenja se događa u stub, dok se najveći broj direktnih udara atmosferskog pražnjenja događa u fazni provodnik. Ukoliko je iznad faznih provodnika na vodu postavljeno jedno ili više zaštitnih užadi, u tom slučaju direktni udar atmosferskog pražnjenja može nastati u stub ili u zaštitno uže negdje u rasponu. Tada u oko 40% slučajeva dolazi do pojave direktnog udara atmosferskog pražnjenja u zaštitno uže negdje na rasponu, a u 60% slučajeva u stub [2]. Prilikom direktnog udara atmosferskog pražnjenja u stub na vodu bez zaštitnog užeta, struja atmosferskog pražnjenja otiče kroz stub i njegove uzemljene djelove, dok u slučaju voda koji ima zaštitno uže, struja atmosferskog pražnjenja se dijeli na dio koji otiče preko zaštitnog užeta na obje strane, kao i dio koji otiče stubom. Dakle, prilikom direktnog udara atmosferskog pražnjenja u stub u slučaju voda sa zaštitnim užetom dolazi do smanjenja amplitude prenapona na vodu, u poređenju sa vodom bez zaštitnog užeta, jer dio energije udarnog talasa odlazi preko zaštitnih užadi.

Zaštitna iskrišta se nisu pokazala kao najefikasnije zaštitno sredstvo, jer nemaju komponente za gašenje električnog luka. Tačnije, njih čine dvije metalne elektrode pri čemu se jedna nalazi pod naponom, a druga je na potencijalu zemlje i njihovo međusobno rastojanje u vazduhu je paralelno šticenoj izolaciji. Nailaskom prenapona na međuelektrodnu šupljinu dolazi do preskoka i odvođenja prenapona u zemlju. Svaki ovaj preskok je zemljospoj u mrežama sa neuzemljenim zvjezdištem, odnosno jednopolni kratki spoj u sistemu sa uzemljenim zvjezdištem, koji uzrokuje djelovanje neke druge zaštite što rezultira isključenjem voda [2]. Stoga se zaštitna iskrišta primjenjuju kao dodatno zaštitno sredstvo, najčešće u kombinaciji sa odvodnicima prenapona.

Najefikasnije zaštitno sredstvo od prenapona su odvodnici prenapona. Odvodnici prenapona su uređaji koji su izrađeni od specijalnih poluprovodnih materijala koji imaju nelinearnu karakteristiku napona u funkciji struje. Prilikom nailaska prenapona otpornost odvodnika prenapona se smanjuje čime se dio energije odvodi u zemlju. Kada prenapon prođe, otpornost odvodnika prenapona se povećava i vraća na svoju prvobitnu vrijednost.

Pored prethodno nabrojanih sredstava za zaštitu od atmosferskih prenapona, takođe treba pomenuti i uzemljenje koje čini sastavni dio svih zaštitnih uređaja.

## **2.2. Unutrašnji prenaponi**

Prenaponi koji se pojavljuju u EES-u usled kompleksnih elektromagnetnih procesa čiji je uzrok u samom sistemu se nazivaju unutrašnji ili sklopni prenaponi [2].

Naime, EES je skup oscilatornih kola koja se sastoje od induktivnosti i kapaciteta elemenata (generatora, transformatora, provodnika, kablova, opterećenja priključenih uređaja), a koji mogu da akumuliraju elektromagnetnu i elektrostatičku energiju [11].

Prilikom naglih i brzih promjena radnih uslova i režima i/ili konfiguracije posmatranog EES-a, u njemu se javljaju prelazni procesi. Pomenute prelazne procese prate oscilacije struja i napona koje mogu dostići vrijednosti veće od onih u normalnom pogonu. Vrijednost amplitude sklopnih prenapona zavisi od elektrostatičke i elektromagnetne energije koja se nalazi u EES-u prije pojave prenapona, pa se samim tim ona može proračunati. Za razliku od sklopnih prenapona, vrijednost atmosferskih prenapona se ne može proračunati već se samo može procijeniti, zbog toga što oni zavise od energije atmosferskog pražnjenja.

Prema svom nastanku, unutrašnji prenaponi se dijele na [2]:

- Sklopne (komutacione),
- Rezonantne,
- Ferorezonantne,
- Prenapone izazvane intermitentnim gorenjem luka.

Prenaponi koji nastaju pri sklopnim operacijama, tj uključenjima i isključenjima dijelova EES-a nazivaju se sklopni (komutacioni) prenaponi [12]. Sklopne operacije obavljaju prekidači pri nenamjernim operacijama, usled korektivne reakcije zaštitnih uređaja, ili pri namjernim operacijama operatora EES-a. U literaturi se ne daju modeli ovih prenapona, već samo metode pomoću kojih se mogu proračunati talasni oblici, frekvencija i amplituda prenapona zavisno od topologije i konfiguracije EES-a u kome se razmatra njihov nastanak.

Unutrašnji prenaponi koji nastaju u mrežama kod kojih usled određenog uklopnog stanja ili pri kvaru sopstvena učestanost mreže postaje bliska prinudnoj učestanosti izvora se nazivaju rezonantni prenaponi [12].

Ferorezonantni prenaponi se javljaju u mrežama u kojima nelinearna induktivnost magnećenja transformatora može da stupi u rezonansu sa kapacitivnostima kola. Uslovi za nastanak ferorezonanse se mogu vrlo lako postići, zbog veoma širokog opsega u kome se kreće induktivnost grane magnećenja. Pojava ferorezonanse može da nastupi pri osnovnoj učestanosti, ili pri nekoj višoj ili nižoj harmonijskoj učestanosti [12].

Prenaponi koji nastaju kao posledica nesimetričnih kvarova ili pri nesimetričnom prekidu napajanja u trofaznim mrežama pripadaju grupi prenapona izazvanih intermitentnim gorenjem luka.

Rezonantni, ferorezonantni i prenaponi izazvani intermitentnim gorenjem luka pripadaju grupi privremenih, odnosno povremenih, prenapona. Njihova glavna karakteristika je da imaju duže trajanje od atmosferskih i sklopnih prenapona, koje se kreće u intervalu od nekoliko perioda napona industrijske učestanosti, pa sve i do par sati. Obično nisu mnogo viši od najvišeg napona mreže. Njihova učestanost može biti jednaka industrijskoj učestanosti, a takođe može biti viša ili niža od industrijske učestanosti. Za razliku od sklopnih i atmosferskih prenapona, ovi prenaponi obično ne ugrožavaju izolaciju opreme. Njihove neželjene posledice se ogledaju u problemima koje izazivaju u radu pojedinih uređaja (naponskih mjernih transformatora ili odvodnika prenapona).

### 2.2.1. Sklopni (komutacioni) prenaponi

Sklopni prenaponi pripadaju unutrašnjim prenaponima, a nastaju pri komutacijama visokonaponskim prekidačima bilo u ustaljenom ili havarijskom režimu, kada dolazi do naglih promjena režima u kolu. S obzirom da se ove komutacije vrlo često sprovede u sistemu, to je jasno da je izolacija opreme izložena kumulativnom dejstvu ovih prenapona.

Procjena prenapona do kojih može doći pri komutacijama prekidača je veoma značajna za pouzdan rad elektroenergetskog sistema, posebno sa aspekta izolacije. Ovi sklopni prenaponi, zavisno od karakteristika sistema, mogu dostići veoma visoke vrijednosti. Amplituda i talasni oblik sklopnih prenapona variraju zavisno od parametara sistema i konfiguracije mreže. Čak i u slučaju kad su isti parametri sistema i konfiguracija mreže, sklopni prenaponi veoma zavise i od karakteristika rada prekidača kao i vremenskog trenutka u kojem se desi sklopna operacija (uključenje/isključenje).

Sklopni prenaponi se javljaju praktično pri svakoj manipulaciji prekidačem, bilo da se radi o operaciji uključenja ili operaciji isključenja, npr. : uključenje ili automatsko ponovno uključenje voda, uključenje energetskog transformatora, uključenje kondenzatorske baterije, isključenje nekog od elemenata visokonaponskog razvodnog postrojenja usled kvara ili inicijacije kvara, itd.

Kvarovi koji se najčešće javljaju u elektroenergetskim mrežama sa nadzemnim vodovima su prolazni ili privremeni kvarovi. Privremeni kvarovi spontano nestaju. Najčešće su to kvarovi u mrežama sa izolovanim zvjezdištem, gdje se električni luk može spontano gasiti pri jednofaznom kratkom spoju. Sa druge strane, da bi se eliminisali kvarovi koji nastaju na nadzemnim vodovima kod kojih ne dolazi do spontanog gašenja luka, neophodno je isključiti i ponovo uključiti prekidač.

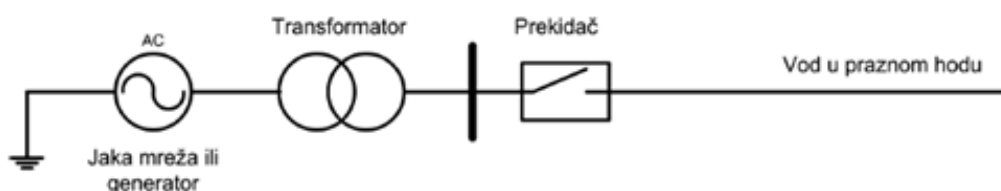
Jednofazni kvarovi čine preko 90% od svih kvarova koji nastaju u elektroenergetskim mrežama [13]. U mreži sa uzemljenom neutralnom tačkom svaki prolazni jednofazni kvar prouzrokuje proticanje velike struje kratkog spoja kroz mjesto kvara. Električni luk se ne može sam od sebe ugasiti, osim postupkom isključenja i ponovnog uključenja voda, ukoliko se kvar u mreži sa uzemljenom neutralnom tačkom uspostavio preko električnog luka. Nakon pomenutog isključenja i uključenja voda sistem može da nastavi nesmetan rad. Ako je mjesto kratkog spoja na početku voda u blizini postrojenja, mogu se pojaviti značajni prenaponi prilikom isključenja kratkog spoja. Ukoliko su prekidači opremljeni sistemom automatskog ponovnog uključenja tada se mogu pojaviti prenaponi različitih vrijednosti nakon ponovnog uključenja, u zavisnosti od uslova na vodu nakon isključenja kratkog spoja.

U mrežama sa dominantnim brojem nadzemnih vodova i sa zvjezdištem uzemljenim preko nisko omske otpornosti ili sa direktno uzemljenim zvjezdištem, broj kvarova koji nastaju na nadzemnim vodovima, a koje je moguće eliminisati isključenjem i automatskim ponovnim uključenjem prekidača može biti veoma veliki. Vod može normalno da funkcioniše kao i prije kvara, ukoliko se nakon kratke beznaponske pauze ponovo uključi. Postoje dvije vrste isključenja sa brzim automatskim ponovnim uključenjem [13]: monofazno (kada se isključuje samo faza koja je u kvaru) i trofazno (kada se isključuju sve tri faze). Sprovođenje monofaznog isključenja sa brzim APU zahtijeva da prekidači, koji se primjenjuju u mrežama, imaju mehanizam za pokretanje kontakata nezavisan za svaki pol prekidača. Takvi prekidači se obično primjenjuju u visokonaponskim mrežama. Prekidači

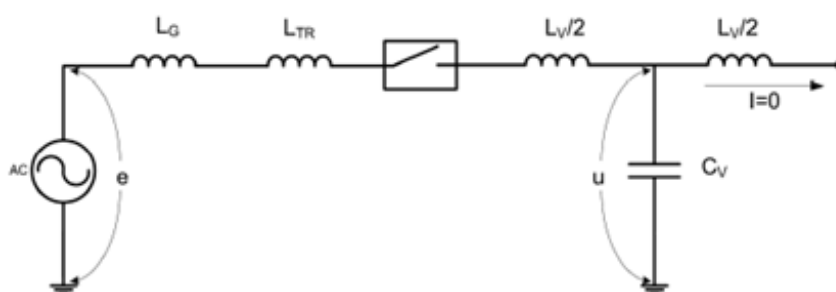
koji se primjenjuju u srednjenaponskim mrežama po pravilu imaju jedan pogonski mehanizam za sva tri pola. Primjenom jednopolnog isključenja sa brzim APU stabilnost rada sistema je mnogo manje narušena, a takođe i značajno smanjeni poremećaji u napajanju potrošača, u poređenju sa primjenom tropolnog isključenja [13].

U nastavku će biti prikazan proračun, primjenom kojeg se može izračunati amplituda sklopnog prenapona uzrokovanog uključanjem ili automatskim ponovnim uključanjem voda u praznom hodu. U slučaju APU voda, na njemu će postojati zaostalo naelektrisanje čija vrijednost zavisi od dužine beznaponske pauze. Ukoliko je beznaponska pauza dovoljno duga, na vodu neće postojati zaostalo naelektrisanje, tj. u tom slučaju dolazi do potpunog rasterećenja voda.

Posmatra se sistem, prikazan na slici 2., koga čine: generator, transformator i vod. Ekvivalentna jednopolna zamjenska šema posmatranog sistema je prikazana na slici 3.



Slika 2. Posmatrani sistem u slučaju uključanja voda.



Slika 3. Zamjenska šema posmatranog sistema.

Neposredno prije uključanja važe sledeći početni uslovi:

- $i(0)=0$  – struja kroz kolo je jednaka nuli,
- $u(0)=U_0$  – na vodu postoji ili ne postoji zaostalo naelektrisanje, zavisno od dužine beznaponske pauze, izraženo naponom  $U_0$ .

Diferencijalne jednačine po II Kirhofovom zakonu, za kolo sa slike 3., je [2]:

$$e - L \frac{di}{dt} - u = 0 \quad (4)$$

$$u = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i dt = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i dt + \frac{1}{C} \int_0^t i dt \quad (5)$$

$$u = U_0 + \frac{1}{C} \int_0^t i dt \quad (6)$$

$$L = L_G + L_T + \frac{L_V}{2} \quad (7)$$

$$C = C_V \quad (8)$$

gdje je:

$e$  – elektromotorna sila izvora (V),

$u$  – napon na posmatranoj fazi voda (V),

$i$  – struja u posmatranoj fazi voda (A),

$L_G$  – induktivnost generatora (H),

$L_T$  – induktivnost transformatora (H),

$L_V$  – induktivnost voda (H),

$C_V$  – kapacitivnost voda (F),

$U_0$  – zaostali napon na posmatranoj fazi voda neposredno prije uključenja prekidača.

Prelaskom iz vremenskog domena u domen Laplasove transformacije, i rješavanjem sistema jednačina (4) i (6) može se dobiti konačan izraz za Laplasovu transformaciju napona. Sada se inverznom Laplasovom transformacijom može dobiti izraz za napon u vremenskom domenu [2]:

$$u(t) = Ek_f \cos(\omega t + \varphi) + (U_0 - Ek_f \cos \varphi) \cos(\omega_1 t) \quad (9)$$

$$k_f = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2} \quad (10)$$

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (11)$$

gdje je:

$k_f$  – sačinilac povećanja napona usled Ferantijeveg efekta,

$\omega_1$  – učestanost prigušenja (kada je  $\omega = \omega_1$  tada vod pada u rezonantnu učestanost [12]).

Prvi član u izrazu (9) predstavlja stacionaranu komponentu napona ( $U_{stac}$ ), i u slučaju kada ne bi bilo prelaznog procesa, ovaj napon bi vladao u kolu. Drugi i treći član u izrazu (9)



predstavljaju prelaznu komponentu napona ( $U_{\text{prel}}$ ). Kako u sistemu uvijek postoje omski otpori vodova i transformatora, prelazna komponenta napona se prigušuje.

U slučaju da se uzima u obzir i prigušenje, prelazna komponenta napona ima sledeći oblik [2]:

$$U_{\text{prel}} = (U_0 - Ek_f \cos \varphi) \cos(\omega_1 t) \cdot e^{-\delta t} \quad (12)$$

$$\delta = \frac{1}{2} \cdot \frac{L}{R} \quad (13)$$

$$R = R_G + R_T + \frac{R_V}{2} \quad (14)$$

gdje je:

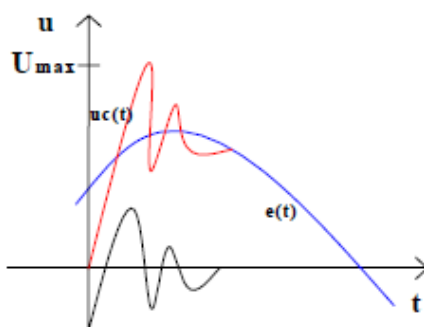
$\delta$  – koeficijent prigušenja,

$R_G$  – otpornost generatora ( $\Omega$ ),

$R_T$  – otpornost transformatora ( $\Omega$ ),

$R_V$  – otpornost voda ( $\Omega$ ).

Primjer talasnog oblika prenapona koji nastaje prilikom uključanja voda u praznom hodu je prikazan na slici 4. [12].



Slika 4. Prikaz maksimalnog prenapona pri uključanju voda u praznom hodu.

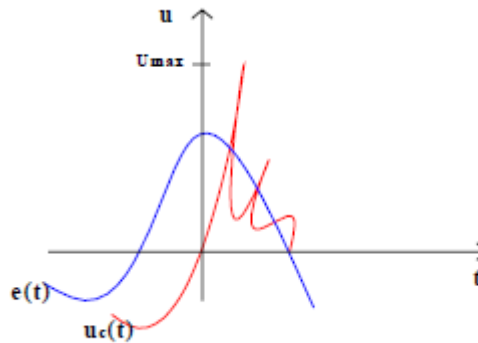
Osim sklopnih prenapona koji nastaju kao posledica uključanja prekidača, u sistemu se javljaju i sklopni prenaponi koji nastaju kao posledica isključenja prekidača. Kada se isključuje vod u kratkom spoju, koji se dogodio na početku voda, pojavljuju se prenaponi u postrojenju i to na strani sa koje se isključuje kratki spoj. Pomenuti prenaponi se javljaju zbog nagle promjene struje kroz ukupnu induktivnost sistema. Slično prethodno objašnjenom izvođenju izraza za vremenski oblik napona prilikom uključanja voda (9), dobija se i vremenski oblik napona za slučaj isključenja voda u kratkom spoju [2]:

$$u(t) = Ek_f \cos(\omega t + \varphi) - Ek_f \cos(\varphi) \cos(\omega_1 t) + Ek_f \frac{\omega}{\omega_1} \sin(\varphi) \sin(\omega_1 t) \quad (15)$$

I ovdje je neophodno uzeti u obzir prigušenje i tada prelazna komponenta napona ima sledeći oblik [2]:

$$U_{\text{prel}} = \left[ Ek_f \cos(\varphi) \cos(\omega_1 t) + Ek_f \frac{\omega}{\omega_1} \sin(\varphi) \sin(\omega_1 t) \right] e^{-\delta t} \quad (16)$$

Primjer talasnog oblika prenapona koji nastaje pri isključenju voda u kratkom spoju je prikazan na slici 5. [12].



Slika 5. Prikaz maksimalnog prenapona pri isključenju voda u kratkom spoju.

### 3. VISOKONAPONSKI PREKIDAČI

Jedan od osnovnih, a ujedno i veoma značajnih, elemenata svakog visokonaponskog razvodnog postrojenja su prekidači snage. Pouzdanost prekidača snage je veoma važna, jer od nje zavisi i rad visokonaponske opreme koju on štiti. Jedan od ključnih preduslova za normalno funkcionisanje elektroenergetskog sistema je dobro pogonsko stanje prekidača snage.

Osnovne funkcije prekidača su uključenje i isključenje kola u normalnom pogonu i isključenje kola, tj. prekidanje struje u uslovima kvara. Kako bi se što više smanjila naprezanja i eventualna oštećenja opreme, poželjno je da prekidač ima što kraće vrijeme isključenja, tj. da vrlo brzo prekine struju kratkog spoja. Vrijeme isključenja struje kratkog spoja kod savremenih prekidača je reda 40-60ms [14].

Prekidačke komore su ispunjene izolacionim sredstvima, izolacionim uljem ili SF<sub>6</sub> gasom, čija je uloga gašenje električnog luka koji se stvara prilikom razdvajanja kontakata prekidača.

Kada se govori o visokonaponskim prekidačima može se zaključiti da je veliki napredak ostvaren poslednjih desetak godina, kada je došlo do velikih poboljšanja kako u tehnologiji tako i u njihovoj samoj konstrukciji [15]. Broj komponenata visokonaponskih prekidača i energija pogonskog mehanizma su značajno smanjeni, zahvaljujući razvoju novih tehnika prekidanja struje i optimizaciji dimenzija prekidačke komore. Pored toga, uvode se i inteligentni sistemi tako da se već postojećim funkcijama kontrole, koje se sprovode konvencionalnim sekundarnim sistemima, dodaju nove funkcije, dijagnostika i kontinuiran monitoring.

Zahvaljujući razvoju novih tehnika isključenja, kao i optimizaciji dimenzija prekidačke komore, značajno je smanjena energija potrebna za uključenje visokonaponskog prekidača. Kao posledica smanjenja pogonske energije smanjuju se i mehanička naprezanja, manje je i trošenje, pa je samim tim povećana mehanička trajnost [15]. Takođe, značajno je smanjen i broj komponenata pogonskog mehanizma usled upotrebe jednostavnih opružnih mehanizama, što je dovelo do povećanja pouzdanosti prekidača.

Razvoj optičkih senzora i mikroprocesorske tehnike omogućio je kontinuiran monitoring i mjerenje veličina koje su bitne za rad visokonaponskog prekidača. Informacije dobijene na ovaj način se analiziraju i filtriraju. Samim tim, moguće je pravovremeno otkriti potencijalne nepravilnosti i spriječiti veći kvar prekidača.

Visokonaponski prekidači snage spadaju u jedne od brojnih elemenata elektroenergetskog sistema koje je potrebno redovno održavati. Razlog zbog kojeg ih je neophodno održavati, tj. redovno servisirati navedenu opremu je pouzdan rad sistema u

uslovima kvara, kako bi ostatak visokonaponske opreme bio zaštićen od havarije. Samim tim, neophodno je tokom cijelog životnog ciklusa prekidača sprovoditi redovni monitoring, kao i preventivno održavanje. Remont se sprovodi u tačno određenim vremenskim razmacima ili se pak ponekad mora izvršiti i ranije zbog dostignutog graničnog broja isključenja usled djelovanja zaštite [16].

Prije samog ispitivanja prekidača neophodno je ustanoviti u kakvom stanju se on nalazi. To se postiže upoređivanjem izmjerenih veličina sa definisanim referentnim vrijednostima, za šta se koriste već pripremljene tabele koje sadrže referentne podatke. Te tabele dobijaju se od strane proizvođača VN prekidača. Pri redovnom ispitivanju prekidača jedan od ključnih parametara koji se mjeri, a na osnovu kojeg se stiče slika o stanju samih kontakata prekidača je otpornost glavnih kontakata prekidača [16]. Takođe, mjere se i ostali parametri [16]: vrijeme navijanja opruge motora, struje kalemova uklopa i isklopa, brzina uklopa, brzina isklopa prekidača, kao i hod kontaktne šipke.

Pored prethodno pomenutih parametara koji se mjere pri redovnom ispitivanju prekidača, u određenim situacijama se može procjeniti da je neophodno izvršiti i kontrolu sistema izolacije. Primjer je SF<sub>6</sub> gas kod savremenih prekidača. Naime, tokom perioda eksploatacije i gašenja struje kvara SF<sub>6</sub> gas može da izgubi svoja dielektrična svojstva. Pri svakom gašenju luka, kao posledica djelovanja samog luka, stvaraju se produkti razlaganja SF<sub>6</sub> gasa, a zatim i nemogućnost regenerisanja kompletne količine gasa u polu prekidača. Uređaji koji se koriste u ovu svrhu, tzv. analizatori gasa, su uređaji za mjerenje vlažnosti SF<sub>6</sub> gasa, kao i uređaji za mjerenje sadržaja, tj. čistoće SF<sub>6</sub> gasa [16].

Nakon završenog ispitivanja vrši se analiza dobijenih vrijednosti, kao i pregled uputstava koja su data od strane proizvođača i na osnovu toga se dalje donosi odluka da li je neophodno izvršiti intervencije na prekidaču snage ili ne. Dobijeni parametri se pored referentnih upoređuju i sa parametrima dobijenim prilikom poslednjeg ispitivanja, pri pa se tako može zaključiti da li je došlo do veće promjene određenih parametara [16].

### **3.1. Vrste prekidača**

Isključenje strujnog kola uzrokuje pojavu električnog luka između kontakata prekidača. Temperatura u jezgru luka dostiže i do 20 000°K [17], a zbog tako velike temperature dolazi do djelimičnog topljenja kontaktnog materijala na kontaktima prekidača, čime međukontakti prostor postaje provodan. Stoga, iako su kontakti prekidača otvoreni struja i dalje protiče, kao posledica održavanja električnog luka. Gašenje električnog luka je veoma složen proces na koji utiču razne pojave, i to [17]: hemijske, električne, magnetne, termodinamičke i hidrodinamičke. Od medijuma za gašenje električnog luka i vrste prekidača zavisi koja će od prethodno pomenutih pojava preovladati i preuzeti glavni uticaj na gašenje luka. U svakom slučaju, za gašenje luka potrebno je što prije smanjiti energiju luka što se postiže povećavanjem razmaka među kontaktima prekidača, čime se obezbjeđuje udaljenost pri kojoj će se luk ugasiti, a koja je i istovremeno dovoljna da se spriječi njegovo ponovno paljenje [17]. Takođe, neophodno je obezbjediti intezivno odvođenje toplote iz međukontaktnog prostora. Najpogodniji trenutak za gašenje električnog luka je vremenski

trenutak prolaska struje kroz nulu. Tada je takođe neophodno da napon koji je potreban za ponovno paljenje luka bude veći od napona mreže [17]. Samim tim, neće doći do ponovnog paljenja luka i gašenje će biti postignuto.

Jedna od podjela visokonaponskih prekidača je prema medijumu za gašenje električnog luka u koje spadaju: vazduh, ulje, komprimirani vazduh, voda, vakuum, gas, sumpor-heksafluorid i dr. medijumi. Stoga se razlikuju [18]:

- Prekidači sa vazдушnim gašenjem luka,
- Pneumatski prekidači,
- Prekidači sa magnetnim oduvavanjem luka,
- Uljni prekidači,
- Malouljni prekidači,
- Hidromatski (ekspanzioni) prekidači,
- Vakuumski prekidači,
- SF<sub>6</sub> prekidači (prekidači sa sumpor-heksafluoridom).

Kod navedenih tipova prekidača koristi se jedno ili istovremeno više sredstava za gašenje električnog luka, kao što su: podjela električnog luka na više kratkih lukova, dodir luka sa dielektrikom, produženje električnog luka djelovanjem magnetnog polja, povećanje razmaka između kontakata prekidača, strujanje gasova i tečnosti uzdužno ili poprečno na električni luk.

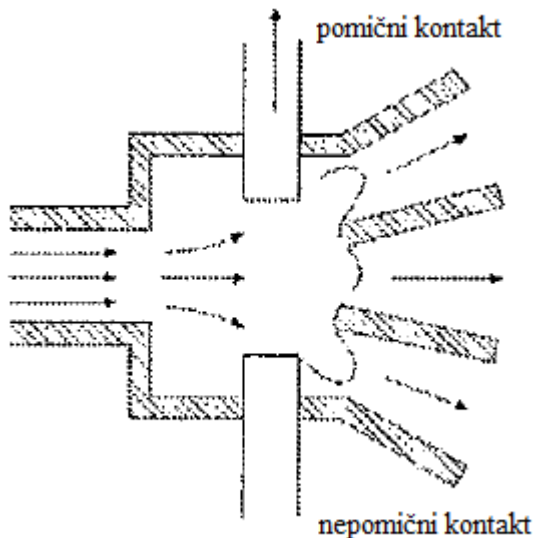
### **3.1.1. Prekidači sa vazдушnim gašenjem luka**

Brzim otvaranjem kontakata prekidača stvara se električni luk koji, u slučaju ovog tipa prekidača, gori u vazduhu na atmosferskom pritisku. Kao posledica djelovanja magnetnog polja stvorenog oko njega, kao i zagrijavanja luka toplim vazduhom, on se produžuje i mijenja svoj položaj. Zbog prethodno pomenutog produžavanja električnog luka, u prekidačima kod kojih se primjenjuje vazdušno gašenje luka, neophodno je obezbjediti dovoljno veliko rastojanje između kontakata i uzemljenih djelova [17]. Samim tim se tokom trajanja električnog luka sprečava mogućnost pojave kratkih spojeva bilo preko metalnih dijelova kućišta, bilo neposredno među fazama. Stoga se prekidači sa vazдушnim gašenjem luka ne primjenjuju na većim naponskim nivoima, već je njihova primjena ograničena na srednji napon do najviše 30kV, i to u izvedbi rastavljača na stubu [17]. Kako nemaju mogućnost da prekinu velike vrijednosti struja, ovi prekidači se obično primjenjuju samo u slučajevima uključenja i isključenja transformatora u praznom hodu, kao i neopterećenih vodova.

### **3.1.2. Pneumatski prekidači**

Kao medijum za gašenje električnog luka kod pneumatskih prekidača se primjenjuje vazduh pod pritiskom, koji se proizvodi u posebnom kompresorskom uređaju ili postrojenju. Komprimirani vazduh se dovodi u komoru za gašenje luka, gdje se nakon otvaranja pomičnog kontakta prekidača mlaznicom usmjerava prema električnom luku [18]. Zavisno od pravca djelovanja, komprimirani vazduh struji uzdužno ili poprečno na luk, čime se luk hladi

i produžuje. Na slici 6. prikazan je princip rada pneumatskog prekidača sa poprečnim strujanjem vazduha na luk [17].

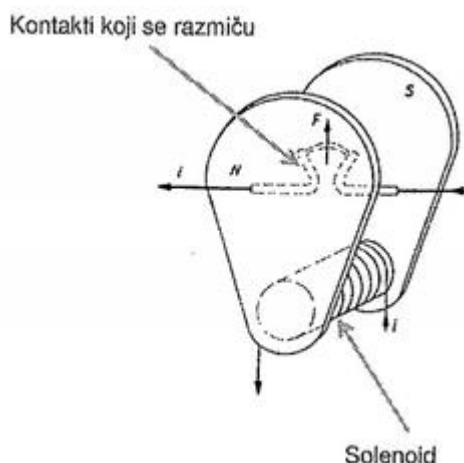


Slika 6. Komora za gašenje luka komprimiranim vazduhom u kojoj vazduh struji poprečno na luk.

Pri prolasku struje kroz nultu vrijednost uspostavlja se ista dielektrična čvrstoća u cijelom međukontaktom prostoru. Kako je za više napone potrebna ogromna količina komprimiranog vazduha, čime bi i dimenzije komore bile relativno velike, primjena pneumatskih prekidača je ograničena za napone do 15kV [17]. Međutim, primjena ovih prekidača je moguća i za više napone, pri čemu je potrebno obezbjediti više prekidnih mjesta električnog luka što se postiže rednim vezivanjem potrebnog broja komora. Jedna komora za gašenje luka kod pneumatskog prekidača može prekinuti struju u kolu napona do 60kV [17].

### 3.1.3. Prekidači sa magnetnim oduvavanjem luka

Na slici 7. je prikazan princip rada prekidača sa magnetnim oduvavanjem električnog luka [17]. Struja "i", koju je potrebno prekinuti, protiče kroz solenoid (kalem) koji je redno vezan sa kontaktima prekidača. Proticanje struje kroz solenoid stvara magnetno polje koje se zatvara preko polova N-S i koje prolazi preko rogova kontakata koji se razmiču [18]. Na električni luk, između kontakata koji se razmiču, magnetno polje djeluje silom F. Pod uticajem dejstva sile F električni luk biva potisnut na rogove kontakata, produžuje se, a zatim i gasi.



Slika 7. Princip rada prekidača sa magnetnim oduvavanjem električnog luka.

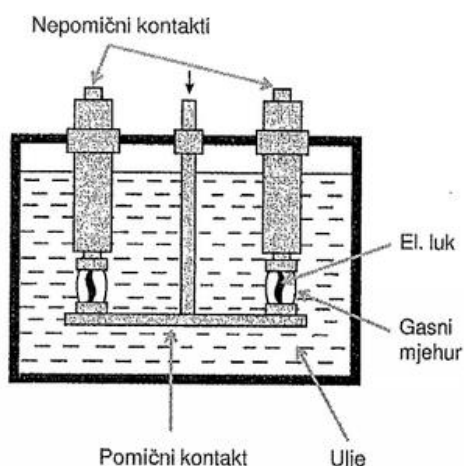
Ukoliko se usled djelovanja magnetnog polja električni luk dovede u uski otvor između ploča od izolacionog materijala, čime će se postići neposredni dodir luka i hladnog izolacionog materijala, mogu se znatno poboljšati performanse prekidača u pogledu gašenja luka [18]. Takođe, primjenom povoljnih konstruktivnih rješenja može se postići dalje poboljšanje performansi prekidača. Ideja se zasniva na razbijanju električnog luka na više manjih lukova, koji gore u uskim otvorima, čime se postiže produženje luka. Ovi prekidači se ne mogu primjenjivati za više napone, jer bi tada bio potreban veliki broj redno vezanih prekidnih elemenata po polu, što značajno poskupljuje i komplikuje samu izvedbu prekidača. Stoga se ovi prekidači primjenjuju za naponske nivoe do 24kV [17].

### 3.1.4. Uljni prekidači

Uljni prekidači predstavljaju najstariju vrstu prekidača za visoki napon, koja se zbog svojih brojnih nedostataka više ne proizvodi.

Medijum za gašenje električnog luka kod ovog tipa prekidača je ulje, koje istovremeno služi i kao izolacija djelova pod naponom kod najjednostavnijih tipova ovih prekidača. Za napone do 38kV polovi sve tri faze prekidača su smješteni u zajedničkom kotlu (sudu), u kojem se nalazi velika količina ulja [14]. Izvedba je nešto drugačija kod viših napona, gdje je neophodno za svaki pol prekidača obezbjediti poseban kotao. Na ovaj način eliminiše se rizik pojave kratkog spoja među polovima, a takođe i smanjuje potrebna količina ulja. Međutim, i pored toga za jedan pol uljnog prekidača naponskog nivoa 220kV potrebno je obezbjediti količinu ulja od oko 20t [17].

Na slici 8. je predstavljen princip rada uljnog prekidača, naime prikazan je jedan pol [18]. Pomjeranjem pomičnog kontakta prekidača naniže u međukontaktom prostoru se stvara električni luk koji, usled visoke temperature, uzrokuje isparavanje ulja i stvaranje gasnih mjehura. Prostor u sudu ispunjen parama se povećava sa povećanjem rastojanja između kontakata. Stoga se nivo ulja u sudu sve više podiže, uz istovremeno strujanje gasova kroz otvor na poklopcu prekidača. Električni luk će se ugasiti prije nego što ulje počne da izlazi kroz otvor na poklopcu, ukoliko je prekidač dobro konstruisan.



Slika 8. Princip rada uljnog prekidača.

Prekidna moć prekidača se može povećati, a da u tom slučaju dimenzije prekidača ostanu gotovo nepromjenjene. To se postiže primjenom komore za gašenje na svakom polu prekidača, koja obezbjeđuje prinudno hlađenje električnog luka [17].

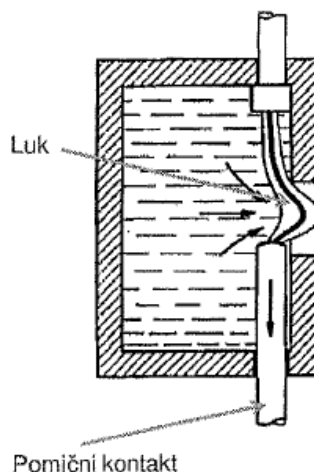
Jedan od velikih nedostataka ovih prekidača, zbog kojih se oni više ne proizvode, jeste opasnost od eksplozije koja može izazvati velike materijalne štete u visokonaponskom razvodnom postrojenju. Do eksplozije može doći usled previsoke temperature gasova sakupljenih iznad površine ulja, kao i zbog oštećenja kotla [18]. Osim toga, neophodno je redovno pročišćavanje ulja, jer se kao posledica gorenja električnog luka u njemu stvara čađ.

### 3.1.5. Malouljni prekidači

Kako je i pomenuto u prethodnom potpoglavlju, ulje se pokazalo kao dobar medijum za gašenje električnog luka, ali je kod uljnih prekidača problem bio u tome što su bile neophodne velike količine ulja, što je dovodilo do opasnosti od eksplozije. Stoga je došlo do unapređenja uljnih prekidača, i do pojave malouljnih prekidača. Kod malouljnih prekidača ulje služi samo kao medijum za gašenje električnog luka, a ne služi za izolaciju među fazama i prema masi, već se u tu svrhu koriste vazduh, porculan ili neki drugi kruti izolacioni materijal [18]. Samim tim je značajno smanjena količina ulja po polu prekidača, a istovremeno iskorištena dobra svojstva ulja kao medijuma za gašenje luka.

U zavisnosti od konstrukcije komore za gašenje luka, primjenjuje se princip uzdužnog ili poprečnog oduvavanja. Na slici 9. prikazan je princip rada malouljnog prekidača sa poprečnim oduvavanjem električnog luka [17].





Slika 9. Princip rada malouljnog prekidača sa poprečnim oduvavanjem električnog luka.

U zatvorenoj komori dolazi do pojave gorenja luka neposredno nakon otvaranja kontakata. Visoka temperatura luka izaziva isparavanje ulja i dovodi do porasta pritiska uljnih gasova u komori. Nakon što pomični kontakt oslobodi otvor na komori doći će do intenzivnog strujanja gasova preko luka, usled čega dolazi do izduženja luka i njegovog gašenja [17].

Sa povećanjem broja prekidnih elemenata po polu, omogućena je primjena ovih prekidača i na višim naponskim nivoima, gdje su oni dugo vremena bili vodeća tehnologija u oblasti sklopne tehnike [18].

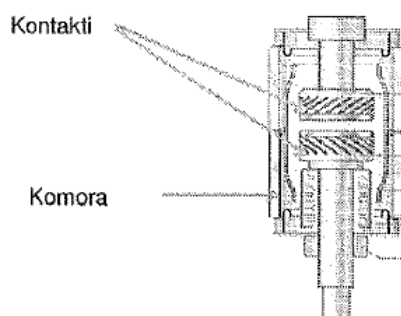
### 3.1.6. Hidromatski (ekspanzioni) prekidači

Princip rada hidromatskih prekidača je identičan prethodno opisanom principu rada malouljnih prekidača. Jedina razlika je u tome što je kod ovih prekidača medijum za gašenje električnog luka destilovana voda, a ne ulje [17]. Kako bi se spriječilo smrzavanje vode, što je naročito važno za postrojenja vanjske izvedbe, dodaje se glikol. Na ovaj način dobija se smješa tzv. hidrin, pa otuda potiče i sam naziv ovih prekidača – hidromatski [14]. Osim što snižava tačku smrzavanja vode, glikol povećava količinu para za vrijeme trajanja električnog luka, koje veoma povoljno utiču na njegovo gašenje.

### 3.1.7. Vakuumski prekidači

Vakuumski prekidači su mehanički najjednostavniji prekidači snage, koji su se u posljednje tri decenije 20. vijeka intenzivno primjenjivali i samim tim potisnuli primjenu ostalih tipova prekidača u srednjenaponskim mrežama. I pored toga što imaju najbolje karakteristike u prekidanju struje, osnovni nedostatak ovih prekidača je njihov nazivni napon koji je ograničen na 36kV [18]. Primjena ovih prekidača na višim naponskim nivoima sa više prekidnih mjesta, iako je bila tehnički moguća, nije postignuta iz ekonomskih razloga [14].

Vakuumska komora ili vakuumska boca predstavlja osnovni dio vakuumnog prekidača. Ona se obično gradi od neporoznog keramičkog ili staklenog materijala, mada postoje i komore čiji su pojedini dijelovi metalni. Pritisak vakuuma koji vlada u komori je reda  $10^{-7}$  bara, i u njoj se nalaze pomični i nepomični kontakt, što je prikazano na slici 10. [18].



Slika 10. Vakuumski prekidač.

Za razliku od drugih sredina u kojima električni luk po svojoj prirodi pretpostavlja postojanje elektrona i pozitivnih jona, pri procesu prekidanja električnog luka u vakuumu postoje samo joni koji se izdvajaju iz kontakata prekidača [14]. Proces jonizacije prestaje neposredno prije prolaska struje kroz nulu, nakon čega dolazi do pojave nagle kondenzacije metalnih para. Ekran, koji se nalazi u vakuumskoj komori, služi kao podloga za sakupljanje kondenzovanog metala iz metalnih para koje se javljaju pri gorenju električnog luka. Ukoliko je konstrukcija vakuumnog prekidača takva da je zid komore od metala, u tom slučaju poseban ekran ne postoji [19]. Smanjivanjem struje koja se prekida smanjuje se i temperatura električnog luka i dolazi do kondenzacije jednog dijela metalnih para. Do potpune kondenzacije metalnih para po zidovima komore, na kontaktima i posebno na, za tu svrhu predviđenom, ekranu, dolazi prilikom prolaska struje kroz nulu [19]. Samim tim, sredina u kojoj električni luk može da gori nestaje, pa se zbog toga luk gasi.

Dielektrična čvrstoća se vrlo brzo uspostavlja u međukontaktinom prostoru, jer je vakuum izuzetno efikasna sredina za prekidanje električne struje. Vakuumski prekidač prekida struju uglavnom prilikom njenog prvog prolaska kroz nulu, pa je stoga i vrijeme prekidanja značajno manje u poređenju sa ostalim tipovima prekidača [14]. Rizik od pojave požara i eksplozije je gotovo zanemarljiv. Hod kontakata kod vakuumskih prekidača je znatno manji u poređenju sa drugim tipovima prekidača. Razlog manjeg hoda kontakata je vrlo velika dielektrična izdržljivost vakuuma. Takođe, kontakti vakuumskih prekidača su uvijek čisti i praktično ih nije potrebno održavati, jedino je neophodno redovno sprovoditi revizije prekidačkog pogonskog mehanizma, što rezultira njihovim veoma dugim eksploatacionim vijekom. Još jedna od prednosti vakuumskih prekidača je i tihi, bešuman, rad, kao i veoma male dimenzije i težina [18].

### 3.1.8. SF<sub>6</sub> prekidači

SF<sub>6</sub> prekidači kao medijum za gašenje električnog luka koriste SF<sub>6</sub> gas (sumporheksafluorid). SF<sub>6</sub> je hemijski stabilan gas, nije zapaljiv i nije otrovan i bez boje, ukusa i mirisa je. Gustina mu je 5 puta veća od vazduha, a dielektrična čvrstoća na atmosferskom pritisku mu je 2.35 puta veća od vazduha [18]. Odlično odvodi toplotu, toplotno provodljivost mu je 2 – 2.5 puta veća od vazduha [18]. U procesu gašenja električnog luka efikasniji je od vazduha oko 100 puta [18].

Dva su osnovna razloga zbog kojih gas sumporheksafluorid posjeduje izuzetne dielektrične karakteristike. Znatno veće dimenzija molekula gasa SF<sub>6</sub>, u poređenju sa dimenzijama molekula azota ili kiseonika, su prvi razlog [14]. Drugim riječima, efektivna površina poprečnog presjeka molekula gasa SF<sub>6</sub> veća je za elektrone ubrzane usled dejstva električnog polja, i samim tim izaziva veći broj sudara po jedinici pređenog puta elektrona u poređenju sa molekulima gasova iz sastava vazduha. Isti krajnji efekat bi se postigao u slučaju da su molekuli gasova iz sastava vazduha bili na povećanom pritisku. Efekat udarne jonizacije je znatno slabije izražen u poređenju sa vazduhom pri istom pritisku, jer dolazi do mnogo većeg broja sudara elektrona, pa samim tim i do njihovog efikasnijeg usporavanja.

Karakteristika elektro-negativnosti molekula gasa SF<sub>6</sub> je drugi razlog zbog kojeg pomenuti gas ima izuzetne dielektrične karakteristike [14]. Naime, molekuli gasa SF<sub>6</sub> imaju sposobnost prihvatanja slobodnih elektrona formirajući na taj način slabo pokretljive jone, čime se proces udarne jonizacije usporava. Sa druge strane, dolazi do pojave velikog broja sudara, zbog velikog efektivnog poprečnog presjeka molekula gasa SF<sub>6</sub>, u kojima praktično dolazi do zarobljavanja svih slobodnih elektrona, čime se formiraju teški negativni joni.

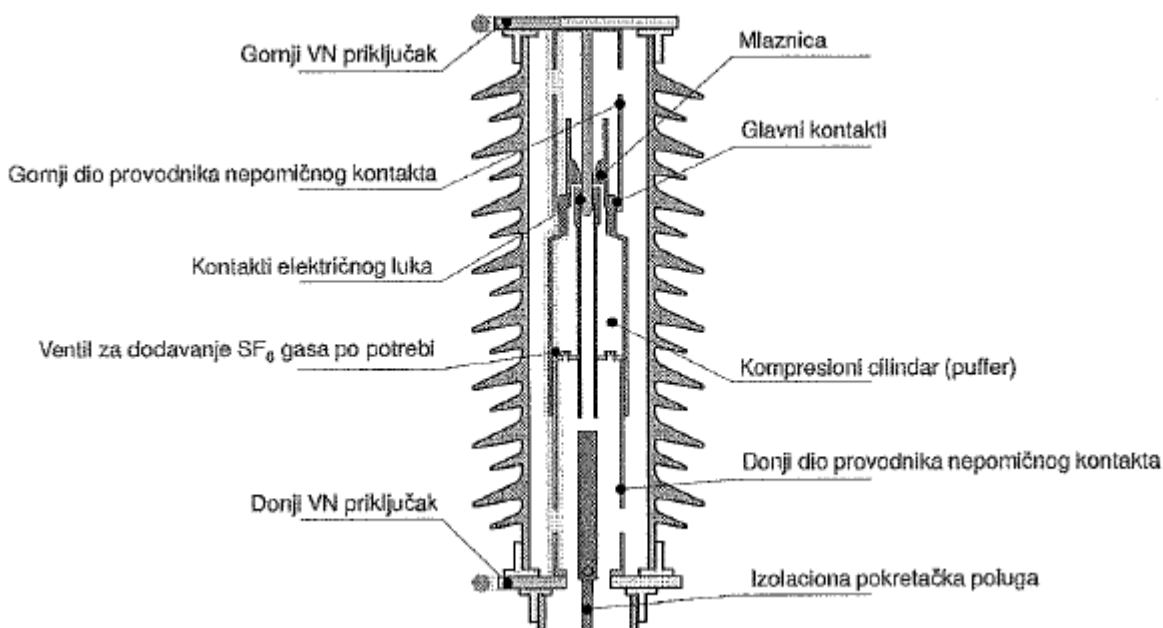
Do popunjenja molekula gasa SF<sub>6</sub> u njegovoj poslednjoj elektronskoj putanji nedostaje jedan elektron. Zbog toga molekuli gasa imaju izraženo privlačno djelovanje za elektrone. Sve prethodno pomenute osobine su se pokazale kao izuzetno povoljne za primjenu SF<sub>6</sub> gasa kao izolacionog sredstva. Iako postoje i drugi gasovi, među kojima je freon [14], koji sadrže atome fluora sa sličnim karakteristikama, odlike SF<sub>6</sub> gasa su jedinstvene u procesu gašenja električnog luka.

U zavisnosti od načina na koji se prekida električni luk u SF<sub>6</sub> tehnologiji postoje sledeći tipovi prekidača [14]:

- dvopritisni SF<sub>6</sub> prekidači,
- autopneumatski SF<sub>6</sub> prekidači (jednopritisni SF<sub>6</sub> prekidači na potisnom principu),
- autoekspanzioni SF<sub>6</sub> prekidači (SF<sub>6</sub> prekidači sa samooduvavanjem),
- SF<sub>6</sub> prekidači sa rotirajućim lukom (sa magnetnom rotacijom luka).

Dvopritisni SF<sub>6</sub> prekidači se danas praktično više ne koriste, kako zbog njihove komplikovane konstrukcije, tako i zbog potrebe za komprimovanjem zalihe gasa. Ponekad se upotrebljavaju pojedini tipovi kao npr. kombinacija autoekspanzionog sa magnetnim rotiranjem luka, ili kombinacija autoekspanzionog i autopneumatskog [19].

Na slici 11. prikazani su sastavni djelovi jednopritisnog autopneumatskog SF<sub>6</sub> prekidača [18].

Slika 11. Sastavni dijelovi autopneumatskog SF<sub>6</sub> prekidača.

Prilikom otvaranja kontakata prekidača dolazi do pojave kretanja pokretnog kontakta, zajedno sa klipom, u kompresionom cilindru. U prethodno pomenutom kompresionom cilindru se sabija SF<sub>6</sub> gas, koji će obaviti funkciju oduvavanja električnog luka [19]. Potrebnu energiju za oduvavanje luka daje mehanizam za pokretanje kontakata, pa je samim tim pomenuta energija nezavisna od intenziteta struje koja se prekida.

Prva faza u principu rada SF<sub>6</sub> prekidača predstavlja vođenje struje prije početka prekidanja, i tada su zatvoreni i glavni i lučni kontakti [19]. U drugoj fazi struja i dalje protiče kroz lučne kontakte, dok glavni kontakti počinju da se razmiču. U komori za sabijanje se sabija gas, ali je odvod za oduvavanje električnog luka u mlaznici zatvoren pokretnim kontaktom. Pritisak u kompresionom cilindru se ne smanjuje, jer je zatvoren ventil na klipu [19]. U trećoj fazi se otvaraju kontakti za ispuštanje komprimovanog gasa, kao i do razdvajanja lučnih kontakata. Kao posledica toga, komprimovani gas struji preko luka i vrši dejonizaciju do njegovog potpunog gašenja [19].

### 3.2. Zahtjevi koje prekidač treba da ispuni

Najvažniji zahtjev koji prekidač mora ispuniti da bi se mogao koristiti u tehnici kontrolisanih operacije prekidača, tj. naprednog upravljanja, kao sinhrono kontrolisani prekidač, jeste da se prekidač može kontrolisati, tj. da se njim može upravljati, u svakoj fazi. Dakle, prekidač mora imati pojedinačne fazne i nezavisne operativne mehanizme, tj. mora biti jednopolne izvedbe. Pored jednopolne izvedbe prekidača, on mora imati i sledeće karakteristike [1]:

- Nema varijacija u vremenima uključivanja i isključivanja prekidača.
- Sve dok se kontakti prekidača ne dodirnu, karakteristika dielektrične izdržljivosti kontaktne šupljine je beskonačna tokom operacije uključivanja prekidača. Samim tim, ne postoji vrijeme pred-iskrenja.
- Tokom operacije isključenja prekidača, vjerovatnoća ponovnog paljenja električnog luka ili pred-iskrenja ne postoji, tj. jednaka je nuli.

Prvi zahtjev koji je vezan za doslednost operativnih vremena prekidača se javlja kao jedan od mogućih problema kod stvarnih prekidača. Naime, prekidačka operativna vremena stvarnih prekidača značajno variraju zavisno od tipa prekidača, kao i radnih i ambijentalnih uslova. Neke varijacije operativnih vremena prekidača se mogu predvidjeti. Osim njih, postoje i varijacije operativnih vremena prekidača koje nije moguće predvidjeti, jer su čisto statističke. Operativno vrijeme prekidača se može prikazati sledećim izrazom [20]:

$$T_{op} = T_{nom} + \Delta T_{pred} + \Delta T_{stat} \quad (17)$$

gdje je:

$T_{op}$  – operativno vrijeme prekidača (s),

$T_{nom}$  – prosječno operativno vrijeme prekidača pri normalnim radnim uslovima (s),

$\Delta T_{pred}$  – predvidljivo odstupanje operativnog vremena prekidača (s),

$\Delta T_{stat}$  – statističko odstupanje operativnog vremena prekidača (s).

Dakle, postoje varijacije operativnih vremena prekidača koje se mogu predvidjeti i koje je moguće ispraviti pomoću kontrolera. Neke od tih varijacija uzrokovane su promjenama kontrolnog napona i temperature ambijenta, i potvrđeno je da one imaju trend koji pokazuje iste vrijednosti za svaku jedinicu i fazu [21]. Stoga se ove varijacije mogu predvidjeti tako što se, na osnovu izmjerenih operativnih vremena prekidača u različitim uslovima, unaprijed vrši funkcija kompenzacije kontrolnog napona i temperature ambijenta. Varijacije operativnih vremena uzrokovane promjenama radnog pritiska u slučaju hidromatskog ili pneumatskog operativnog mehanizma mogu se takođe kompenzovati na sličan način [21].

Operativno vrijeme određenih tipova prekidača može varirati takođe i zavisno od vremena kada je bila poslednja operacija prekidača, tj. od vremena neaktivnosti prekidača, usled dugotrajnog starenja prekidača, kontaktne erozije i sl. Kontroler može da kompenzuje i vrijeme neaktivnosti uzimanjem u obzir karakteristika vremena neaktivnosti prekidača, koje su definisane u katalogima proizvođača, kao i vrijeme između operacije prekidača [20].

Da bi se prethodno navedene varijacije operativnih vremena prekidača mogle predvidjeti i kompenzovati neophodno je postojanje odgovarajućih senzora i mjernih transformatora. Uloga ovih uređaja je da izmjere sve varijacije u operativnim parametrima, koje se mogu izmjeriti u polju, i da ih pretvore u fizičke veličine kao što su pritisak, svjetlost u električni signal, ili obratno. Rezultat toga su određene promjene u operativnim vremenima prekidača. Operativno vrijeme koje koristi kontroler je podešeno na osnovu poznatog seta

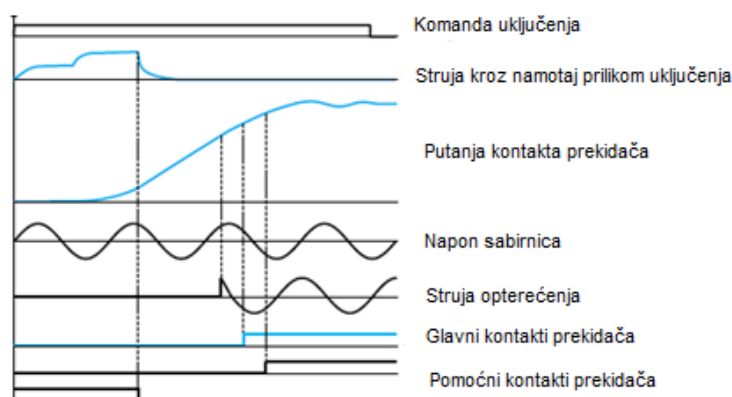
operativnih karakteristika koje su određene tokom ispitivanja, a takođe i na osnovu ulaznih veličina [20].

Savremeni SF<sub>6</sub> visokonaponski prekidači u sebi imaju integrisane različite senzore, obično optičke, koji im služe za kontinuirani monitoring, a takođe i za kontrolu rada prekidača. Osnovni tip senzorskog sistema inteligentnog prekidača je zbog ekonomičnih razloga ograničen na samo nekoliko senzora [15]: senzor gustine (određuje gustinu gasa SF<sub>6</sub>), senzor energije opruge (određuje položaj i pomeranje opruge prilikom manipulacija prekidačem) i senzor pomjeranja (određuje krivu pomjeranja sklopne motke). Osnovni zadatak glavnih senzora je otkrivanje glavnih izvora najčešćih kvarova SF<sub>6</sub> prekidača.

Pored prethodno pomenutih glavnih senzora, u prekidač je moguće ugraditi i dodatne senzore koji kontinuirano mjere napon, struju, temperaturu okoline, broj sklopnih ciklusa, kumulativnu prekinutu struju kratkog spoja, njen iznos i učestalost, itd. Na osnovu svih prethodno pomenutih mjerenja, moguće je odrediti stanje, tj. istrošenost kontakata i time predvidjeti potrebe za revizijom prekidača [15]. Ugradnja dodatnih specijalnih senzora na prekidaču povećava troškove, a može čak i uticati na pouzdanost rada prekidača uvođenjem dodatnih komponenti koje mogu otkazati. Uprkos tome, primjena dodatnih senzora donosi mnogo više prednosti, jer se pomoću njih mogu dobiti svi parametri koji su neophodni za primjenu tehnike kontrolisanih operacija prekidača.

Uređaji koji se primjenjuju za monitoring prekidača, a koji danas postoje na tržištu obično snimaju signale koji su predstavljeni na slici 12., koji su vezani za operaciju uključivanja prekidača [22].

Sa slike 12. se može vidjeti da nakon što je izdata komanda za kontrolisano uključivanje prekidača dolazi do proticanja struje kroz pobudni namotaj prekidača, a nakon isključivanja pomoćnog kontakta (poslednji signal na slici) dolazi do kretanja glavnih kontakata prekidača, tj. pomičnog kontakta. Takođe se može vidjeti da je do zatvaranja električnog kola i početka proticanja struje došlo prije mehaničkog dodira glavnih kontakata prekidača, tj. prije njegovog uključivanja. Uzrok tome je rasipanje polova prekidača, gdje usled efekta prediskrenja dolazi do pojave električnog luka koji se formira prilikom približavanja kontakata prekidača.



Slika 12. Signali koji se obično mogu posmatrati tokom operacije uključivanja prekidača.

Dakle, za primjenu tehnike kontrolisanih operacija prekidača neophodno je da prekidač bude jednopolne izvedbe, kako bi se njim moglo upravljati u svakoj fazi. U savremenim elektroenergetskim sistemima na visokonaponskom nivou u dalekovodnim poljima isključivo se primjenjuju visokonaponski prekidači jednopolne izvedbe. Samim tim moguća je primjena tehnike kontrolisanih operacija prekidača, bez značajnih dodatnih troškova koji obuhvataju samo troškove kontrolera i ožičenja, što je svakako ekonomski isplativo imajući u vidu brojne prednosti koje primjena ove tehnike donosi. Prekidači na nižim naponskim nivoima su obično trolne izvedbe, tj. imaju jedan operativni mehanizam za sve tri faze, pa u tom slučaju nezavisna kontrola faza nije moguća. Primjena tehnike kontrolisanih operacija prekidača bi tada zahtijevala značajno veće dodatne troškove, jer bi bilo neophodno zamijeniti trolni prekidač sa tri jednopolna prekidača na svakoj poziciji, što svakako nije ekonomično, pa se zbog toga tehnika kontrolisanih operacija prekidača primjenjuje samo kod visokonaponskih sistema.

Druga najvažnija karakteristika, pored jednopolne izvedbe prekidača je doslednost operativnih vremena prekidača, odnosno što manje varijacije u vremenima uključivanja i isključivanja prekidača. Ovom zahtjevu od svih tipova prekidača najbolje su odgovorili savremeni SF<sub>6</sub> prekidači, koji imaju dovoljno niske granice mehaničkih grešaka, pa su stoga oni i najpogodniji za zahtjevnu primjenu u tehnici kontrolisanih operacija prekidača.

## **4. KONVENCIONALNE TEHNIKE OGRANIČENJA SKLOPNIH PRENAPONA**

Pojava sklopnih prenapona u elektroenergetskom sistemu generiše prelazne procese sa pojavom napona i/ili struja visokih amplituda koji mogu izazvati brojne negativne uticaje i narušiti normalan rad elektroenergetskog sistema u cjelini. Ti negativni uticaji ogledaju se u smanjenju kvaliteta električne energije, pojavi kvarova (otkaza) opreme u trafostanicama, smanjenju radnog vijeka opreme, a takođe uzrokuju i pogrešan rad zaštitnih releja. Samim tim neophodno je spriječiti pojavu i ograničiti sklopne prenapone kako bi se izbjegli brojni negativni uticaji, a u tu svrhu se primjenjuju različite tehnike ograničenja.

Prve tehnike koje su se koristile u svrhu ograničenja sklopnih prenapona, o kojima će se detaljnije govoriti u okviru ovog poglavlja, su tzv. konvencionalne tehnike, i kod njih se ograničenje sklopnih prenapona postiže primjenom:

- Metal-oksidnih odvodnika prenapona,
- Prekidača koji su opremljeni sa pred-umetnutim otpornicima.

Jedan od ključnih faktora koji utiče na amplitudu sklopnih prenapona, uzrokovanih uključanjem prekidača, jeste trenutak u kojem se vrši uključivanje. Vremenski trenutak uključjenja pri konvencionalnom uključjenju je proizvoljan pri svakom uključjenju, što će prije ili kasnije uzrokovati uključjenje u veoma nepovoljnom vremenskom trenutku, pa će amplituda sklopnog prenapona dostići veoma visoke vrijednosti. Dakle, proizvoljno odabran vremenski trenutak uključjenja predstavlja jedan od nedostataka koji se javljaju primjenom konvencionalnih tehnika.

Drugi, i glavni nedostatak konvencionalnih tehnika je taj što se one koriste za ograničenja sklopnih prenapona nakon njihovog pojavljivanja, tj. ne sprječavaju samu pojavu sklopnih prenapona. Zbog toga su ove tehnike neefikasne, nepouzdana i skupe, i ne tretiraju srž problema, što je i glavni razlog zbog kojeg su u savremenim elektroenergetskim sistemima sve manje zastupljene. U svrhu ograničenja sklopnih prenapona sve se više primjenjuje tehnika kontrolisanih operacija prekidača koja, u poređenju sa konvencionalnim tehnikama, daje mnogo bolje rezultate.



## 4.1. Odvodnici prenapona

Osnovni zadatak odvodnika prenapona je da prenapon iz mreže snizi na napon koji odgovara zaštitnom izolacionom nivou opreme i time zaštite izolaciju opreme od štetnog dejstva prenapona u visokonaponskim razvodnim postrojenjima.

Ograničenje sklopnih prenapona na prihvatljive nivoe primjenom ove konvencionalne tehnike je moguće postići, ali je neophodno korišćenje metal-oksidnih odvodnika prenapona, i to na oba kraja voda. Dalje, ukoliko je neophodno dodatno smanjenje amplitude sklopnog prenapona to se može postići primjenom jednog od dva sledeća načina [1]:

- postavljanjem dodatnih odvodnika prenapona duž voda,
- primjenom posebnih odvodnika prenapona koji imaju mogućnost apsorpcije veće količine energije pražnjenja, kao i niži udarni napon reagovanja.

U [23] sprovedena su istraživanja u američkom elektroprenosnom sistemu (engl. *AEP* – *American Electric Power*) naponskog nivoa 800kV, vezana za primjenu odvodnika prenapona za ograničenja sklopnih prenapona. Istraživanja u elektromagnetnom tranzijentnom programu su pokazala da je postavljanje jednog seta odvodnika prenapona, tj. jedan odvodnik po fazi, na 800kV-tnom vodu "*Marysville-Kammer*", na dužini od jedne trećine i dvije trećine voda dovoljan kriterijum koji je neophodno ispuniti u cilju postizanja ograničenja amplitude sklopnog prenapona ispod vrijednosti napona koja odgovara zaštitnom izolacionom nivou voda [23].

Pored prethodno pomenutog, sprovedena su takođe i brojna istraživanja o primjeni ove konvencionalne tehnike za ograničenje sklopnih prenapona, njenim prednostima i nedostacima, i može se doći do zaključka da je najbolje rješenje da se ova tehnika koristi kao sigurnosna mjera, tj. zamjena za druga sredstva za opšte smanjenje sklopnih prenapona. Razlog tome su brojni problemi koji su uzrokovani primjenom ove tehnike u praksi. Naime, jedan od načina za postizanje dodatnog ograničenja sklopnih prenapona je smanjenje udarnog napona reagovanja na odvodniku, koje sa druge strane uzrokuje bespotrebno reagovanje odvodnika za mnoge prenapone uzrokovane uključenjem, pojavom kvara ili isključenjem usled kvara. Time dolazi do nepotrebno velikog broja reagovanja odvodnika prenapona i odvođenja velike količine energije, čime se smanjuje radni vijek odvodnika i povećava učestanost njegovih otkaza čime oprema ostaje bez zaštite. Stoga, brojne studije preporučuju da se za ograničenje sklopnih prenapona primjenjuju ostale tehnike ograničenja umjesto primjene odvodnika prenapona. Ukoliko se ipak žele koristiti odvodnici prenapona, u tom slučaju je potrebno odabrati odvodnike sa tako velikim minimalnim nivoima napona okidanja da oni mogu da rade za izuzetno visoke prenapone. Pored toga, neophodno je obavezno izabrati zaštitne izolacione nivoe opreme u trafostanicama, posebno za neobnovljive izolacije, koji imaju mogućnost da izdrže visoka naponska naprezanja [1].

Dakle, preporuka je da se ova konvencionalna tehnika, koja obuhvata primjenu odvodnika prenapona u cilju ograničenja sklopnih prenapona, koristi samo kao sredstvo krajnje zaštite u slučaju javljanja izuzetnih prenapona, na primjer, u slučaju otkaza sistema kontrolisanog uključenja koji se koristi u savremenoj tehnici ograničenja sklopnih prenapona

pomoću kontrolisanih operacija prekidača, ili u slučaju zaštite sistema od prenapona uzrokovanih atmosferskim pražnjenjem, što je i primarna uloga odvodnika prenapona [1].

Prilikom primjene odvodnika prenapona za ograničenje sklopnih prenapona razlikuju se dva različita stanja odvodnika prenapona: "stanje visoke struje", tzv. struje odvođenja, kada je prekidač uključen, a visoka struja protiče kroz odvodnik prenapona i "stanje niske struje", tzv. propratne struje, kada je prekidač isključen, a samo mala struja protiče kroz odvodnik prenapona [24]. O prethodno pomenutim stanjima će se detaljnije govoriti u nastavku, u okviru potpoglavlja posvećenim različitim tipovima odvodnika prenapona.

Podjela odvodnika prenapona prema konstrukciji i prema principu rada je na:

- Cijevne odvodnike prenapona,
- Silicijum-karbidne (SiC) odvodnike prenapona.
- Metal-oksidne odvodnike prenapona (cink-oksidne ZnO).

Pored odvodnika prenapona, kao zaštitni uređaji koriste se i zaštitna iskrišta.

#### **4.1.1. Zaštitna iskrišta**

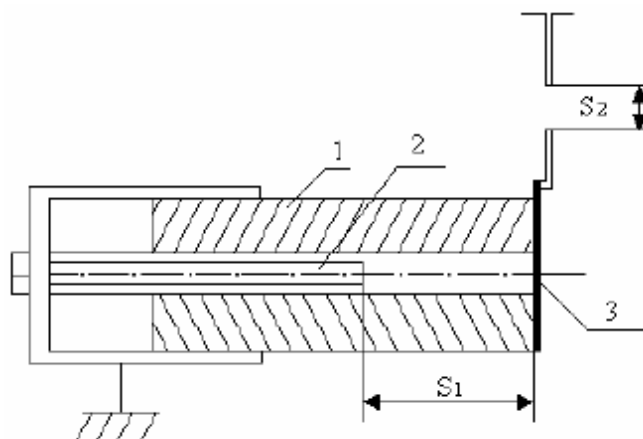
Zaštitna iskrišta predstavljaju izuzetno jeftina zaštitna sredstva koja se primenjuju u cilju zaštite EES-a od prenapona, i veoma su jednostavne izvedbe u poređenju sa ostalim zaštitnim uređajima. Naime, zaštitno iskrište čine dvije metalne elektrode koje su sfernog oblika i koje se nalaze na određenom međusobnom rastojanju u vazduhu. Jedna od elektroda se nalazi pod naponom, dok se druga nalazi na potencijalu zemlje [2]. Njihovo međusobno rastojanje u vazduhu je paralelno šticenoj izolaciji, a određivanje međusobnog rastojanja među elektrodama je jedino tehničko svojstvo zaštitnog iskrišta koje je neophodno odrediti.

Preskočni napon zaštitnog iskrišta je niži od preskočnog napona ostalih elemenata elektroenergetskog sistema. Prilikom nailaska prenaponskog talasa na međuelektrodno rastojanje u vazduhu dolazi do električnog luka, odnosno do preskoka u vazdušnoj izolaciji i dolazi do odvođenja prenapona u zemlju. Zaštitno iskrište nema uređaj za gašenje električnog luka, pa svaki preskok između elektroda predstavlja zemljospoj u sistemu sa neuzemljenim zvjezdištem, odnosno jednopolni kratki spoj u sistemu sa uzemljenim zvjezdištem [2]. Pored toga, postoji takođe opasnost da se u određenim slučajevima, kada dolazi do pojave velikih struja, luk među elektrodama neće gasiti sam od sebe [17]. Zbog ovih svojih nedostataka zaštitna iskrišta se nisu pokazala kao najefikasnije zaštitno sredstvo, pa se stoga ne koriste kao osnovna zaštita, već kao dodatna zaštita na uređajima.

#### **4.1.2. Cijevni odvodnici prenapona**

Cijevni odvodnik prenapona je ustvari zaštitno iskrište sa uređajem za gašenje električnog luka. Ime su dobili po tome što se elektrode jednog iskrišta, najčešće izvedene u obliku rogova, postavljaju na određenom međusobnom rastojanju u specijalnu cijev, napravljenu od specijalnog materijala [2]. Riječ je o specijalnim materijalima (polivinil-hlorid, fiber, tvrda guma) koji imaju karakteristiku da ih električni luk svojim toplotnim

dejstvom razara, stvarajući tako gasove koji oduvavaju i gase električni luk. Na slici 13. prikazan je presjek kroz cijevni odvodnik prenapona [2].



Slika 13. Cijevni odvodnik prenapona (1 – cijev odvodnika, 2 – uzemljena elektroda, 3 – elektroda pod naponom,  $S_1, S_2$  – iskrišta)

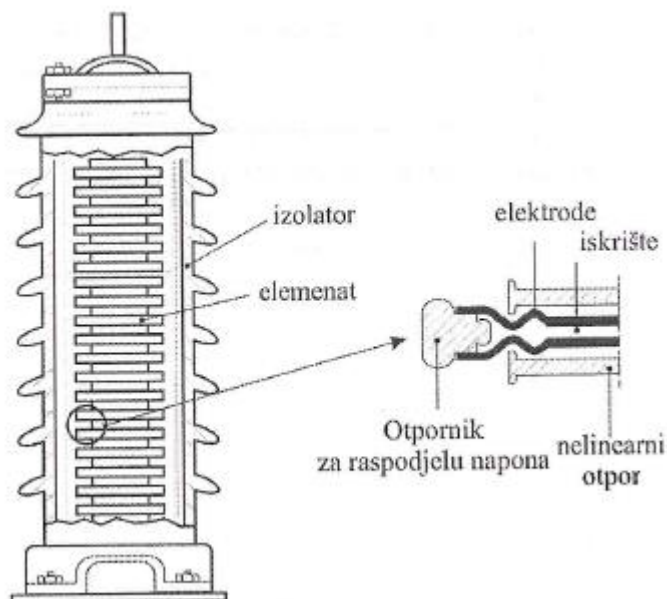
Karakteristične veličine cijevnog odvodnika prenapona su [2]:

- Nazivni napon odvodnika,
- Nazivna frekvencija,
- Klasa cijevnog odvodnika,
- Granične propratne struje,
- Naizmjenični napon reagovanja,
- Udarni napon reagovanja.

#### 4.1.3. Silicijum-karbidni odvodnici prenapona

Silicijum-karbidni (SiC) odvodnici prenapona, ili drugim riječima, klasični odvodnici prenapona, pripadaju grupi ventilnih odvodnika prenapona. Sastoje se od iskrišta koje je redno vezano sa nelinearnim otpornikom od silicijum-karbida, a priključuju se između provodnika i zemlje [17]. Odvodnik se može konstruisati za željene radne napone primjenom nekoliko iskrišta i nelinearnih otpornika vezanih redno.

Na slici 14. prikazan je presjek silicijum-karbidnog odvodnika prenapona [18].



Slika 14. Silicijum-karbidni odvodnik prenapona.

Ovde iskrište ima ulogu sklopnog aparata. Naime, kada napon prekorači određenu vrijednost, iskrište svojim reagovanjem (preskokom) spaja fazni provodnik kojim dolazi prenaponski talas sa nelinearnim otpornicima [18].

Nakon reagovanja odvodnika prenapona pad napona koji vlada na nelinearnom otporniku naziva se preostali napon odvodnika i njegova maksimalna vrijednost mora biti niža od izolacionog nivoa šticeenog objekta. Usled prenapona javlja se struja odvođenja koja zatim protiče kroz nelinearni otpornik čime se odvodi energija prenapona u zemlju. Ta struja se može izraziti eksponencijalnom funkcijom [12]:

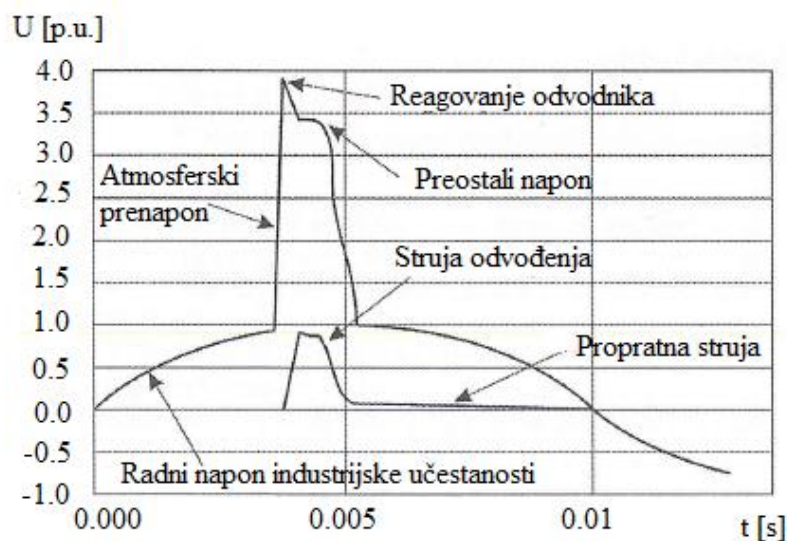
$$I = k \cdot U^{\alpha} \quad (18)$$

gdje je:

$\alpha$  – koeficijent nelinearnosti koji se za SiC odvodnika kreće u opsegu  $2 < \alpha < 6$  [12],

$k$  – konstruktivna konstanta odvodnika prenapona.

Nakon eliminisanja prenapona dolazi do povećanja otpornosti nelinearnih otpornika. Pored toga, dolazi i do smanjenja struje na vrijednost propratne struje koja protiče usled dejstva radnog napona mreže [18]. Do pojave gašenja električnog luka dolazi u vremenskom trenutku koji odgovara prolasku propratne struja kroz nulu, a odvodnik se vraća u prvobitno stanje kao i prije reagovanja, tj. predstavlja veoma veliki otpor prema zemlji. Vremenski dijagram napona i struja pri nailasku atmosferskog prenaponskog talasa na SiC odvodnik prenapona je predstavljen na slici 15. [18].



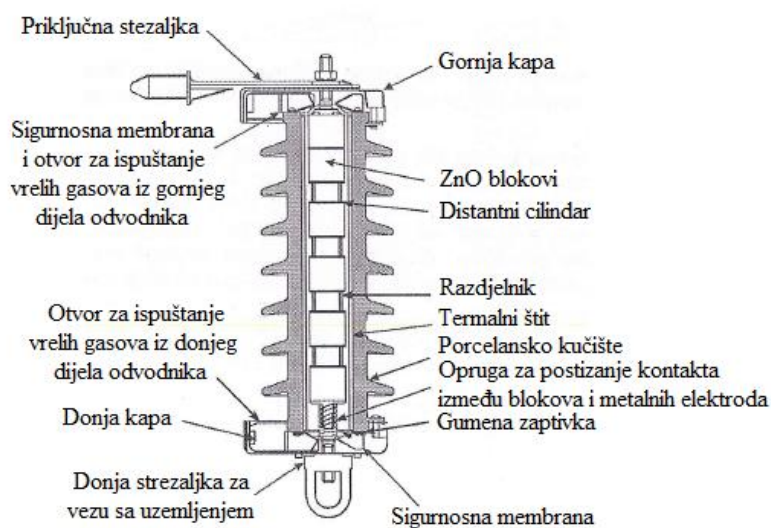
Slika 15. Vremenski dijagram napona i struja pri nailasku atmosferskog prenaponskog talasa na SiC odvodnik prenapona.

Zbog svoje složenije konstrukcije, koja se ogleda u postojanju iskrišta, kao i nepovoljnijih karakteristika (npr. manje izražena strujno-naponska nelinearnost) u poređenju sa metal-oksidnim odvodnicima prenapona, SiC odvodnici prenapona se danas manje koriste.

#### 4.1.4. Metal-oksidni odvodnici prenapona

U savremenim elektroenergetskim sistemima sve se više primjenjuju metal-oksidni odvodnici prenapona ili cink-oksidni (ZnO) odvodnici prenapona umjesto klasičnih SiC odvodnika prenapona, kako zbog svoje jednostavnije konstrukcije, tako i zbog povoljnijih zaštitnih karakteristika. Metal-oksidni odvodnici prenapona posjeduju povoljniji oblik volt-amperske karakteristike, a pored toga još jedna njihova glavna prednost je nepostojanje iskrišta.

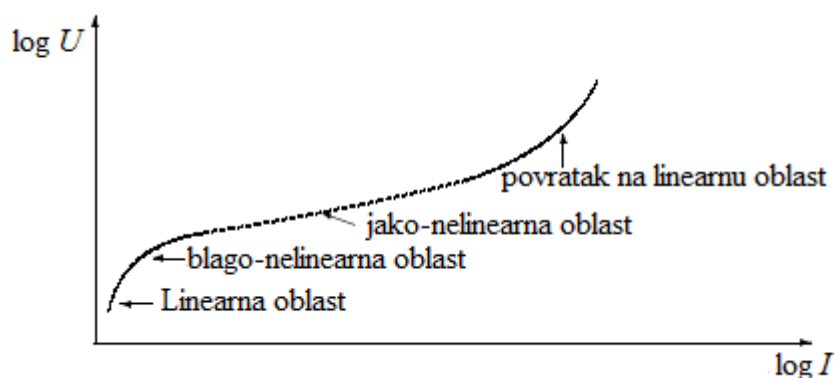
Što se tiče njihove konstrukcije, njih čine samo diskovi od nelinearnog otpornog materijala, zatvoreni u odgovarajućem cilindričnom kućištu [12]. Na slici 16. prikazan je presjek ZnO odvodnika prenapona [18].



Slika 16. ZnO odvodnik prenapona.

Najvažnija pogodnost ZnO odvodnika prenapona u poređenju sa SiC odvodnicima prenapona je vrlo izražen koeficijent nelinearnosti otpornika, koji kod ZnO odvodnika prenapona ima znatno veću vrijednost. To je veoma značajno, jer je koeficijent nelinearnosti ključni faktor od kojeg zavisi efikasnost prenaponske zaštite. Koeficijent nelinearnosti na širokom opsegu struja nije konstantan i njegova vrijednost se kreće u intervalu od  $\alpha=20$  do  $\alpha=50$  [12].

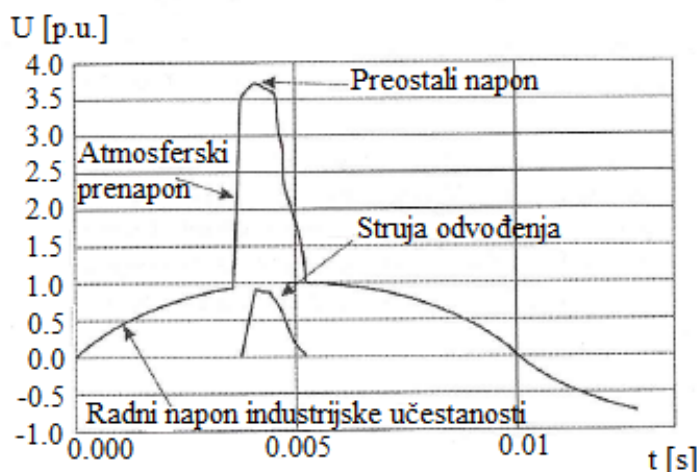
Volt-amperska karakteristika ZnO odvodnika prenapona, kao njegova najvažnija električna karakteristika, je prikazana na slici 17. [12].



Slika 17. Volt-amperska karakteristika ZnO odvodnika prenapona.

Na slici 17. se može uočiti kompletna karakteristika preostalog napona odvodnika, koja je podijeljena na četiri oblasti. Pri vrlo malim vrijednostima struje postoji skoro linearna zavisnost između napona i struje i to je tzv. linearna oblast. U blago-nelinearnoj oblasti dolazi do značajnog povećavanja struje, a vrijednosti napona su više od vrijednosti trajnog radnog napona, i ovdje dolazi do intenzivnijeg provođenja struje [18]. Pri još većim strujama prelazi se u jako-nelinearnu oblast, koju karakterišu jako malo promjene napona pri istovremeno vrlo velikim promjenama struje. Nakon jako-nelinearne oblasti otpornik se ponovo vraća u linearnu oblast u kojoj počinje značajan porast napona sa porastom struje, za šta su potrebne veoma velike vrijednosti struja koje se veoma teško postižu čak i u laboratorijskim uslovima, a njihovo pojavljivanje u praksi nije moguće [12].

Uloga ZnO odvodnika prenapona, kao i svih ostalih odvodnika prenapona, jeste da svojim reagovanjem ograniči prenapon i time zaštiti štice objekat od neželjenih posledica. Vremenski dijagram napona i struje pri nailasku atmosferskog prenaponskog talasa na ZnO odvodnik prenapona je prikazan na slici 18. [12].

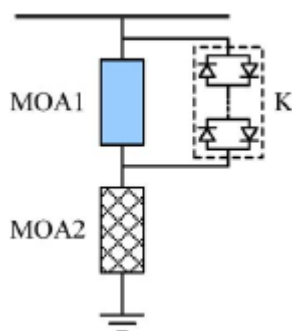


Slika 18. Vremenski dijagram napona i struje pri nailasku atmosferskog prenaponskog talasa na ZnO odvodnik prenapona.

Posmatranjem slike 15. i slike 18. može se uočiti poređenje SiC i ZnO odvodnika prenapona. Za razliku od SiC odvodnika prenapona, sa slike 18. se može vidjeti da ZnO odvodnik prenapona nema napon reagovanja, već da odmah nakon porasta napona preko koljena dolazi do provođenja struje [12]. Kako je već i ranije pomenuto, ZnO odvodnici prenapona ne sadrže iskrište, tako da nema naglog prelaska iz režima u kome odvodnik provodi male struje u režim provođenja velikih struja, kao kod SiC odvodnika prenapona. Takođe se sa slike 18. može uočiti da se nakon što prestane djelovanje prenapona ne javlja propratna struja, kao kod SiC odvodnika prenapona. Razlog za to je automatski povratak ZnO odvodnika prenapona u stanje velike otpornosti, kada kroz njega protiču vrlo male struje [12]. Dakle, može se donijeti zaključak da ZnO odvodnik prenapona posjeduje značajno bolje karakteristike u poređenju sa SiC odvodnikom prenapona, pa je i opravdana njegova sve veća upotreba u savremenim elektroenergetskim sistemima.

I danas se teži poboljšanju performansi i unapređenju metal-oksidnih (ZnO) odvodnika prenapona, i to je aktuelna tema brojnih naučnih istraživanja širom svijeta. Jedna takva studija sprovedena je i u Kini, sa ciljem da se razvije novi unaprijeđeni tip ZnO odvodnika prenapona sa niskom nultom komponentom napona, tzv. kontrolisani metal-oksidni odvodnik prenapona. Nulta komponenta napona je ključni parametar odvodnika prenapona i njenim smanjenjem postiže se efikasnije ograničenje i suzbijanje prenapona primjenom odvodnika prenapona.

Osnovna ideja kontrolisanog metal-oksidnog odvodnika prenapona je zamjena dijela odvodnika sa energetske-tiristorskim prekidačem kada prenapon prekorači određenu vrijednost, tako da se može postići niska nulta komponenta napona odvodnika. Kontrolisani metal-oksidni odvodnik prenapona, sa šematskim prikazom datim na slici 19., je podijeljen na dva dijela: MOA1 koji predstavlja kontrolisani dio i MOA2 koji predstavlja fiksni dio [25]. Kontrolisani dio, tj. MOA1, je u paralelnoj vezi sa tiristorskim prekidačem K.



Slika 19. Šematski prikaz kontrolisanog metal-oksidnog odvodnika prenapona.

MOA1 i MOA2 pri normalnim radnim uslovima mogu raditi kao cjelina. Tokom pojave sklopnih prenapona, ako izmjereni prenapon na MOA1 pređe vrijednost njegovog udarnog napona reagovanja, uključice se prekidač K i dovesti MOA1 u stanje kratkog spoja, čime će se spustiti nulta komponenta napona odvodnika na nivo MOA2, i time postići efikasnije ograničenje sklopnog prenapona [25].

Iako se primjenom kontrolisanog metal-oksidnog odvodnika prenapona postižu značajno bolji rezultati u ograničenju sklopnih prenapona i povećavaju zaštitni efekti u poređenju sa klasičnim metal-oksidnim odvodnicima prenapona, poteškoće u održavanju njihovih energetske-elektronskih kontrolnih (upravljačkih) uređaja mogu ipak ograničiti njihovu primjenu. I pored toga, ideja na kojoj je zasnovan njihov rad daje im jedinstvenu prednost, i svakako je korisna za neka buduća istraživanja u kojima će se možda i prevazići ovaj njihov nedostatak i omogućiti masovna primjena kontrolisanog metal-oksidnog odvodnika prenapona u savremenim elektroenergetskim sistemima.

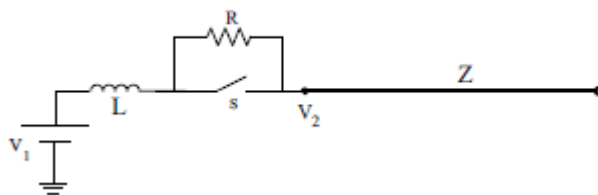


## 4.2. Pred-umetnuti otpornik

Druga konvencionalna metoda koja se primjenjuje u cilju ograničenja sklopnih prenapona, pored primjene odvodnika prenapona, jeste primjena prekidača koji su opremljeni pred-umetnutim otpornicima. Ova metoda se pokazala kao efikasna mjera za ograničenje sklopnih prenapona u elektroenergetskim sistemima, zbog karakteristike koju posjeduju pred-umetnuti otpornici kojima je prekidač opremljen. Naime, oni imaju mogućnost da apsorbiraju prekomjernu energiju tokom tranzijentnog (prelaznog) procesa sistema i tako priguše sklopne prenapone i smanje njihove amplitude do prihvatljivih granica.

Primjena ove metode se pokazala posebno efikasnom u ograničenju sklopnih prenapona na vodovima kod kojih postoji kompenzacija reaktivne energije primjenom kondenzatorskih baterija [26].

Na slici 20. prikazana je jednopolna šema na kojoj se može vidjeti primjena pred-umetnutog otpornika kod prekidača [4]. Pred-umetnuti otpornik je paralelno vezan sa prekidačem i njegovom primjenom postižu se povoljni uslovi kojim se ograničava sklopni prenapon uzrokovan ponovnim uključanjem voda, tj. djelovanja APU-a.



Slika 20. Primjena pred-umetnutog otpornika kod prekidača.

Nakon reagovanja APU-a dolazi do ponovnog uključanja dalekovoda sa karakterističnom impedansom  $Z$ . Naponski izvor je tada povezan sa vodom preko otpornika  $R$  koji je u paralelnoj vezi sa glavnim prekidačem  $s$ . Primjenom Kirhofovog zakona jednačina napona dalekovoda se može napisati u sledećem obliku [4]:

$$V_1 = L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i + V_2 \quad (19)$$

gdje je:

$V_1$  – napon izvora (V),

$L$  – induktivnost izvora (H),

$i$  – struja kroja protiče kroz dalekovod (A),

$R$  – otpornost pred-umetnutog otpornika ( $\Omega$ ),

$V_2$  – napon na početku dalekovoda (zaostali napon) (V).

Radi pojednostavljena izvođenja izraza za maksimalni sklopni prenapon, pretpostavlja se da su početni uslovi napona i struje jednaki nuli, a induktivnost izvora je zanemarena [4]. Pretpostavlja se takođe da je dalekovod u praznom hodu. Dalje, primjenjuje se Laplasova i inverzna Laplasova transformacija, kao i teorema putujućih talasa na osnovu koje se uzima da je za vod u praznom hodu direktni putujući talas jednak reflektovanom putujućem talasu. Rezultantni talas, koji je jednak zbiru direktnog putujućeg i reflektovanog putujućeg talasa, se može izraziti na sledeći način [4]:

$$U = \frac{2 \cdot Z}{R + Z} \cdot V_1 \quad (20)$$

gdje je:

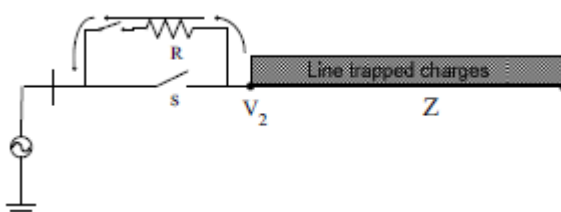
$U$  – amplituda ekvivalentnog talasa sklopnog prenapona (V),

$Z$  – karakteristična impedansa voda ( $\Omega$ ).

Ukoliko se pretpostavi da je vrijednost otpora jednaka karakterističnoj impedansi voda, amplituda ekvivalentnog talasa bi bila oko  $V_1$ , što nije opasno za zaštitni izolacioni nivo opreme. Stoga se može donijeti zaključak da se primjenom pred-umetnutog otpornika mogu ograničiti sklopni prenaponi do prihvatljivih granica [4].

Posmatrajući sliku 20., može se donijeti zaključak da primjena pred-umetnutog otpornika kod prekidača stvara povoljne uslove za ograničenje sklopnih prenapona, pri čemu se oni ogledaju u sledećem [4]:

- U trenutku uključenja prekidača smanjuje se struja koja protiče kroz dalekovod.
- Tokom vremenskog intervala uključenja prekidača, javlja se pad napona na pred-umetnutom otporniku, pa se samo dio napona izvora javlja na vodu.
- Tokom vremenskog intervala uključenja prekidača, zaostalo naelektrisanje na vodu se prazni preko otpornika, čime se prigušuje oscilovanje zaostalog naelektrisanje na vodu i efikasno smanjuje amplituda generisanog sklopnog prenapona (slika 21.).



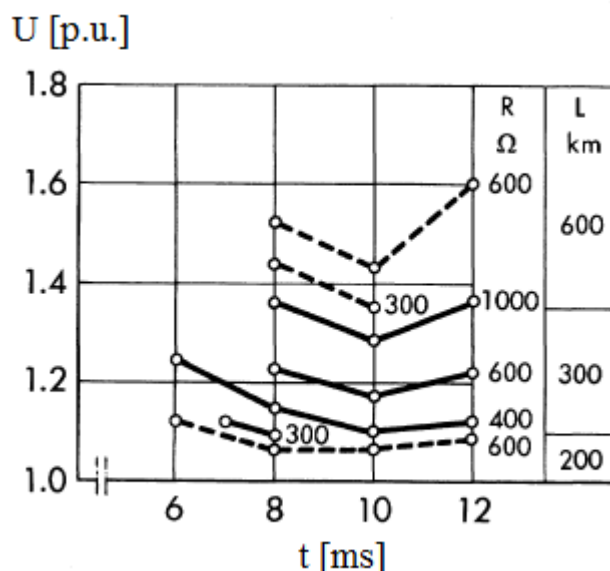
Slika 21. Pražnjenje zaostalog naelektrisanja na vodu preko pred-umetnutog otpornika ("line trapped charges" = zaostalo naelektrisanje na dalekovodu).

U [4] je takođe sprovedena studija korišćenja kalema i kondenzatora umjesto pred-umetnutog otpornika kod prekidača u cilju ograničenja sklopnih prenapona. Rezultatima studije, tj. sprovedenim simulacijama vezanim za iranski elektroenergetski sistem, je pokazano da se njihovom primjenom ne postiže ograničenje sklopnih prenapona, jer su dobijene amplitude koje značajno ugrožavaju zaštitni nivo izolacije opreme. Stoga je zaključeno da se jedino primjena pred-umetnutog otpornika prekidača može smatrati kao prihvatljivo i efikasno tehničko rješenje u cilju ograničenja sklopnih prenapona, što je i pokazano rezultatima studije kada se amplituda sklopnog prenapona sa vrijednosti 2.55 p.u. pri normalnim operacijama, smanjila na vrijednost 1.6 p.u. primjenom pred-umetnutog otpornika kod prekidača [4].

Da bi se postigla optimalna kontrola prenapona primjenom pred-umetnog otpornika kod prekidača neophodno je pravilno izabrati sledeće vrijednosti:

- Vrijeme uključenja pred-umetnutog otpornika prije zatvaranja glavnih kontakata prekidača,
- Vrijednost otpornosti pred-umetnutog otpornika.

Pred-umetnuti otpornik se uključuje u kratkom periodu vremena pomoću dodatnog prekidača, 10-15ms prije zatvaranja glavnih kontakata prekidača [27]. Iz studije koja je sprovedena u [26] može se donijeti zaključak da je optimalno vrijeme uključnje otpornika, u mreži frekvencije 50Hz, 10ms prije zatvaranja glavnih kontakata prekidača. Takođe se pokazalo da varijacije vremena uključenja otpornika između 8 i 12ms uzrokuju relativno malu promjenu u vrijednosti maksimalne amplitude prenapona, što se može vidjeti na slici 22. [26]. Nakon uključenja glavnih kontakata prekidača, otpornik se isključuje.

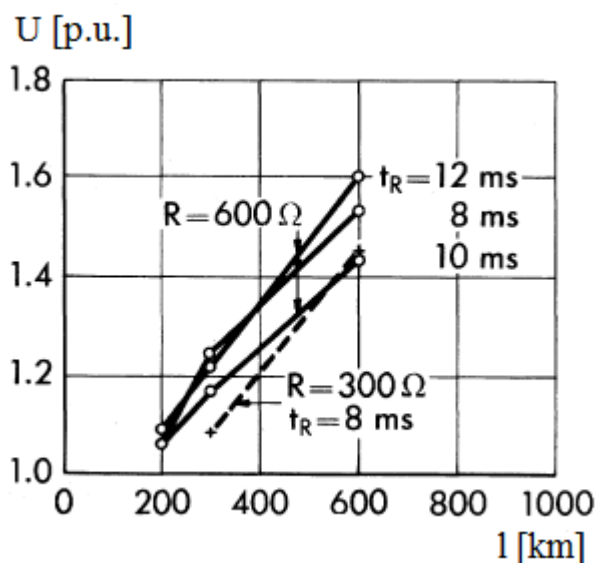


Slika 22. Uticaj vremena uključenja pred-umetnog otpornika kod prekidača na vrijednost maksimalne amplitude prenapona (R – otpornost pred-umetnutog otpornika, L – dužina voda).

Sa druge strane, u mrežama kod kojih ne postoji kompenzacija reaktivne energije, varijacije u vremenu uključenja otpornika imaju veliki uticaj. Ukoliko se posmatra jedan vod dužine od 200km, u jednoj takvoj mreži, kod kojeg se prenaponi ograničavaju primjenom pred-umetnutog otpornika kod prekidača otpornosti  $600\Omega$ , vrijednost amplitude prenapona se povećala sa 1.18 p.u., pri vremenu uključenja otpornika 8ms prije zatvaranja glavnih kontakata prekidača na 1.7 p.u. pri vremenu uključenja otpornika 12ms prije zatvaranja glavnih kontakata prekidača [26].

Optimalna vrijednost otpornosti pred-umetnutog otpornika bi trebala biti reda nekoliko stotina oma, preciznije vrijednosti zavise od vrijednosti impedanse izvora, dužine voda i parametara voda, kao i zahtijevanog smanjenja napona [26]. Povećanjem vrijednosti otpora značajno se smanjuju vrijednost maksimalne amplitude sklopnog prenapona [4].

Još jedan od faktora od kojeg zavisi vrijednost maksimalne amplitude sklopnog prenapona je dužina voda. Sa slike 23. se može donijeti zaključak da pri konstantnoj vrijednosti otpora pred-umetnutog otpornika kod prekidača, vrijednost maksimalne amplitude sklopnog prenapona se povećava sa povećanjem dužine voda [26].



Slika 23. Uticaj dužine voda na vrijednost maksimalne amplitude prenapona ( $R$  – otpornost pred-umetnutog otpornika,  $t_R$  – vrijeme uključenje pred-umetnutog otpornika prije zatvaranja glavnih kontakata prekidača).

Ova konvencionalna metoda se danas sve rjeđe primjenjuje u savremenim elektroenergetskim sistemima, zbog svojih nedostataka. Prvi nedostatak ove metode jesu veoma visoki troškovi implementacije i održavanja pred-umetnutog otpornika koji čine značajan dio ukupnih troškova prekidača. Dalje, primjena pred-umetnutog otpornika može da dovede do složenosti prekidačkog sistema i do drugog nedostatka koji se ogleda u pojavi kvarova, vezanih za pred-umetnuti otpornik. Ovi kvarovi imaju mnogo veću stopu pojave u poređenju sa kvarovima ostalih komponenti prekidačkog sistema, pa je samim tim primjenom pred-umetnutih otpornika značajno smanjena pouzdanost čitavog sistema [28]. Stoga se u

savremenim elektroenergetskim sistemima nastoji eliminisanju ove konvencionalne tehnike, i primjeni savremene tehnike kontrolisanih operacija prekidača. Ograničenja sklopnih prenapona primjenom tehnike kontrolisanih operacija prekidača, posebno kada se primjenjuje u kombinaciji sa odvodnicima prenapona, slično je onom koje se postiže primjenom prekidača koji su opremljeni pred-umetnutim otpornicima [1].

## 5. TEHNIKA KONTROLISANIH OPERACIJA PREKIDAČA

Pored konvencionalnih tehnika, koje su detaljno analizirane u okviru četvrtog poglavlja, u cilju sprječavanja neželjenih nivoa prelaznih elektromagnetskih pojava nastalih kao posljedica manipulacija prekidačem u visokonaponskim razvodnim postrojenjima primjenjuje se tehnika kontrolisanih operacija prekidača. Ova tehnika predstavlja jednu od savremenijih preventivnih mjera, koja se već duži vremenski period koristi u brojnim svjetskim elektroenergetskim sistemima i uspješno je zamijenila konvencionalne tehnike. Razlog za njenu sve veću primjenu su svakako brojne prednosti koje karakterišu ovu tehniku u poređenju sa konvencionalnim tehnikama.

Jedna od glavnih prednosti tehnike kontrolisanih operacija prekidača je ta što je njenom primjenom moguće gotovo u potpunosti eliminisati naponska i strujna naprezanja u elektroenergetskom sistemu, uzrokovana manipulacijama prekidačem. Kontrolisanim vremenskim operacijama prekidača, komande za uključenje/isključenje svakog nezavisnog pola prekidača se odlažu tako da do spajanja ili razdvajanja kontakata dolazi u optimalnom vremenskom trenutku, koji zavisi od faznog ugla referentnog naponskog ili strujnog signala. Samim tim, uspješno je spriječen rizik od pojave veoma visokih vrijednosti amplituda sklopnih prenapona i prevaziđen prvi nedostatak konvencionalnih tehnika.

Za razliku od konvencionalnih tehnika koje ograničavaju sklopne prenapone nakon njihovog pojavljivanja, što je njihov drugi nedostatak, primjena tehnike kontrolisanih operacija prekidača omogućava preventivno djelovanje. Naime, kontrolisanim operacijama prekidača postiže se uključenje u optimalnim vremenskim trenucima i time je spriječeno generisanje štetnih naponskih i strujnih naprezanja u prelaznom procesu.

Dakle, tehnika kontrolisanih operacija prekidača predstavlja alternativu konvencionalnim metodama za ograničenje tranzijenata uzrokovanih manipulacijama prekidačem, i ona daje, tamo gdje je pogodna za upotrebu, mirniju i stabilniju operaciju uključjenja/isključenja.

Dok se većina kvarova i otkaza opreme ne može spriječiti, već sva oprema mora izdržati uzrokovana naponska i strujna naprezanja, tranzijenti napona i struja uzrokovani manipulacijama prekidačem su nešto što se može spriječiti.

Tehnika kontrolisanih operacija prekidača se primjenjuje pri uključenjima specifičnih vrsta opterećenja, kao što su opterećenja sa malom induktivnom strujom u koje spadaju: uključenje većih transformatora i kompenzacijskih prigušnica [29]. U tom slučaju je cilj primjenjene tehnike da smanji ili eliminiše rizik od pojave neželjenih struja uključjenja koje uzrokuju prenapone u slučajevima pojave ponovnog paljenja električnog luka u visokonaponskom prekidaču. Takođe, tehnika kontrolisanih operacija prekidača se

primjenjuje i pri uključanju karakterističnih kapacitivnih opterećenja, kao što su kondenzatorske baterije, kablovski vodovi viših naponskih nivoa, kao i opterećeni i neopterećeni nadzemni vodovi. Tada je cilj primjenjene tehnike smanjenje sklopnih prenapona, kao i minimiziranje rizika od pojave ponovnog preskoka u prekidaču, pa samim tim i sprječavanje potencijalnog havarijskog stanja u mreži [29].

Još jedna primjena tehnike kontrolisanih operacija prekidača je pri automatskom ponovnom uključanju visokonaponskih prenosnih vodova, u cilju kontrolisanog vremenskog trajanja električnog luka u prekidaču. Time se postiže smanjenje naponskog, strujnog i termičkog naprezanja prekidača, kao i poboljšavanje prekidnih performansi prekidača, čime se povećava i životni vijek opreme. Smanjenje i ograničenje nivoa sklopnih prenapona od posebnog je značaja za koordinaciju izolacije i mogućnost smanjenja izolacionog nivoa u slučajevima izgradnje novih ili pak rekonstrukciji postojećih prenosnih vodova [29].

Pored prethodno nabrojanih prednosti koje se postižu primjenom tehnike kontrolisanih operacija, ova tehnika može i da priguši šumove i prenesena naponska naprezanja, smanjujući šanse za pojavu greške na kontrolnoj (upravljačkoj) i komunikacionoj opremi koja je sve više zastupljena u elektroenergetskim sistemima. Naime, sa nedavnim napretkom u elektronici i IT tehnologiji elektronska oprema se sve više primjenjuje u cilju monitoringa i kontrole rada elektroenergetske opreme u elektroenergetskim sistemima [1]. Trend upotrebe inteligentnih sistema, doveo je do pojave tzv. savremenih pametnih elektroenergetskih mreža (engl. *Smart Grid*), u kojima se sve više instalira kontrolna i komunikaciona oprema u sklopu elektroenergetske opreme. Ti inteligentni sistemi međusobno razmjenjuju kontrolne informacije o stanju kontrolne opreme, povećavajući time pouzdanost rada samog elektroenergetskog sistema. Da bi se osigurali stabilni sistemi bez greške neophodno je sprovesti određene zaštitne mjere, imajući u vidu da je kontrolna i komunikaciona oprema osjetljivija, tj. manje je otporna na šumove i naponska naprezanja, pa je stoga primjena tehnike kontrolisanih operacija prekidača i više nego poželjna.

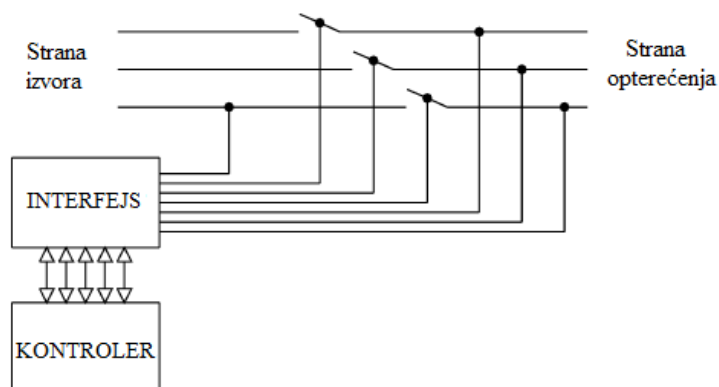
## 5.1. Sistem kontrolisanih operacija prekidača

Tehnika kontrolisanih operacija prekidača obezbjeđuje uključanje/isključanje tj. pojavu proticanja struje ili pojavu prekidanja struje, u vremenskim trenucima koji su optimalni prvenstveno za prekidač, kao i za ostalu opremu u elektroenergetskom sistemu sa aspekta strujnih i naponskih naprezanja, a takođe i za kvalitet električne energije isporučene krajnjim korisnicima elektroenergetskog sistema. Ova tehnika je poznata i pod nazivom Tehnika operacija prekidača u određenoj tački na talasu (engl. *Point On Wave Switching Methodology*), kao i Tehnika sinhronih kontrolisanih operacija prekidača (engl. *The Synchronously Controlled Switching Methodology*).

Osnovni elementi sistema kontrolisanih operacija prekidača, prikazani na slici 24. [30], su:

- Prekidač,
- Mjerni transformatori i senzori,

- Kontroler.



Slika 24. Osnovni elementi sistema kontrolisanih operacija prekidača.

### 5.1.1. Prekidač

U okviru trećeg poglavlja je pomenuto da prekidač mora ispuniti određene zahtjeve da bi se mogao koristiti u tehnici kontrolisanih operacija, a najvažniji od njih su:

- Mora biti jednopolne izvedbe, kako bi se njim moglo nezavisno upravljati u svakoj fazi,
- Mora imati doslednost operativnih vremena, kako bi se minimizirala mogućnost greške prilikom uključenje/isključenja u optimalnim trenucima koje je odredio kontroler.

Jednopolna izvedba prekidača podrazumijeva prekidač koji ima tri nezavisna pola, što omogućava kontroleru da nakon određivanja optimalnih trenutaka uključenje/isključenja na osnovu referentnih signala koje dobija od mjernih transformatora i senzora, izdaje posebne komande za uključenje/isključenje svakom nezavisnom polu prekidača. Time se postiže prilično pouzdano i tačno sinhrono uključenje/isključenje. Jedini nedostatak ovog pristupa, ako je to uopšte i nedostatak s obzirom kakvi se rezultati postižu njegovom primjenom, je povećanje troškova implementacije tehnike kontrolisanih operacija prekidača.

Kako bi se prethodno pomenuti troškovi implementacije smanjili, u brojnim istraživanjima se tvrdi da se tehnika kontrolisanih operacija prekidača može primjeniti i u slučaju prekidača trolejne izvedbe, tj. prekidača koji imaju tri zavisna pola. Tada kontroler određuje optimalni trenutak uključenja samo glavnog (engl. *master*) pola. Ostali polovi su mehanički povezani sa glavnim (engl. *master*) polom i fazno pomjereni za  $120^\circ$ , pri čemu se ovaj pomjeraj može predstaviti kao vremenska razlika od 3.3ms između operacija polova za sisteme frekvencije od 50Hz [27], [31], [32]. Iako je ovaj pristup ekonomski isplativiji, on se pokazao manje pouzdanim, zbog brzog trošenja mehaničkih veza kojima su polovi međusobno povezani, usled čega dolazi do grešaka, tj. manipulacije prekidača se ne dešavaju u procijenjenim optimalnim vremenskim trenucima koje je odredio kontroler [27]. Samim tim, tehnika kontrolisanih operacija prekidača postaje neefikasna, jer se i uprkos njoj



primjeni javljaju značajna strujna i naponska naprezanja, pa je stoga jednopolna izvedba prekidača u potpunosti ekonomski opravdana.

Sa aspekta doslednosti operativnih vremena prekidača najbolje su se pokazali savremeni SF<sub>6</sub> prekidači, koji u poređenju sa ostalim tipovima prekidača imaju najmanje varijacije u vremenima uključenja/isključenja i stoga se oni dominantno i primjenjuju kao prekidači u tehnicima kontrolisanih operacija.

### 5.1.2. Mjerni transformatori i senzori

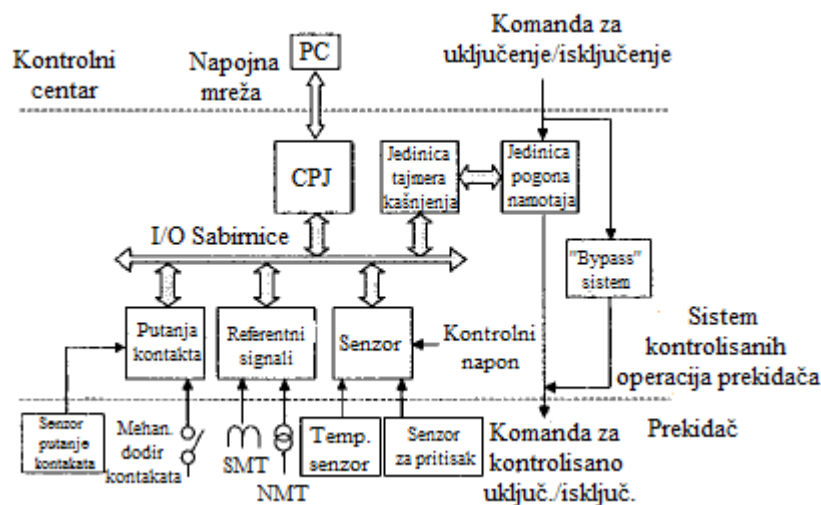
Drugi element sistema kontrolisanih operacija prekidača predstavljaju mjerni transformatori i brojni senzori, bez kojih ne bi bilo moguće funkcionisanje kontrolera. Izmjerene vrijednosti napona i struja sa naponskih i strujnih mjernih transformatora se prosleđuju kontroleru. Za slučaj operacije uključenja prekidača kontroleru su dovoljni referentni naponski signali sa obje strane prekidača, dok su za slučaj operacije isključenja prekidača neophodni kako referentni naponski, tako i strujni signali sa jedne strane prekidača. Pored talasnih oblika referentnog naponskog i strujnog signala da bi odredio optimalni trenutak uključenja/isključenja, kontroleru su neophodne i druge informacije, i to: status prekidača, temperatura okoline, broj sklopnih ciklusa prekidača itd., koje dobija od brojnih senzora koji su integrisani u prekidač.

### 5.1.3. Kontroler

Treći element, a ujedno i najvažniji, ključni element sistema kontrolisanih operacija prekidača je kontroler. Pravilno funkcionisanje kontrolera je od ključnog značaja i predstavlja glavni preduslov za uspješnu i efikasnu primjenu tehnike kontrolisanih operacija prekidača u cilju ograničenja uzrokovanih sklopnih tranzijenata. Osnovni zadaci kontrolera su sledeći [22]:

- Na osnovu mjerenja koja dobija od naponskih i strujnih mjernih transformatora, kontroler kontinuirano prati primarne naponske i strujne signale, kao i signale koje dobija od brojnih senzora.
- Analizira sve prikupljene signale i vrši procjenu optimalnog vremenskog trenutka operacije prekidača, tj. operacije uključenja/isključenja prekidača.
- Optimalne vremenske trenutke operacije prekidača, trenutke uključenja/isključenja procjenjuje posebno za svaku fazu.
- Nakon određenih optimalnih vremenskih trenutaka uključenja/isključenja prekidača svake faze, šalje komandu za uključenje/isključenje svakom polu posebno, čime se postiže uključenje/isključenje u optimalnim vremenskim trenucima za svaku fazu.
- I kao poslednji zadatak, kontroler po završetku kontrolisane operacije prekidača, procjenjuje uspješnost operacije uključenja/isključenja prekidača i shodno dobijenim rezultatima izvršava korekcije za sledeću operaciju prekidača.

Na slici 25. prikazan je blok dijagram hardvera kontrolera [21].



25. Blok dijagram hardvera kontrolera.

Osnovne karakteristike kontrolera su [1]:

- Kontroler koristi 32-bitnu centralnu procesorsku jedinicu (CPJ), koja se takođe primjenjuje kod digitalnih zaštitnih releja. Time je obezbjeđena visoka pouzdanost i omogućena brza obrada algoritma kontrolisanih operacija prekidača.
- Kontroler ima mogućnost čuvanja prethodnih zapisa operacija, kao što su vremena uključjenja/isključjenja, ulazna komanda uključjenja, kontrolni napon, radni pritisak, temperatura ambijenta, talasni oblik napona itd.
- Kontroler je dizajniran da izdrži različita naprezanja okoline, kao što su naponska i strujna naprezanja uzrokovana sklopnim operacijama, mehaničke vibracije, visoke i niske temperature. Zaštita od različitih naprezanja okoline se postiže time što je kontroler postavljen unutar lokalne kontrolne table ili kontrolnog kućišta.
- Kontroler takođe ima mogućnost samo-kontrole (engl. *self-check*), tj. provjere ispravnosti svog sopstvenog rada. Pored toga, može procijeniti uspjeh ili neuspjeh kontrolisane operacije prekidača, tj. uključjenja/isključjenja prekidača, zatim može otkriti pojavu ponovnog iskrenja kroz talasne oblike struje ili pojavu ponovnog paljenja električnog luka.

Prilikom puštanja u rad kontrolera, prvi korak je ispitivanje njegovih performansi, što se postiže sprovođenjem nekoliko testnih operacija uključjenja/isključjenja prekidača van pogona (engl. *offline*), a zatim i nekoliko operacija uključjenja/isključjenja prekidača u realnom vremenu. Naponski, strujni i kontrolni signali se snimaju i ocjenjuju tokom svih prethodno pomenutih testnih operacija prekidača, sa nastojanjem da se kao rezultat sprovedene analize izvrši fino podešavanje funkcija kontrolera [22]. Nakon toga, kontroler je u potpunosti spreman da se pusti u rad, pri čemu on tokom svog radnog vijeka ne zahtijeva

redovno održavanje, ali se od njega očekuje da aktivira alarm u slučaju neispravnosti ili drugih nepoželjnih uslova.

Od kontrolera se očekuje da obezbjedi operacije uključenja/isključenja prekidača u opsegu  $\pm 1\text{ms}$  u odnosu na procijenjeni optimalni vremenski trenutak uključenja/isključenja prekidača [22]. Ovo vrijeme definiše se kao ciljna greška kontrolera [22], tj. razlika između stvarnog trenutka operacije uključenja/isključenja prekidača i procijenjenog optimalnog vremenskog trenutka uključenja/isključenja prekidača, i ona predstavlja ključni kriterijum za ocjenjivanje performansi kontrolera.

Što se tiče razvoja kontrolera, njegov prvi tip se kao i mnogi uređaji u ostalim oblastima tehnologije pojavio kao jednostavan uređaj, a zatim se kasnije sa dodatnim razvojem i novim istraživačkim iskustvima na tržištu pojavio značajno sofisticiraniji i unaprjeđeniji tip kontrolera. Najosnovniji kontroler je imao mogućnost praćenja samo referentnih naponskih i strujnih signala, na osnovu kojih je kontroler procjenjivao optimalne vremenske trenutke operacija uključenja/isključenja prekidača [20]. Od korisnika se zahtijevalo da, u cilju postizanja odgovarajuće kompenzacije, sam prepozna sve probleme vezane za varijacije u operativnim vremenima rada prekidača. Kako bi se poboljšale performanse kontrolera, u novoj verziji kontrolera je omogućeno praćenje promjenjivih kao što su temperatura, jednosmjerni (DC) napon, pritisak, vrijeme neaktivnosti prekidača itd., pomoću brojnih senzora integrisanih u prekidač [20].

Inženjeri su i dalje radili na poboljšavanju performansi kontrolera, pa su se na tržištu pojavili i kontroleri sa većim opsegom podešavanja, što je bilo izuzetno korisno na mjestima na kojima zavisno od okolnosti postoje različite izvedbe prekidača. Naime, kontroler je imao sposobnost da prilagodi algoritam kontrolisanih operacija prekidača za odgovarajuću upotrebu, što je bilo izuzetno korisno [20]. Neke od dodatnih funkcija koje su razvijene kod novih tipova kontrolera su: mogućnost određivanja zaostalog naelektrisanja na vodu, kao i mogućnost određivanja zaostalog fluksa u transformatoru.

U početku su svi prethodno pomenuti tipova kontrolera radili na principu "otvorene petlje", tj. nije postojala povratna informacija o uspješnosti operacije uključenja/isključenja prekidača u predviđenom optimalnom vremenskom trenutku. Međutim, kasnije je primjenjen princip "zatvorene petlje" čime je omogućeno kreiranje signala greške, koji se takođe uzimao u obzir u algoritmu kontrolisanih operacija uključenja/isključenja prekidača za narednu operaciju, čime su značajno unaprjeđene performanse kontrolera. Ova karakteristika kontrolera se opisuje kao učenje tokom vremena, i sada kontroler pored promjenjivih koje je ranije u svom algoritmu analizirao: temperature ambijenta, vremena neaktivnosti, pritiska, analizira i novu promjenjivu, tj. signal greške, kao i zavisnost između svih ovih promjenjivih. Kao rezultat toga kontroler može da određene informacije o operativnom vremenu prekidaču vezanom za ove promjenjive, što može biti od velike koristi u stvaranju (procjenjivanju) karakteristika prekidača, i iskoristiti se kao referentna tačka za slične prekidače [20].

Na slici 26. prikazan je primjer ekrana web interfejs-a jednog savremenog kontrolera [22]. U lijevom okviru se mogu vidjeti sve nedavne kontrolisane sklopne operacije, dok su u desnom okviru prikazani detalji poslednje kontrolisane sklopne operacije koja je označena bold i italic slovima u lijevom okviru.

Date	Time	Op.	Electrical Target Error (ms)		
			L1	L2	L3
2015-05-07	11:39:03.817000	C	0.36	0.42	0.51
2015-05-07	11:15:59.697000	O	-0.34	-0.24	-0.17
2015-05-07	11:11:50.593000	C	0.43	0.27	0.33
2015-05-06	12:27:49.758000	O	-0.16	-0.32	-0.24
2015-05-06	12:26:52.956000	C	0.47	0.53	0.38
2015-05-06	12:21:52.221000	O	-0.12	-0.30	-0.20
2015-05-06	12:18:06.101000	C	0.38	0.48	0.32
2015-05-06	12:11:05.912000	O	-0.25	-0.16	-0.33
2015-05-06	12:10:13.363000	C	0.92	0.76	0.82
2015-05-06	12:08:05.106000	O	-0.33	-0.23	-0.15
2015-05-06	12:07:29.114000	C	1.77	1.87	1.96
2015-05-06	12:06:51.194000	O	-0.28	-0.18	-0.36
2015-05-06	12:05:27.366000	C	0.47	0.31	0.16
2015-05-06	12:03:18.684000	O	-0.17	-0.10	-0.25
2015-05-06	12:02:24.071000	C	0.30	0.36	0.46
2015-05-06	12:00:21.827000	O	-0.26	-0.18	-0.33
2015-05-06	11:59:15.685000	C	0.25	0.35	0.41
2015-05-06	11:57:50.403000	O	-0.24	-0.14	-0.32

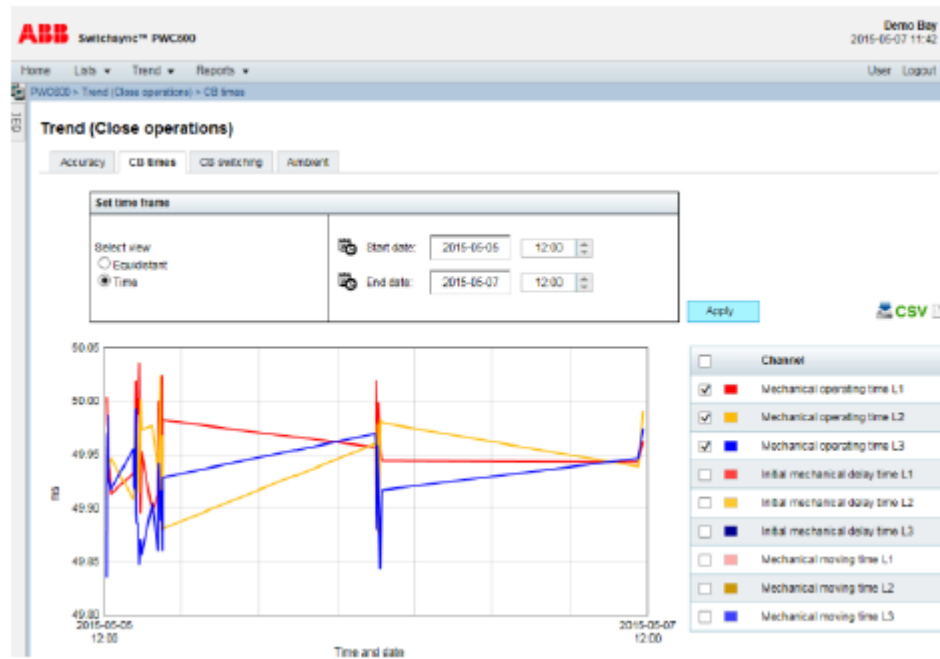
  

Description	Value			Unit
	L1	L2	L3	
Electrical target error	0.36	0.42	0.51	ms
Electrical operating time	47.67	47.69	47.72	ms
Predicted electrical operating time	47.31	47.27	47.21	ms
Current making angle	93.01	94.01	95.77	deg
Target current making angle	86.50	86.50	86.50	deg
Arcing time	0.00	0.00	0.00	ms
Target arcing time	0.00	0.00	0.00	ms
Mechanical target error	-1.41	-1.34	-1.29	ms
Mechanical operating time	49.96	49.99	49.97	ms
Predicted mechanical operating time	51.37	51.33	51.26	ms
Initial mechanical delay time	20.04	20.05	20.04	ms
Mechanical moving time	35.18	35.21	35.19	ms
Primary contact velocity	4.55	4.54	4.55	m/s
Controller delay time	48.94	48.94	48.94	ms
Idle time	0.38	0.38	0.38	h
Spring charge	0.00	0.00	0.00	

Slika 26. Primjer ekrana web interfejs-a savremenog kontrolera, koji prikazuje sve nedavne kontrolisane operacije prekidača, kao i detaljne podatke o poslednjoj kontrolisanoj operaciji prekidača.

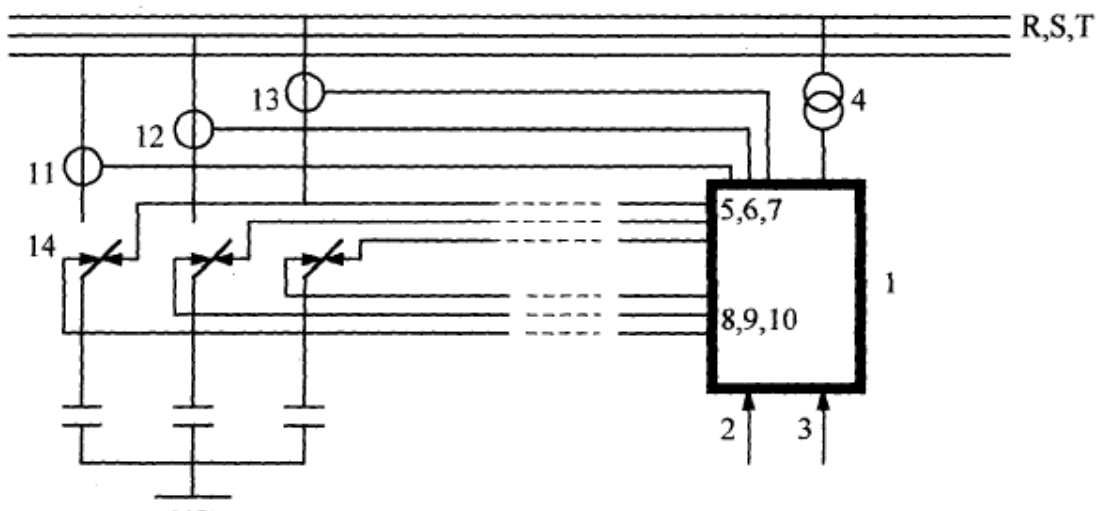
Najsavremeniji kontroleri imaju dovoljan računarski kapacitet za dalju obradu snimljenih i proračunatih podataka, koji su prikazani na slici 26. Tako na primjer, grafički prikaz karakteristika operativnih vremena prekidača, prikazan na slici 27. može otkriti oštećenja na prekidaču, tj. habanje kontakata prekidača kao posledica njegovog radnog vijeka i time ukazati na potrebu održavanja ili pak remonta samog prekidača [22]. Na ovom grafiku je takođe moguće uočiti i zavisnost operativnog vremena prekidača usled vremena neaktivnosti.

Kontroler može da uporedi procijenjene rezultate sa već ranije definisanim, graničnim vrijednostima, i u slučaju da je bilo koja vrijednost premašila ograničenja može aktivno upozoriti korisnika i uključiti relevantne podatke u poruci obavještenja [22]. Da bi uopšte bilo moguće napraviti sveobuhvatnu analizu svih prikupljenih podataka, neophodno je preduzeti sve potrebne mjere i radnje u cilju preuzimanja svih podataka u radnu stanicu operatora. Nakon preuzimanja podataka, uz pomoć odgovarajućih softverskih alata moguće je sprovesti sveobuhvatna istraživanja i donijeti određene zaključke, čija će primjena doprinijeti daljem poboljšanju performansi kontrolera.



Slika 27. Primjer ekrana web interfejs-a kontrolera koji prikazuje stvarne grafike operativnih vremena uključivanja kontrolisanog prekidača.

U [33] predstavljen je kontroler koji se koristi u rumunskom elektroenergetskom sistemu naponskog nivoa 400kV, i čijom primjenom se postiže značajno ograničenje sklopnih prenapona. Njegov naziv je Switchsync F236, proizveden u ABB Switchgear AB-Sweden [33], a njegov princip rada se zasniva na logici optimalnog algoritma tehnike kontrolisanih operacija prekidača, o kojem će se detaljnije govoriti u nastavku ovog rada. Dio jednopolne šeme za napajanje kondenzatorskih baterija, na kojoj je prikazan i kontroler – Switchsync F236, je prikazan na slici 28. [33].



Slika 28. Dio jednopolne šeme za napajanje kondenzatorskih baterija.

Princip rada na primjeru operacije uključanja prekidača u optimalnom vremenskom trenutku će biti objašnjen u nastavku, posmatranjem slike 28. Naime, kontroler, odnosno sinhronizaciona jedinica (1) dobija komandu za uključanje od kontrolnog (upravljačkog) sistema na jednom od dva ulaza, označena brojevima (2) i (3) [33]. Na osnovu signala koje dobija od naponskog mjernog transformatora (4), i brojnih senzora koji su integrisani u prekidač, određuje prvi naredni optimalni vremenski trenutak uključanja na osnovu primjene algoritma tehnike kontrolisanih operacija prekidača, imajući takođe u vidu i sopstveno operativno vrijeme prekidača. Nakon sprovedenog algoritma i određivanja optimalnog vremenskog trenutka uključanja, kontroler šalje, prethodno odloženu, komandu uključanja prekidaču (14), tj. operativnim namotajima prekidača putem izlaza (5), (6) i (7) pri čemu se postiže uključanje u prethodno procjenjenom optimalnom vremenskom trenutku, pri željenom faznom stavu referentnog napona.

Prva cifra u oznaci tipa kontrolera ukazuje na to da kontroler ima dva ulaza (engl. *input*) za prijem komandi od kontrolnog (upravljačkog) sistema za operacije prekidača, tj. za prijem ili komande za operaciju uključanja prekidača ili komande za operaciju isključenja prekidača [33].

Druga cifra u oznaci tipa ukazuje na to da kontroler ima tri adaptivna (prilagodljiva) ulaza, tj. po jedan ulaz za detekciju vremenskog trenutka uključanja svakog pola prekidača pri operaciji kontrolisanog uključanja, što se postiže kontinuiranim praćenjem struje proticanja kroz strujne mjerne transformatore (11, 12, 13) [33].

Treća cifra u oznaci tipa ukazuje na to da kontroler ima šest komandnih izlaza (engl. *output*), putem kojih kontroler šalje komande za uključanje u optimalnim vremenskim trenucima svakom polu prekidača (5,6 i 7), odnosno komandu za isključenje u optimalnim vremenskim trenucima svakom polu prekidača (8, 9, 10) [33].

Dakle, primjenom kontrolera omogućene su vremenski kontrolisane operacije uključanje/isključenja prekidača, posredstvom algoritma kontrolisanih operacija prekidača, čime se operacija prekidača uvijek izvršava u optimalnom vremenskom trenutku pri faznom stavu, čime su eliminisani sklopni ili pak značajno ograničeni.

## **5.2.Prednosti tehnike kontrolisanih operacija prekidača**

Poređenjem konvencionalnih tehnika i tehnike kontrolisanih operacija prekidača, kako je to i ranije pomenuto, može se donijeti zaključak da je glavna prednost tehnike kontrolisanih operacija prekidača njeno preventivno djelovanje. Naime, kontrolisanom operacijom prekidača u optimalnom vremenskom trenutku sprječava se, ili pak značajno ograničava, sama pojava naponskih i strujnih tranzijenata, za razliku od konvencionalnih tehnika koje djeluje tek nakon pojave prethodno pomenutih tranzijenata. Dakle, tehnika kontrolisanih operacija prekidača ima tendenciju da izbjegne samu pojavu neželjenih tranzijenata, dok konvencionalne tehnike djeluju kasnije i imaju tendenciju da ograniče tranzijente koji već postoje.

Primjenom tehnike kontrolisanih operacija prekidača se postižu prednosti u oba slučaja kontrolisanih operacija, kako u slučaju kontrolisane operacije uključivanja prekidača, tako i u slučaju kontrolisane operacije isključenja prekidača. Kontrolisanim uključivanjem prekidača značajno se smanjuju uzrokovana naponska i strujna naprezanja, produžavajući time radni vijek prekidača. Sa druge strane, kontrolisanim isključenjem prekidača poboljšavaju se uslovi tokom prekidanja struje, čime se značajno poboljšavaju performanse prekidača.

Prednosti koje se postižu primjenom tehnike kontrolisanih operacija prekidača u cilju ograničenje naponskih i strujnih tranzijenata uzrokovanih manipulacijama prekidača su brojne i mogu se posmatrati kako sa tehničkog, tako i sa ekonomskog aspekta, i značajno poboljšavaju funkcionisanje elektroenergetskog sistema u cjelini.

Prednosti primjene tehnike kontrolisanih operacija prekidača sa tehničkog aspekta su [1]:

- Smanjenje naponskih i strujnih tranzijenata kod opreme, pa i u čitavom elektroenergetskom sistemu.
- Poboljšanje performansi prekidača tokom kontrolisane operacije isključenja prekidača, tj. prekidanja struje.
- Značajno poboljšanje kvaliteta električne energije.
- Eliminisanje pogrešnih operacija zaštitnih uređaja sistema, releja.

Sa ekonomskog aspekta prednosti primjene tehnike kontrolisanih operacija prekidača su [1]:

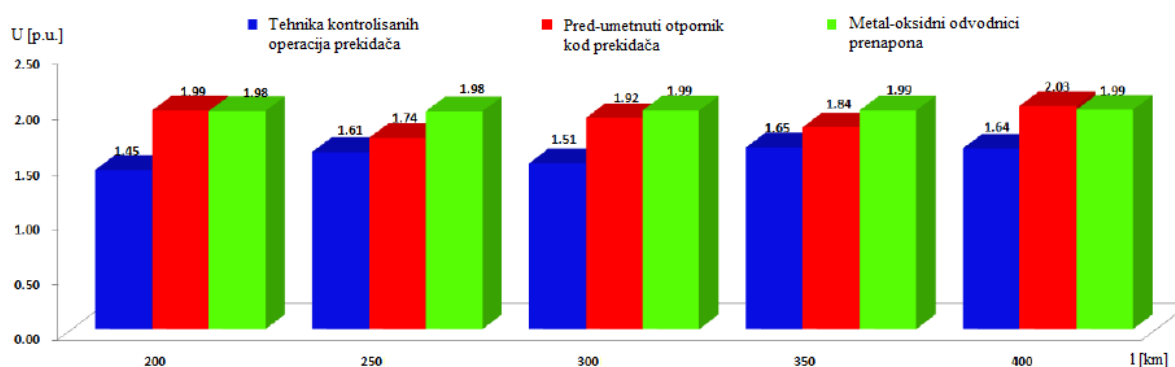
- Značajno povećanje očekivanog radnog vijeka opreme u elektroenergetskom sistemu.
- Smanjenje rizika od pojave kvarova (otkaza) opreme.
- Eliminisanje pred-umetnutih otpornika, kao i dodatnih komora kod prekidača čime se značajno smanjuje cijena prekidača za približno 25%, pa samim tim nestaje i potreba za održavanjem pred-umetnutih otpornika i dodatnih komora kod prekidača.

Prednosti primjene tehnike kontrolisanih operacija prekidača najviše dolaze do izražaja prilikom uključivanja malih kapacitivnih i induktivnih struja, kao i uključivanja dugih vodova. Sa stanovišta stabilnosti elektroenergetskog sistema, prilikom prekidanja struja kratkog spoja, najbolji rezultati se postižu primjenom savremenih SF<sub>6</sub> prekidača, koji su se pokazali i kao najbolji tip prekidača za implementaciju u tehnici kontrolisanih operacija prekidača prvenstveno zbog njihove doslednosti u operativnim vremenima.

Dakle, sve veća primjena tehnike kontrolisanih operacija prekidača u cilju ograničenja naponskih i strujnih tranzijenata uzrokovanih manipulacijama prekidača, dovela je do pojednostavljenja prekidačkog sistema zahvaljujući eliminaciji pred-umetnutih otpornika. Samim tim, značajno je povećana i pouzdanost rada elektroenergetskog sistema, jer kako je i ranije pomenuto, pred-umetnuti otpornik predstavlja jedan od ključnih uzroka pojave kvara prekidačkog sistema. Takođe, time su značajno smanjeni troškovi vezani za ugradnju i održavanje prekidača, kao i produžen radni vijek prekidačkog sistema.

Poređenjem rezultata istraživanja koja su sprovedena u brojnim međunarodnim radovima, može se donijeti zaključak da se značajno bolji rezultati u ograničenju amplitude sklopnih prenapona postižu primjenom tehnike kontrolisanih operacija prekidača nego primjenom konvencionalnih tehnika. Konkretno, u [34] sprovedene su uporedne analize tehnika koje se primjenjuju u cilju ograničenja sklopnih prenapona uzrokovanih automatskim ponovnim uključanjem prenosnog dalekovoda, naponskog nivoa 500kV, i to: tehnika kontrolisanih operacija prekidača, upotreba prekidača sa pred-umetnutim otpornicima i upotreba metal-oksidnih odvodnika prenapona na oba kraja voda. Najbolji rezultati su postignuti primjenom tehnike kontrolisanih operacija prekidača, pri svim dužinama dalekovoda, što se može vidjeti na slici 29. [34].

Slične prethodno pomenutoj studiji, su i studije sprovedene u iranskom prenosnom sistemu [31], [32]. Dobijeni rezultati u slučaju obje studije dokazuju prednosti tehnike kontrolisanih operacija prekidača, tačnije kontrolisanog uključanja, u poređenju sa konvencionalnim tehnikama ograničenja sklopnih prenapona uzrokovanih uključanjem prenosnih dalekovoda naponskog nivoa 400kV [31], [32].



Slika 29. Poređenje maksimalnih amplituda sklopnih prenapona uzrokovanih automatskim ponovnim uključanjem prenosnog dalekovoda [34].

U [35] izvršena je analiza sklopnih prenapona, kao i uporedna analiza primjene tehnike kontrolisanih operacija prekidača i konvencionalne tehnike ograničenja primjenom metal-oksidnih odvodnika prenapona, za slučaj uključanja podzemnih i podmorskih kablova naponskog nivoa 115kV u tajlandskom elektroenergetskom sistemu. Rezultati ispitivanja pokazuju da amplituda sklopnih prenapona na napojnom i prijemnom kraju energetskog kabla bez primjene ijedne tehnike dostiže vrijednosti od 1.677 p.u. i 2.092 p.u. , respektivno [35]. Postavljanjem odvodnika prenapona na oba kraja energetskog kabla, dostižu se sklopni prenaponi na napojnom kraju vrijednosti amplitude 1.664 p.u. i 1.847 p.u. na prijemnom kraju [35]. Dodatno ograničenje sklopnih prenapona se može postići primjenom tehnike kontrolisanih operacija prekidača, čijom primjenom se dodatno smanjuje vrijednost amplitude na prijemnom kraju na vrijednost od 1.168 p.u. [35].

Dakle, brojne studije pokazuju da primjena tehnike kontrolisanih operacija prekidača daje neuporedivo bolje rezultate u cilju ograničenja sklopnih prenapona, u poređenju sa konvencionalnim metodama. Uprkos tome, kao najbolje rješenje za ograničenje sklopnih



prenapona predlaže se primjena tehnike kontrolisanih operacija prekidača u kombinaciji sa odvodnicima prenapona postavljenim na krajevima dalekovoda. Upotreba odvodnika prenapona bi obezbjedila bolje rezultate, kao i pouzdanost i sigurnost u radu elektroenergetskog sistema u slučaju neispravnosti sistema kontrolisanih operacija prekidača. Takođe, primjenom odvodnika prenapona štiti se elektroenergetski sistem od prenapona uzrokovanih atmosferskim pražnjenjem, jer sistem kontrolisanih operacija prekidača štiti elektroenergetski sistema samo od sklopnih prenapona.

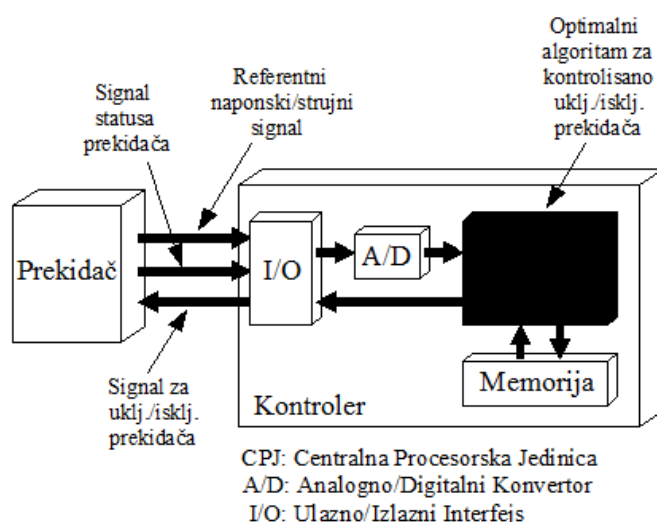
Prednosti primjene tehnike kontrolisanih operacija su odmah vidljive i dugotrajne. Konstantnim napredovanjem i usavršavanjem ove tehnike povećava se njena fleksibilnost, pouzdanost, olakšava implementacija, a takođe i značajno smanjuje cijena same implementacije ove tehnike, omogućavajući time i poboljšanje prednosti u velikoj mjeri za cijeli elektroenergetski sistem.

## 6. OPTIMALNI ALGORITAM ZA KONTROLISANO UKLJUČENJE/ISKLJUČENJE PREKIDAČA U VISOKONAPONSKIM POSTROJENJIMA

Napredne tehnike sa ciljem ograničenja sklopnih prenapona baziraju se na optimalnom algoritmu za kontrolisano uključenje/isključenje prekidača u visokonaponskim postrojenjima.

Sistem kontrolisanih operacija prekidača čine: prekidač, mjerni transformatori i senzori, i kontroler kao najvažniji element sistema. Kontroler sinhronizuje trenutak uključjenja/isključjenja pojedinih polova prekidača sa faznim uglom referentnog signala napona i/ili struje, tako da dolazi do uključjenja/isključjenja u optimalnim vremenskim trenucima i značajnog ograničenja sklopnih prenapona.

Prilikom kontrolisane operacije uključjenja prekidača napon svake faze, status prekidača, kao i ostali parametri koje mjere brojni senzori, se šalju kontroleru (slika 30. [36]). Da bi se analogni naponski signal mogao upotrijebiti u sistemu kontrolisanih operacija prekidača, tačnije u Centralnoj Procesorskoj Jedinici (CPJ) kontrolera, neophodno ga je konvertovati u digitalne vrijednosti pomoću analogno-digitalnog konvertora. Na osnovu svih prikupljenih podataka, kontroler vrši procjenu optimalnog vremenskog trenutka uključjenja prekidača, i šalje komandu za uključenje prekidaču ukoliko je prethodno primio eksternu komandu za uključenje od operatora sistema ili sistema automatskog ponovnog uključjenja.



Slika 30. Sistem kontrolisanih operacija prekidača.

U literaturi postoje brojni naučni radovi u kojima je objašnjen princip rada optimalnog algoritma za kontrolisano uključenje/isključenje prekidača u visokonaponskim postrojenjima. U nastavku će biti prikazani neki od njih.

U [20] razmotreni su principi tehnike kontrolisanih operacija prekidača, a takođe i predstavljeni algoritmi za kontrolisano uključenje/isključenje prekidača u visokonaponskim postrojenjima.

Operacija kontrolisanog isključenja prekidača se može definisati kao kontrolisano razdvajanje kontakata svakog pola prekidača zavisno od referentnog strujnog signala. Kontrolisanim isključenjem prekidača u optimalnom vremenskom trenutku omogućeno je određivanje trajanja električnog luka između kontakata prekidača, čime su značajno smanjeni poremećaji u elektroenergetskom sistemu uzrokovani naponskim i strujnim naprezanjima, a takođe i značajno smanjen rizik od pojave otkaza prekidača.

Princip kontrolisanog isključenja prekidača je gotovo identičan, bez obzira koja se visokonaponska oprema (vodovi, transformatori, kondenzatorske baterije...) isključuje. Optimalni vremenski trenutak isključenja prekidača je najčešće moguće odrediti uzimanjem u obzir samo referentni strujni signal, koji se dobija od strujnih mjernih transformatora koji mjere struju kroz prekidač. Takođe se može koristiti i referentni naponski signal, koji se dobija od naponskih mjernih transformatora koji mjere napon na sabirnicama, ali u tom slučaju mora uvijek biti poznata fazna razlika između napona i struje [20].

Kontrolisanim isključenjem postiže se razdvajanje kontakata prekidača odmah nakon vremenskog trenutka u kojem struja prolazi kroz nulu. Kako kontakti nastavljaju da se otvaraju dolazi do pojave formiranja električnog luka koji će biti ugašen za manje od pola ciklusa kasnije u sledećem vremenskom trenutku u kojem struja prolazi kroz nulu [20]. Da ne bi došlo do pojave ponovnog paljenja električnog luka neophodno je da napon koji je potreban za njegovo paljenje bude veći od napona mreže, čime će gašenje luka biti postignuto.

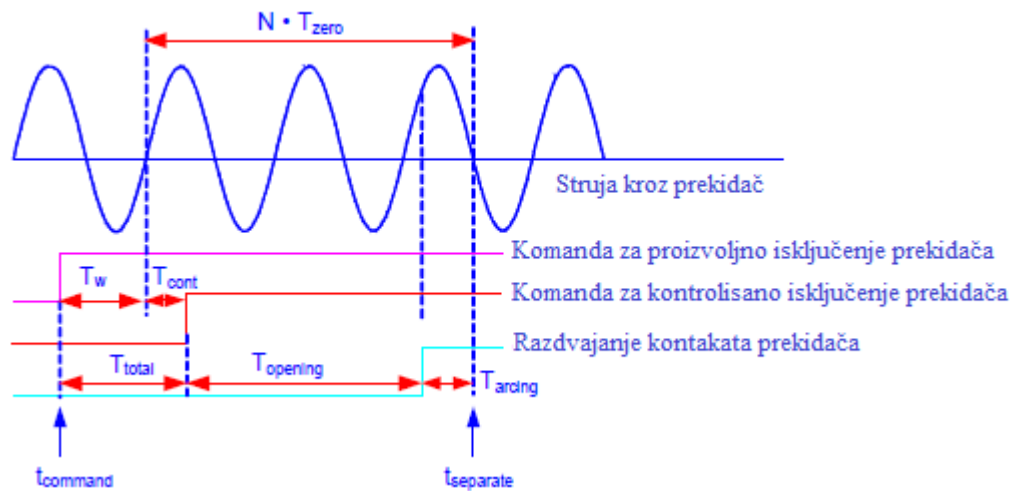
Na slici 31. prikazan je vremenski redosled kontrolisanog isključenja [20]. Komanda za isključenje prekidača je izdata proizvoljno u odnosu na referentni strujni signal u vremenskom trenutku  $t_{command}$ . Kontroler odlaže prethodno pomenutu komandu za isključenje za neki vremenski interval  $T_{total}$ . Vremenski interval odlaganja komande isključenje  $T_{total}$  može se izraziti kao suma dva podintervala [20]:

$$T_{total} = T_w + T_{cont} \quad (21)$$

gdje je:

$T_w$  – vremenski interval čekanja,

$T_{cont}$  – namjerno sinhronizovano vremensko odlaganje komande isključenja.



Slika 31. Vremenski redosled kontrolisanog isključenja.

Vremenski interval namjernog sinhronizovanog odlaganja komande isključenja se može izračunati na osnovu odgovarajućeg (relevantnog) prolaska kroz nulu, koji je funkcija vremena isključenja prekidača,  $T_{opening}$ , i pomoću optimalnog faznog ugla vremenskog trenutka razdvajanja kontakata,  $t_{separate}$  [20].

$$T_{cont} = N \cdot T_{zero} - T_{arcing} - T_{opening} \quad (22)$$

gdje je:

$T_{zero}$  – vremenski trenutak prolaska referentnog strujnog signala kroz nulu,

$T_{arcing}$  – vrijeme trajanja električnog luka,

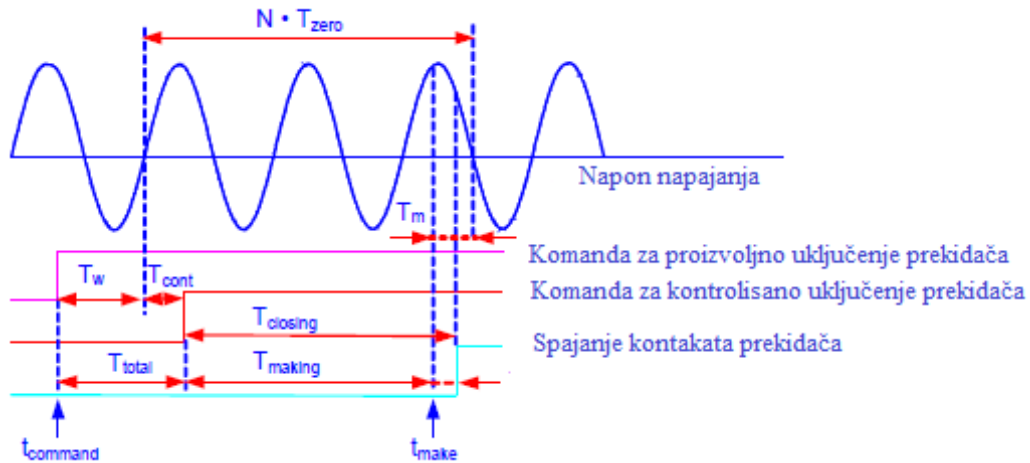
$T_{opening}$  – vrijeme trajanja mehaničkog isključenja prekidača.

Tačno kontrolisanje trenutka razdvajanja kontakata  $t_{separate}$ , u zavisnosti od sledećeg vremenskog trenutka u kojem struja prolazi kroz nulu kada dolazi do gašenja električnog luka, efikasno definiše vrijeme trajanja električnog luka  $T_{arcing}$ . Vremenski interval mehaničkog isključenja prekidača traje od trenutka kad je prekidač dobio komandu za isključenje, do početka razdvajanja kontakata  $N \cdot T_{zero}$  je cijeli broj ciklusa koji se zahtijeva u cilju postizanja pozitivne vrijednosti  $T_{cont}$  [20].

Operacija kontrolisanog uključanja prekidača se može definisati kao kontrolisanje tačke provođenja svakog pola prekidača zavisno od referentnog naponskog signala. Dakle, referentni signal na osnovu kojeg kontroler procjenjuje optimalni trenutak uključanja prekidača je signal koji dobija od naponskog mjernog transformatora, koji mjeri napon napajanja.

Kao i u slučaju kontrolisanog isključenja, komanda za uključanje prekidača se izdaje u proizvoljnom vremenskom trenutku  $t_{command}$ . Vremenski redosled kontrolisanog uključanja je prikazan na slici 32., pri čemu je procijenjeno da je optimalni trenutak uključanja

prekidača pri maksimalnom naponu, pretpostavljajući da je vrijeme pred-iskrenja manje od polovine ciklusa [20].



Slika 32. Vremenski redosled kontrolisanog uključanja.

Kontroler odlaže komandu za uključivanje prekidača za neki vremenski interval  $T_{total}$ , koji takođe može biti predstavljen kao suma dva podintervala prikazana u relaciji (21), tj.: namjernog sinhronizovanog vremenskog odlaganja komande uključivanja  $T_{cont}$  i određenog vremenskog intervala čekanja  $T_w$ . Vremenski podinterval  $T_{cont}$  je određen vremenom trajanja mehaničkog uključivanja prekidača  $T_{closing}$ , vremenom pred-iskrenja  $T_{prestriking}$  i stvarnim faznim stavom optimalnog vremenskog trenutka uključivanja [20].

Kontroler uvodi vremensko odlaganje komande uključivanja zavisno od odgovarajućeg (relevantnog) prolaska kroz nulu koji je proračunat pretpostavljanjem operativnog vremena uključivanja prekidača  $T_{closing}$  i vremena pred-iskrenja  $T_{prestriking}$ . Struja počinje da protiče u vremenskom trenutku  $t_{make}$  i odgovarajućem vremenskom intervalu  $T_m$  koji je definisan u zavisnosti od sledećeg prolaska referentnog naponskog signala kroz nulu  $t_{make}$  [20].

$$\begin{aligned} T_{cont} &= N \cdot T_{zero} - T_m - (T_{closing} - T_{prestriking}) \\ &= N \cdot T_{zero} - T_m - T_{making} \end{aligned} \quad (23)$$

gdje je:

$T_{zero}$  – vremenski trenutak prolaska referentnog naponskog signala kroz nulu,

$T_{prestriking}$  – vrijeme trajanja pred-iskrenja,

$T_{closing}$  – operativno vrijeme uključivanja prekidača,

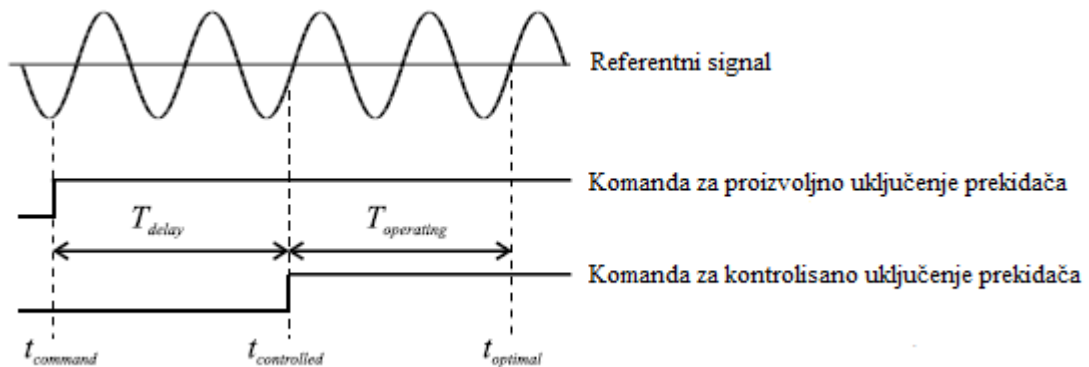
$T_{making}$  – vremenski trenutak uključivanja.

Operativno vrijeme uključivanja prekidača  $T_{closing}$  se može definisati kao vremenski interval od trenutka kada prekidač dobije komandu za uključivanje, pa do trenutka mehaničkog

dodira kontakata prekidača. Vrijeme pred-iskrenja  $T_{prestriking}$  se može definisati kao vremenski interval od trenutka pojave pred-iskrenja do trenutka mehaničkog dodira kontakata prekidača. Vremenski trenutak uključjenja  $T_{making}$  je vremenski interval od trenutka kada prekidač dobije komandu za uključjenje do trenutka  $t_{make}$ .

U [37] je takođe predstavljena tehnika kontrolisanih operacija uključjenja prekidača u cilju smanjenja sklopnih prenapona u prenosnom sistemu, uzrokovanih uključjenjem i automatskim ponovnim uključjenjem dalekovoda. U nastavku će biti objašnjen optimalni algoritam za kontrolisano uključjenje prekidača.

Komanda za uključjenje prekidača je obično izdata u proizvoljnom vremenskom trenutku  $t_{command}$ , u odnosu na fazni ugao referentnog naponskog signala. Trenutak zatvaranja kontakata prekidača obično nastupa nakon isteka vremena koje se zove operativno vrijeme prekidača  $T_{operating}$ . Ovdje je takođe bitno napomenuti, da je moguće da će kada započne operacija uključjenja doći do pojave proticanja struje i prije nego što se kontakti prekidača mehanički dodirnu, što je posledica pred-iskrenja. Vremenski raspored kontrolisanog uključjenja prekidača je prikazan na slici 33. [37].



Slika 33. Vremenski redosled kontrolisanog uključjenja.

Optimalni algoritam za kontrolisano uključjenje prekidača počinje prethodno pomenutim vremenskim trenutkom u kojem je izdata komanda za uključjenje,  $t_{command}$ . Da bi se uključjenje prekidača desilo u optimalnom vremenskom trenutku  $t_{optimal}$  u odnosu na fazni ugao referentnog naponskog signala, komanda za uključjenje  $t_{command}$  se odlaže za vremenski interval  $T_{delay}$ , imajući u vidu i operativno vrijeme prekidača. Dakle, predviđeni optimalni vremenski trenutak uključjenja prekidača  $t_{optimal}$  će se pojaviti u trenutku  $T_{delay} + T_{operating}$ , posle  $t_{command}$  [37].

Operativno vrijeme prekidača  $T_{operating}$ , kako je već ranije i definisano, predstavlja vremenski interval od trenutka kada prekidač dobije komandu za uključjenje do mehaničkog dodira kontakata prekidača, i ono zavisi od tipa prekidača. Obično je vrijednost operativnog vremena prekidača oko 50ms [37].

Vremenski interval odlaganja komande uključjenja prekidača  $T_{delay}$  može se izraziti kao suma dva podintervala [37]:

$$T_{\text{delay}} = T_{\text{compute}} + T_{\text{synchronize}} \quad (24)$$

gdje je:

$T_{\text{compute}}$  – interni interval obrade optimalnog algoritma za kontrolisano uključenje prekidača u cilju procjenjivanja optimalnog vremenskog trenutka uključjenja  $t_{\text{optimal}}$ ,

$T_{\text{synchronize}}$  – interval za sinhronizaciju sa predviđenim  $t_{\text{optimal}}$ , imajući u vidu operativno vrijeme prekidača  $T_{\text{operating}}$ .

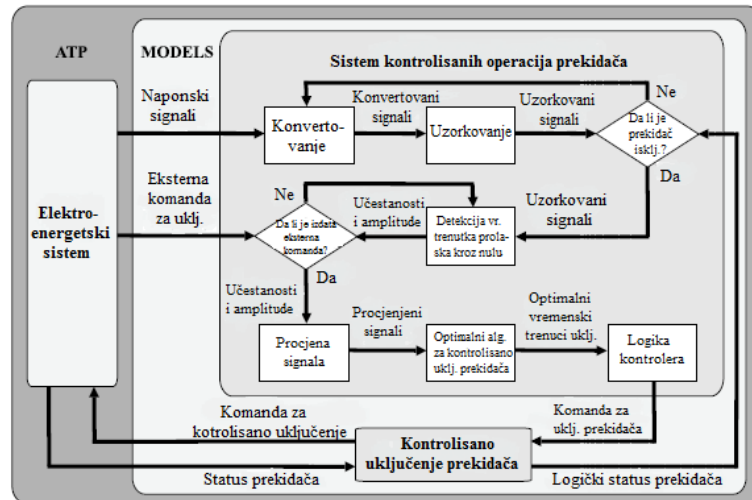
U nastavku ovog poglavlja biće predstavljeni optimalni algoritmi za kontrolisano uključenje prekidača u visokonaponskim postrojenjima za slučaj uključjenja dalekovoda u praznom hodu, kao i za slučaj automatskog ponovnog uključjenja dalekovoda.

## 6.1. Optimalni algoritam za kontrolisano uključenje dalekovoda

Kontrolisano uključenje i kontrolisano automatsko ponovno uključenje prenosnih vodova značajno smanjuje sklopne prenapone uzrokovane manipulacijama prekidača, a takođe i povećava životni vijek visokonaponske opreme i poboljšava kvalitet električne energije. Strategija kontrolisane operacije uključjenja se sastoji u pronalaženju optimalnog vremenskog trenutka uključjenja prekidača pri kojem će se javiti sklopni prenaponi koji neće ugroziti zaštitni nivo izolacije opreme.

U [37] detaljno su analizirani optimalni trenuci uključjenja prekidača za različite radne režime voda. Predstavljen je i optimalni algoritam za kontrolisano uključenje dalekovoda, razvijen u programskom paketu ATP (engl. *Alternative Transients Program*) korišćenjem MODELS jezika (slika 34.).

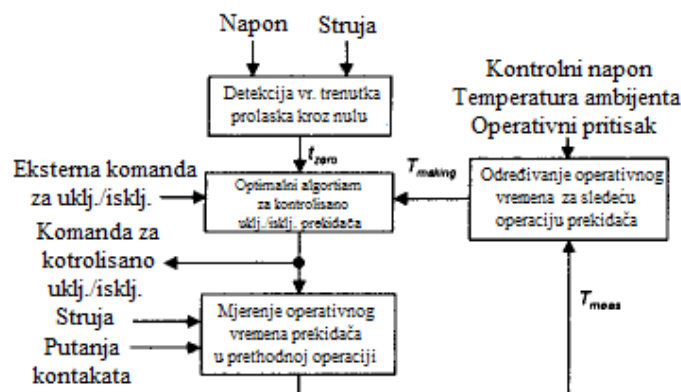
Algoritam je zasnovan na metodi ukrštanja sa ograničenjima i sastoji se od procjenjivanja budućih optimalnih trenutaka uključjenja prekidača na osnovu referentnih signala [37]. Naime, algoritam funkcioniše tako da je za slučaj uključjenja u nekim budućim trenucima lista mogućih optimalnih vremenskih trenutaka uključjenja za svaku fazu predviđena, čim se pojavi komanda za operaciju uključjenja prekidača.



Slika 34. Optimalni algoritam za kontrolisano uključenje dalekovoda.

Istraživanje o algoritmu za kontrolisano uključenje/isključenje prekidača je sprovedeno i u [21], a razvijeni algoritam je prikazan na slici 35.

Da bi procjenio optimalni vremenski trenutak uključanja/isključanja prekidača kontroler prati referentne signale koje dobija od mjernih transformatora, naponski i strujni signal, kao i brojne druge parametre koje dobija od senzora: kontrolni napon, temperaturu ambijenta, operativni pritisak. Nakon detekcije trenutka prolaska kroz nulu ( $t_{zero}$ ) i određivanja operativnog vremena prekidača ( $T_{making}$ ,  $T_{make}$ ), kontroler procjenjuje optimalni vremenski trenutak uključanja/isključanje prekidača. Ukoliko kontroler primi eksternu komandu za uključenje/isključenje prekidača, on će poslati kontrolnu komandu za uključenje/isključenje prekidača u prethodno procjenjenom optimalnom vremenskom trenutku.



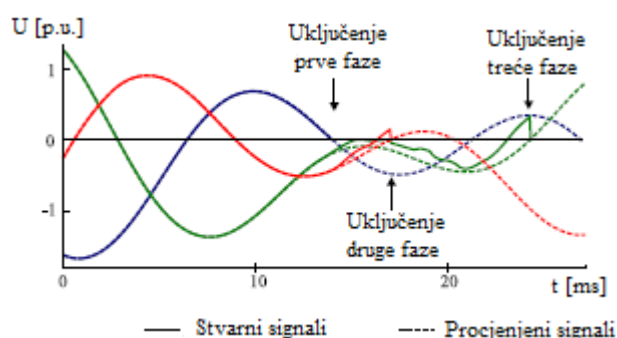
Slika 35. Optimalni algoritam za kontrolisano uključenje/isključenje prekidača.

Neophodno je napomenuti da pojava elektromagnetne sprege između faza dalekovoda može uzrokovati značajna odstupanja referentnih signala koji se primjenjuju za određivanje



optimalnih vremenskih trenutaka uključivanja prekidača, što rezultira smanjenjem efikasnosti primjenjene tehnike kontrolisanih operacija prekidača u cilju ograničenja sklopnih prenapona. Naime, nakon uključivanja prve faze, u preostalim fazama se pojavljuje indukovani napon, takođe nakon uključivanja druge faze indukovani napon se javlja u trećoj fazi. Na slici 36. se može vidjeti odstupanje napona između kontakata prekidača u odnosu na optimalne vremenske trenutke uključivanja za svaku fazu [37]. Negativni uticaj elektromagnetne sprege je najizraženiji u trećoj fazi, što rezultira najvećim odstupanjem stvarnog u odnosu na optimalni vremenski trenutak uključivanja prekidača.

Ovaj uticaj se može svesti na minimum ukoliko se optimalni vremenski trenuci uključivanja za svaku fazu se određuju zajedno. Dakle, dostupni set optimalnih vremenskih trenutaka kontrolisanog uključivanja prekidača koji su bliži eksternim komandama za uključivanje prekidača se ne uzima u obzir, već se set optimalnih vremenskih trenutaka kontrolisanog uključivanja odabere tako da je vremenski period između trenutaka uključivanja prvog i posljednjeg pola prekidača najmanji mogući [37].



Slika 36. Uticaj elektromagnetne sprege između faza dalekovoda na optimalne vremenske trenutke uključivanja prekidača.

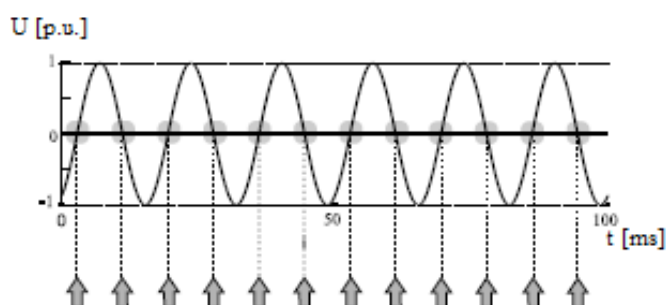
### 6.1.1. Optimalni algoritam za kontrolisano uključivanje dalekovoda u praznom hodu

Pod uključivanjem dalekovoda u praznom hodu definiše se uključivanje dalekovoda koji je dovoljno dugo bio isključen, tj. čija beznaponska pauza je trajala dovoljno dugo da u samom trenutku uključivanja dalekovoda na njemu ne postoji zaostalo naelektrisanje. Odsustvo zaostalog naelektrisanja na dalekovodu u trenutku uključivanja prekidača je najjednostavniji i najmanje zahtjevan slučaj kontrolisanog uključivanja dalekovoda.

Optimalni vremenski trenutak uključivanja dalekovoda u praznom hodu je vremenski trenutak u kojem signal referentnog naponskog signala, napona napajanja, prolazi kroz nulu [37]. Stoga, da bi se postiglo kontrolisano uključivanje dalekovoda u optimalnom vremenskom trenutku neophodno je samo pratiti referentne naponske signale za svaku fazu, i ukoliko kontroler primi eksternu komandu za uključivanje, pošalje komandu za uključivanje prekidaču u vremenskom trenutku prolaska referentnog naponskog signala svake faze kroz nulu. Takođe je neophodno, kako je i ranije pomenuto, imati u vidu operativno vrijeme prekidača, kao i

ostale signale dobijene od brojnih senzora i izvršiti određenu kompenzaciju operativnog vremena prekidača u zavisnosti od konkretnih uslova koji postoje pri samoj operaciji uključjenja.

Na slici 37. označeni su optimalni vremenski trenuci kontrolisanog uključjenja dalekovoda u praznom hodu, za jednu fazu [37].



Slika 37. Optimalni vremenski trenuci kontrolisanog uključjenja dalekovoda u praznom hodu.

### 6.1.2. Optimalni algoritam za kontrolisano automatsko ponovno uključjenje dalekovoda u praznom hodu

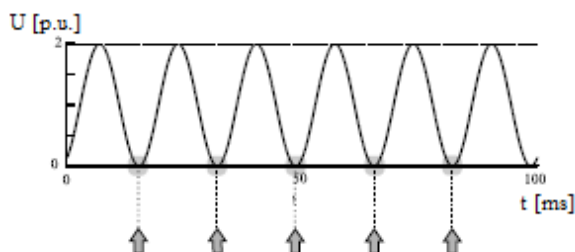
Operacija automatskog ponovnog uključjenja prekidača je operacija koja se veoma često izvodi u elektroenergetskom sistemu. Naime, da bi se eliminisali prolazni kvarovi koji veoma često nastaju na nadzemnim vodovima neophodno je isključiti prekidač, a zatim nakon kratke beznaponske pauze ponovo uključiti prekidač.

Tada, za razliku od uključjenja dalekovoda u praznom hodu koji je dugo bio isključen, prilikom uključjenja dalekovoda na njemu postoji određeno zaostalo naelektrisanje. Stoga, da bi se odredio optimalni vremenski trenutak uključjenja prekidača i samim tim ograničili sklopni prenaponi, neophodno je imati vidu i zaostalo naelektrisanje na dalekovodu. Dakle, pored referentnog naponskog signala napona napajanja, neophodno je pratiti i referentni naponski signal zaostalog napona na dalekovodu. Optimalni vremenski trenutak u slučaju kontrolisanog automatskog ponovnog uključjenja dalekovoda je vremenski trenutak u kojem je napon napajanja određene faze tačno jednak zaostalom naponu na vodu u toj fazi. Dodatno treba obratiti pažnju da se odabere ne samo ista apsolutna vrijednost napona napajanja te faze tako da je jednaka zaostalom naponu na vodu u toj fazi, nego i da taj vremenski trenutak odgovara istom trendu promjene napona.

Ukoliko na dalekovodu ne postoji kompenzacija reaktivne energije, tj. da nisu postavljeni uređaji za kompenzaciju reaktivne energije (npr. kondenzatorske baterije), talasni oblik zaostalog napona na dalekovodu može se predstaviti DC karakteristikom [37]. Karakteristika zaostalog naelektrisanje eksponencijalno opada u vremenu sa relativno visokom vremenskom konstantom [37].

Na slici 38. strelicama su označeni optimalni vremenski trenuci za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključjenja dalekovoda bez kompenzacije reaktivne energije, za jednu fazu, pri čemu je referentni naponski signal zaostalog napona na vodu

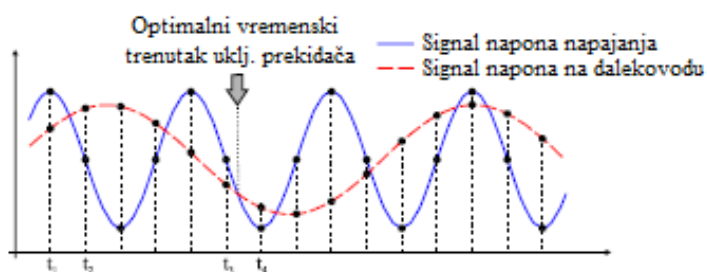
prikazan DC karakteristikom napona vrijednosti amplitude -1 p.u. [37]. Optimalni vremenski trenuci za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda bez kompenzacije reaktivne energije, su vremenski trenuci u kojima je vrijednost amplitude referentnog naponskog signala napona napajanja jednaka maksimalnoj (engl. *peak*) pozitivnoj ili negativnoj vrijednosti (slika 38.), zavisno od polariteta DC napona voda.



Slika 38. Optimalni vremenski trenuci za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda bez kompenzacije reaktivne energije.

Algoritam za određivanje optimalnih vremenskih trenutaka kontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda na kojem postoji kompenzacija reaktivne energije je nešto složeniji, zbog oscilatorne karakteristike napona voda kojom se predstavlja zaostalo naelektrisanje na vodu. Stoga, u zavisnosti od stepena kompenzacije reaktivne energije, zaostali napon na vodu može se predstaviti sinusoidalnim talasnim oblikom sa frekvencijom u opsegu između 30 i 55Hz [37].

Na slici 39. označen je optimalni vremenski trenutak za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda sa kompenzacijom reaktivne energije, za jednu fazu [37]. Pri procjeni budućih optimalnih vremenskih trenutaka ponovnog uključenja voda frekvencija odabiranja referentnih signala u algoritmu u [37] je 960Hz, što odgovara vremenskom koraku od 1/960 sekundi.



Slika 39. Optimalni vremenski trenutak za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda sa kompenzacijom reaktivne energije.

Na osnovu sprovedenog algoritma procijenjen je prvi optimalni vremenski trenutak za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda koji se nalazi između

vremenskih trenutaka  $t_3$  i  $t_4$ , i označen strelicom na slici 39. Iako se prvi presjek krivih referentnih naponskih signala desio između vremenskih trenutaka  $t_1$  i  $t_2$  taj trenutak se ne smatra optimalnim vremenskim trenutkom ponovnog uključanja dalekovoda, jer iako su vrijednosti referentnih napona, napona napajanja i zaostalog napona na vodu, u tači presjeka jednake, nije isti trend promjene napona. Naime, referentni naponski signal napona napajanja ima trend opadanja, dok referentni naponski signal zaostalog napona na vodu ima trend rasta. Stoga je prvi optimalni vremenski trenutak za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda sa kompenzacijom reaktivne energije vremenski trenutak koji odgovara međusobnom presjeku referentnih naponskih signala, koji se nalazi između vremenskih trenutaka  $t_3$  i  $t_4$ .

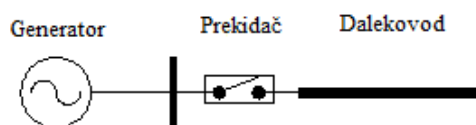
## 6.2. Proračun i analiza sklopnih prenapona

Za sprovođenje proračuna prelaznih procesa u složenim elektroenergetskim sistemima danas se najčešće primjenjuju simulacioni programski paketi koji omogućavaju formiranje modela sistema i simulaciju prelaznih procesa. Prednost korišćenja simulacionih programskih paketa je mogućnost obuhvatanja većeg broja uticajnih faktora, kao i mnogo kraće vrijeme dobijanja rezultata. Pored ATP/EMTP programa [10], najpoznatiji, najrasprostranjeniji i najčešće primjenjivan, od velikog broja softvera koji postoje na tržištu, je programski paket MATLAB (moduo Simulink) [38].

Da bi se mogao sprovesti proračun strujnih i naponskih prilika pri nastanku prenapona u EES-u neophodno je, pored modelovanja prenapona, modelovati i elemente EES-a koji utiču na njihov nastanak (prekidači, generatori i sl.) ili promjenu njihovog talasnog oblika u pogledu amplitude i frekvencije (iskrišta, odvodnici prenapona, transformatori i sl.), kao i one elemente EES-a kojima se prostiru prenaponski talasi (vodovi) [10].

U programskom paketu MATLAB-u (moduo Simulink) model EES se formira slaganjem objekata koji modeluju odgovarajuće elemente EES-a: generatore, transformatore, vodove i sl. Nakon slaganja objekata neophodno ih je povezati u jednu cjelinu, koja predstavlja dio EES-a u kome se razmatra posmatrani prelazni proces.

U okviru prethodno pomenutog programskog paketa razvijeno je nekoliko simulacija sa ciljem sprovođenja istraživanja i analize sklopnih prenapona uzrokovanih uključanjem i automatskim ponovnim uključanjem dalekovoda u različitim slučajevima. Naime, posmatran je jednostavni elektroenergetski sistem, koga čini generator i jedan dalekovod, prikazan na slici 40.



Slika 40. Šema posmatranog EES-a.

Da bi se mogao sprovesti proračun prelaznog procesa pri svim različitim analiziranim slučajevima korišćenjem razvijenih modela, neophodno je zadati parametre generatora i dalekovoda. Parametri generatora, tj. izvora i dalekovoda su dati u tabeli 1. Vrijednosti parametara dalekovoda, iz tabele 1., su tipične vrijednosti nadzemnih vodova dalekovoda naponskog nivoa 110kV.

Tabela 1. Parametri izvora i dalekovoda.

E [kV]	$R_G$ [ $\Omega$ ]	$L_G$ [H]	$R_{V1}$ [ $\Omega$ /km]	$L_{V1}$ [ $\mu$ H/km]	$C_{V1}$ [nF/km]	l [km]
110	0.08929	0.01658	0.01273	933.7	12.74	100

U sprovedenom istraživanju razmatrana su i analizirana dva karakteristična slučaja uključenja dalekovoda:

1. Slučaj uključenja dalekovoda u praznom hodu,
2. Slučaj automatskog ponovnog uključenja dalekovoda u praznom hodu.

Prvi slučaj karakteriše duga beznaponska pauza dalekovoda, tj. pretpostavlja se da je dalekovod bio dovoljno dugo izolovan sa sistema i da ne sadrži zaostalo naelektrisanje, dok je u drugom slučaju dalekovod bio u kratkoj beznaponskoj pauzi pa samim tim na njemu postoji određena vrijednost zaostalog naelektrisanja.

Osim vremena trajanja beznaponske pauze, tj. vrijednosti zaostalog naelektrisanja na dalekovodu, dominantan uticaj na vrijednost sklopnih prenapona ima vremenski trenutak u kojem se dešava operacija uključenja prekidača. Stoga, da bi se pokazale prednosti tehnike kontrolisanih operacija prekidača u cilju ograničenja sklopnih prenapona nastalih uključenjem i automatskim ponovnim uključenjem voda, oba slučaja su analizirana na primjeru nekontrolisanog i kontrolisanog uključenja prekidača.

### 6.2.1. Slučaj uključenja dalekovoda u praznom hodu

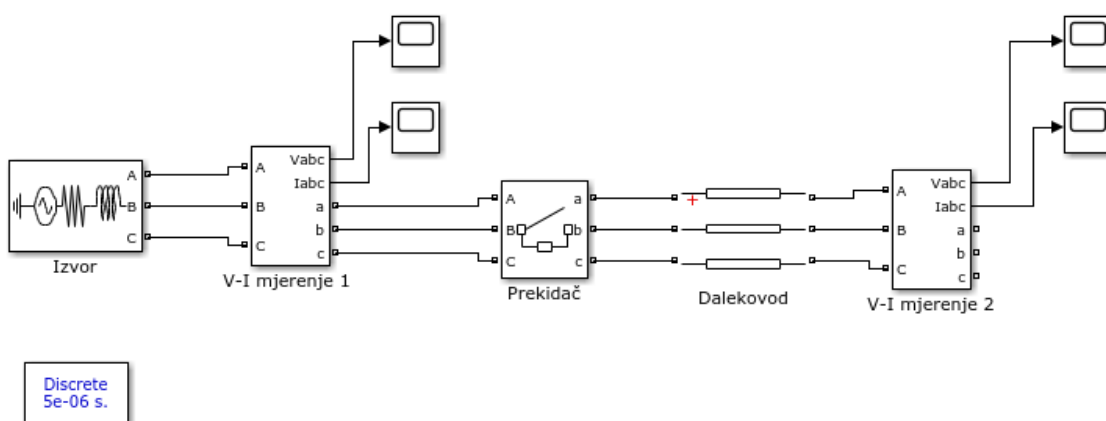
Uključenje dalekovoda u praznom hodu je tipična sklopna operacija koja se veoma često izvodi u elektroenergetskim sistemima. Kako je i ranije pomenuto, pod uključenjem dalekovoda u praznom hodu smatra se uključenje dalekovoda čija je beznaponska pauza trajala dugo, tj. pretpostavlja se da je dalekovod bio dovoljno dugo izolovan sa sistema pa samim tim na njemu ne postoji zaostalo naelektrisanje.

Ovdje su analizirana dva slučaja, slučaj nekontrolisanog uključenja dalekovoda u proizvoljno odabranom vremenskom trenutku, kao i slučaj kontrolisanog uključenja dalekovoda u optimalnom vremenskom trenutku, sa aspekta uzrokovanih sklopnih prenapona. Razvijeni modeli, kao i dobijeni rezultati su predstavljeni u nastavku.

### 6.2.1.1. Nekontrolisano uključenje

Korišćenjem programskog paketa MATLAB-a (Moduo Simulink) razvijen je model posmatranog sistema sa slike 40. Naime, simulirano je nekontrolisano uključenje prenosnog dalekovoda u praznom hodu, naponskog nivoa 110kV, trolpolnim prekidačem u proizvoljno odabranom trenutku. Prikaz modela je predstavljen na slici 41.

Svaki element analiziranog sistema je modelovan odgovarajućim objektom u kojem su upisani odgovarajući parametri elemenata sistema dati u tabeli 1. Pored objekata koji predstavljaju modele izvora i dalekovoda, na slici 41. se mogu vidjeti i objekti kojima su modelovana mjerenja napona i struje, tj. naponski i strujni mjerni transformatori, pri čemu se objekat *V-I mjerenje 1* odnosi na mjerenja napona i struje izvora, a *V-I mjerenje 2* predstavlja mjerenja napona i struje na kraju dalekovoda. Takođe, postoji i objekat kojim je modelovan trolpolni prekidač, kao i četiri objekta gdje se nakon pokretanja simulacije mogu vidjeti dobijeni rezultati, tj. talasni oblici napona i struja, kako na strani izvora, tako i na kraju dalekovoda.

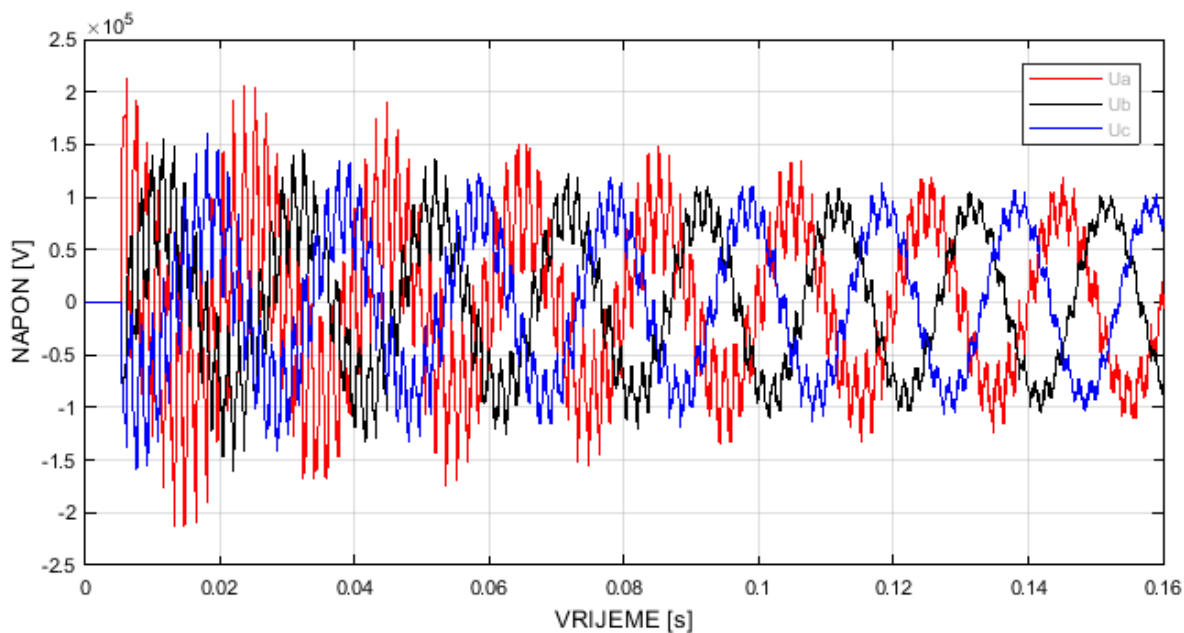


Slika 41. Model posmatranog sistema u Matlab-u (moduo Simulink) za slučaj nekontrolisanog uključjenja dalekovoda u praznom hodu.

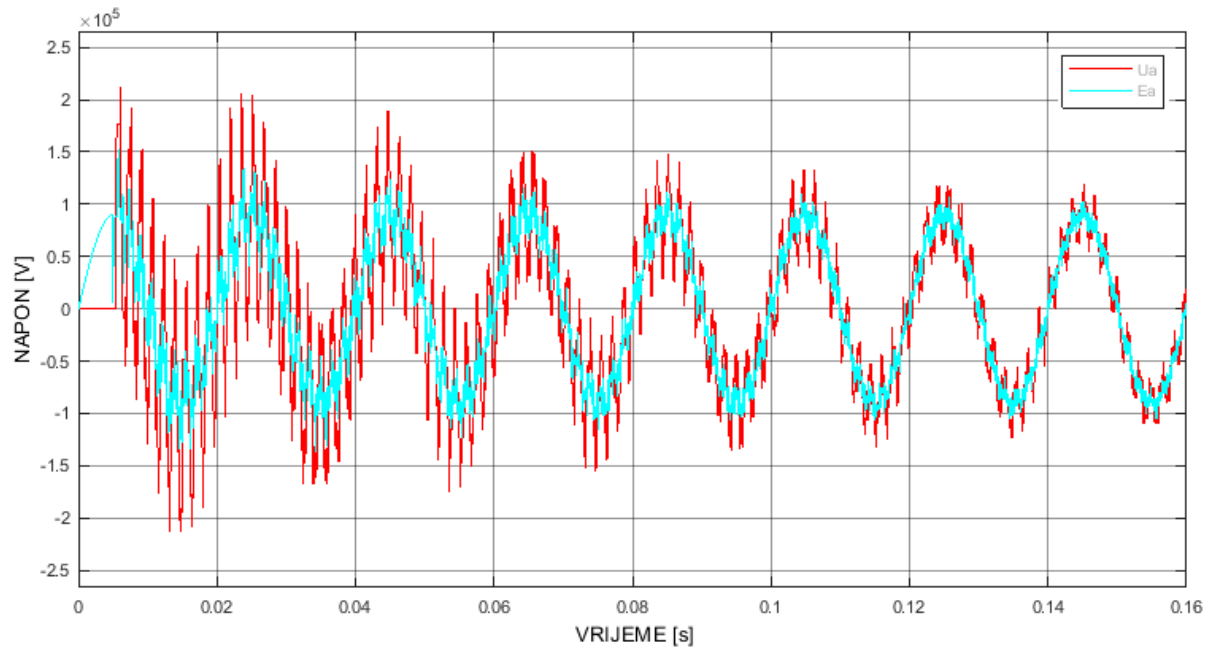
Nakon modelovanja svih elemenata posmatranog sistema, unošenja odgovarajućih parametara sistema u odgovarajuće objekte, zatim povezivanjem svih objekata u jednu funkcionalnu cjelinu kojom je predstavljen prethodno pomenuti jednostavni EES, može se analizirati posmatrani prelazni proces.

U početnom položaju trolpolni prekidač je isključen, dok se vremenski trenutak njegovog uključjenja određuje proizvoljno pri svakom uključjenju. Kako je prekidač modelovan trolpolnim prekidačem, znači da on ima jedan operativni mehanizam za sva tri pola prekidača, tj. sve tri faze biće uključene u istom proizvoljno odabranom vremenskom trenutku. Nekontrolisano uključjenje prekidača dovešće do toga da će prije ili kasnije doći do uključjenja trolpolnog prekidača u veoma nepovoljnom vremenskom trenutku makar za jednu fazu, sa aspekta generisanih sklopnih prenapona.

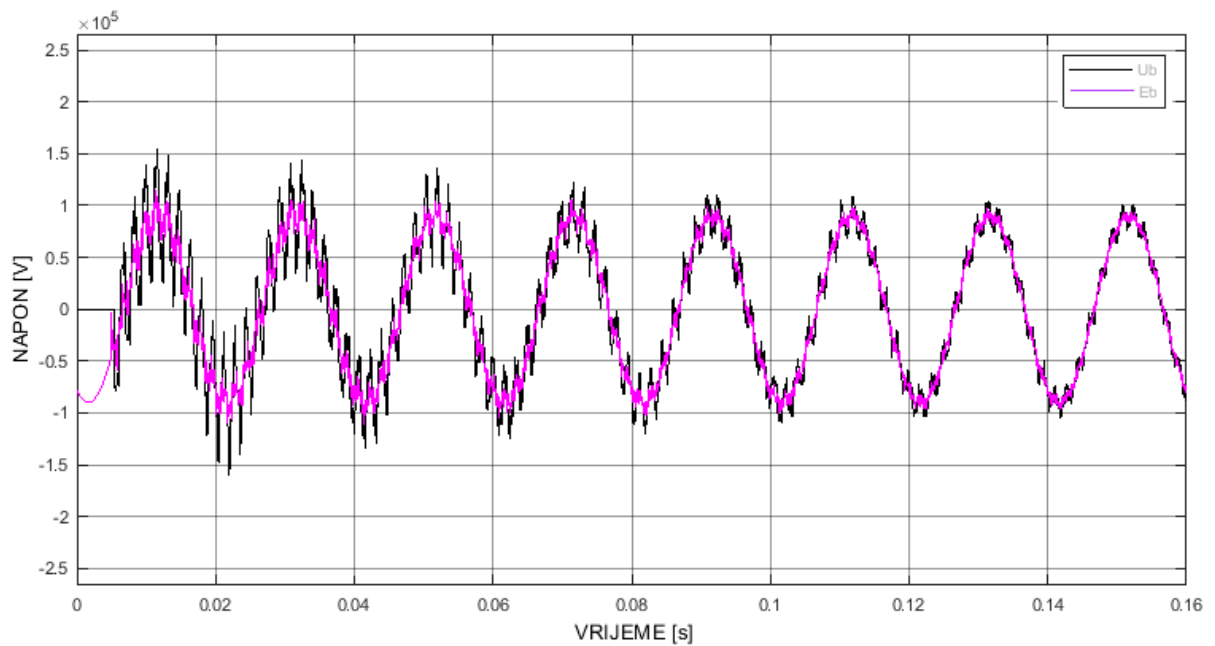
Grafički prikaz rezultata ove simulacije, tj. talasnog oblika napona na kraju dalekovoda, je predstavljen na slici 42., dok su na slikama 43., 44. i 45. na zajedničkom grafiku prikazani talasni oblici napona napajanja i dobijeni talasni oblici napona na kraju dalekovoda po fazama A, B, C, respektivno. Sa prikazanih grafika se može vidjeti da je proizvoljno odabran vremenski trenutak uključenja trolnog prekidača 5ms, a da koeficijent sklopnog prenapona dostiže maksimalnu vrijednost od 2,375 u fazi A, čime je ugrožena izolacija sistema sa aspekta naponskih naprezanja.



Slika 42. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj nekontrolisanog uključenja dalekovoda u praznom hodu.

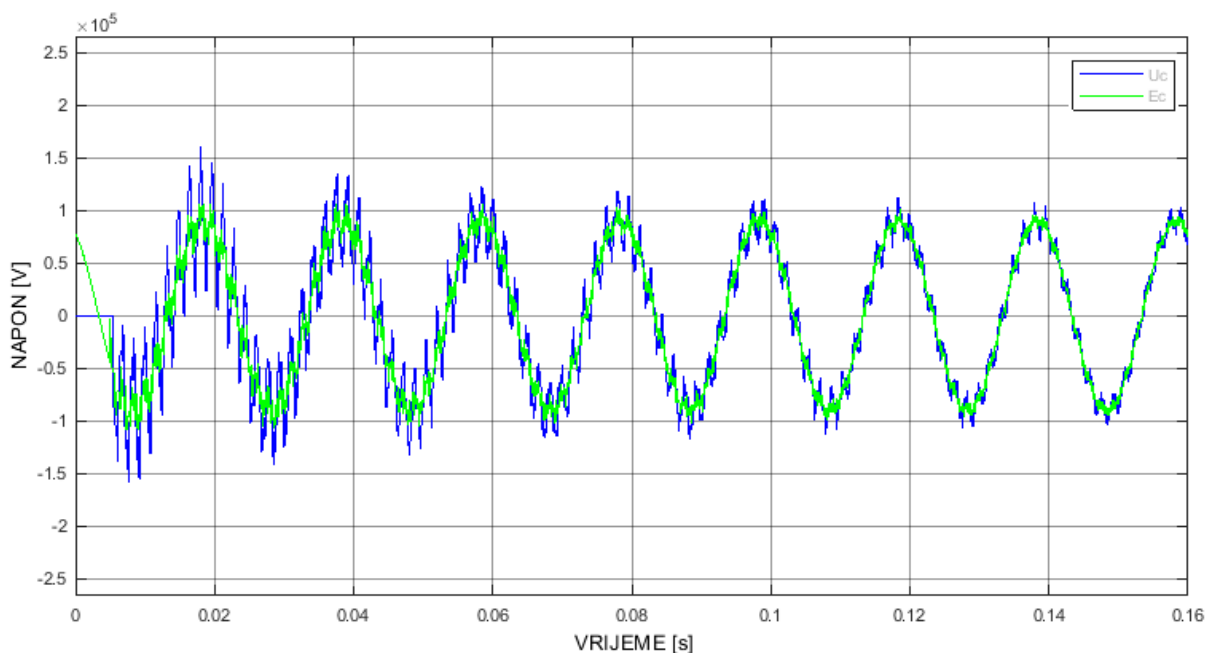


Slika 43. Talasni oblik napona napajanja i napona na kraju dalekovoda za slučaj nekontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu, u fazi A.



Slika 44. Talasni oblik napona napajanja i napona na kraju dalekovoda za slučaj nekontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu, u fazi B.





Slika 45. Talasni oblik napona napajanja i napona na kraju dalekovoda za slučaj nekontrolisanog uključivanja dalekovoda u praznom hodu, u fazi C.

Apsolutne vrijednosti amplituda, kao i vrijednosti koeficijenata sklopnih prenapona za svaku fazu, za slučaj nekontrolisanog uključivanja dalekovoda u praznom hodu, su prikazane u tabeli 2. Kako se i može vidjeti iz tabele 2. maksimalna apsolutna vrijednost amplitude sklopnog prenapona je dostignuta u fazi A, dok su maksimalne apsolutne vrijednosti amplituda sklopnih prenapona u fazi B i C približno jednake.

Tabela 2. Apsolutne vrijednosti amplituda i vrijednosti koeficijenata sklopnih prenapona za slučaj nekontrolisanog uključivanja dalekovoda u praznom hodu.

Faza	$U_{\max}$ [kV]	$K_p$
A	213,25	2,375
B	160,40	1,786
C	160,85	1,791

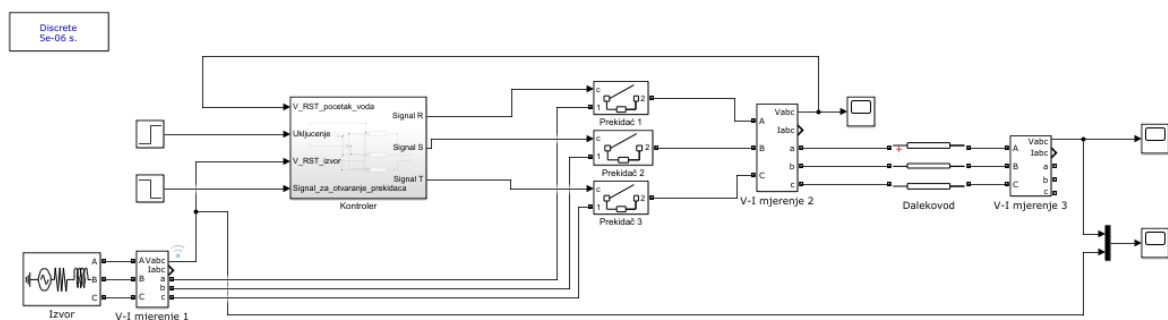
### 6.2.1.2. Kontrolisano uključnje

Kako bi se spriječila pojava sklopnih prenapona prilikom operacije uključivanja prekidača primjenjena je tehnika kontrolisanih operacija prekidača. Naime, na osnovu optimalnog algoritma za kontrolisano uključivanja dalekovoda u praznom hodu, koji je ranije pomenut, za potrebe ovog rada razvijen je kontroler koji omogućava kontrolisano uključnje prekidača u optimalnim vremenskim trenucima, posebno za svaku fazu.

Razvijeni model za slučaj kontrolisanog uključivanja dalekovoda u praznom hodu, je prikazan na slici 46. Za razliku od modela u slučaju nekontrolisanog uključivanja gdje je prekidač bio modelovan trolnim prekidačem, ovdje su korištena tri jednopolna prekidača,

što je i jedan od ključnih zahtjeva koje prekidač mora da ispuni, tj. da bude jednopolne izvedbe, da bi bilo moguće primjeniti tehnika kontrolisanih operacija prekidača. Takođe, još jedna razlika u ovom modelu je postojanje još jednog objekta koji se tiče mjerenja napona i struje sa početka dalekovoda (*V-I mjerenje 2*), kao i objekta kojim je modelovan kontroler. Na još jednom dodatnom objektu mogu se vidjeti talasni oblici napona napajanja, kao i dobijeni talasni oblici napona na kraju voda, na zajedničkom grafiku.

U početnom položaju sva tri jednopolna prekidača su isključena. Optimalne vremenske trenutke njihovog uključjenja određuje kontroler, koji je povezan pojedinačno sa svakim prekidačem preko kontrolne komande uključjenja, putem koje im prosleđuje signale za kontrolisano uključjenje u procjenjenim optimalnim vremenskim trenutcima.



Slika 46. Model posmatranog sistema u Matlab-u (moduo Simulink) za slučaj kontrolisanog uključjenja dalekovoda u praznom hodu.

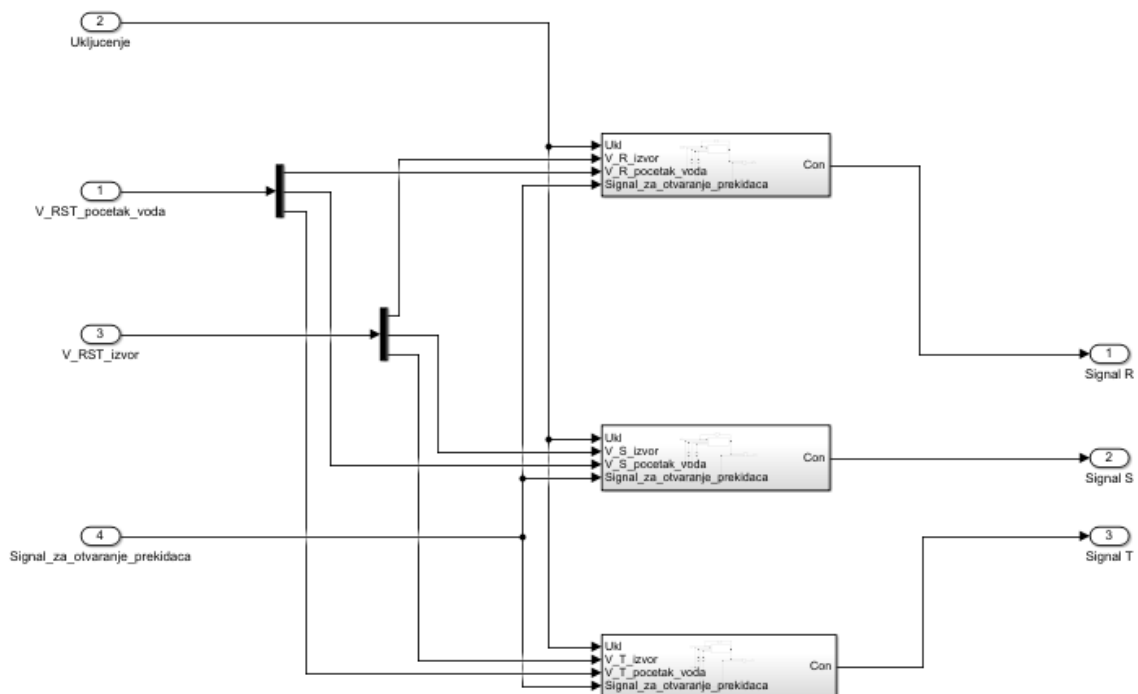
Kako je i ranije pomenuto, odsustvo zaostalog naelektrisanja na dalekovodu u trenutku uključjenja prekidača je najjednostavniji i najmanje zahtjevan slučaj kontrolisanog uključjenja dalekovoda. Da bi odredio optimalne vremenske trenutke uključjenja, kontroler su neophodni referentni naponski signali napona napajanja i napona sa početka voda, koje dobija od objekata *V-I mjerenje 1* i *V-I mjerenje 2*, respektivno.

Nakon prikupljanja referentnih naponskih signala kontroler sprovodi optimalni algoritam za kontrolisano uključjenje dalekovoda u praznom hodu, i kao rezultat dobija optimalne vremenske trenutke uključjenja prekidača za svaku fazu. Kako se uključuje dalekovod nakon duge beznaponske pauze, tako na njemu ne postoji zaostalo naelektrisanje, te je stoga optimalni vremenski trenutak uključjenja određene faze vremenski trenutak prolaska referentnog naponskog signala napona napajanja te faze kroz nulu. Razvijeni kontroler detektuje prolazak kroz nulu napona napajanja svaki put kada referentni naponski signal promijeni polaritet između dva uzastopna odbirka (sempla). Nakon određivanja optimalnih vremenskih trenutaka uključjenja, tj. prolaska referentnog naponskog signala napona napajanja kroz nulu za svaku fazu, kontroler će poslati komandu za uključjenje prekidačima ukoliko je izdata eksterna komanda za uključjenje. Ukoliko pak nije izdata eksterna komanda za uključjenje, kontroler se vraća na početak semplovanja (uzorkovanja) referentnih naponskih signala i kontinuirano se vrši petlja optimalnog algoritma za

kontrolisano uključenje dalekovoda u praznom hodu i određuju novi optimalni vremenski trenuci uključjenja.

Eksterna komanda za uključjenja je modelovana preko bloka step funkcije, gdje je neophodno unijeti vremenski trenutak u kojem operater u trafostanici želi da uključi prekidač, čime se izdaje eksterna komanda za uključjenje. Unošenjem prethodno pomenutog vremenskog trenutka, kontroler prima eksternu komandu za uključjenje i od tog trenutka prati referentne naponske signale i nakon obrade algoritma određuje prve optimalne vremenske trenutke uključjenja koje automatski prosleđuje prekidačima. Na ovaj način postignuto je kontrolisano uključjenje prekidača u procjenjenim optimalnim vremenskim trenucima, čime su značajno ograničeni sklopni prenaponi.

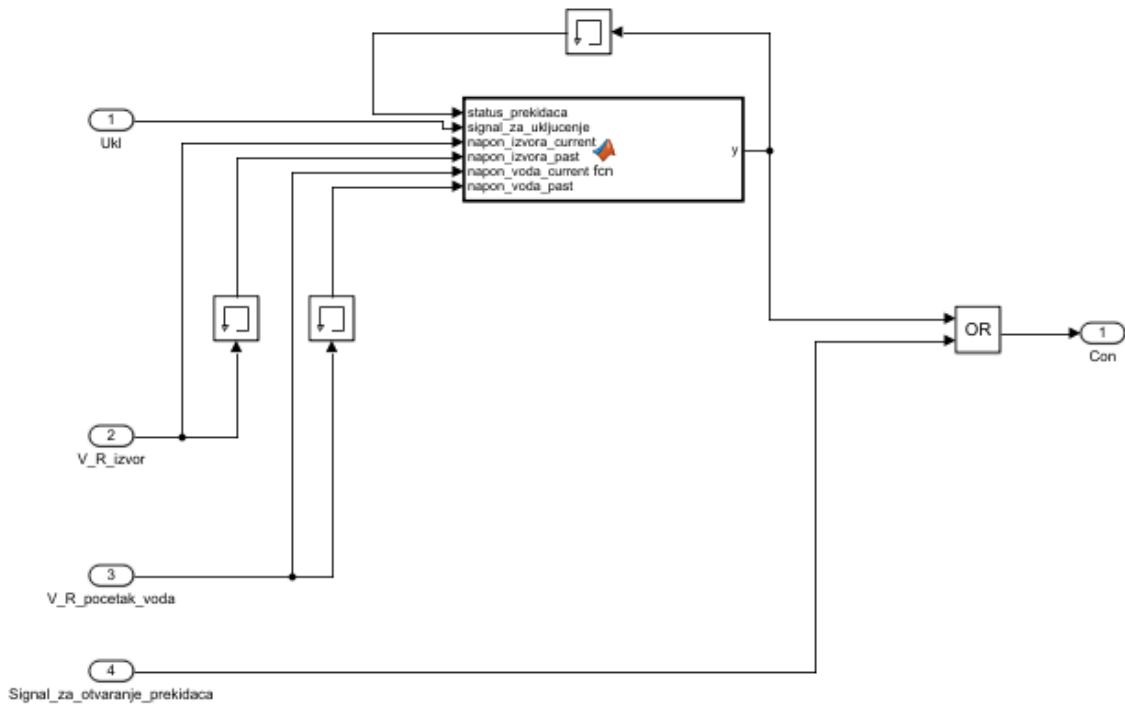
Na slici 47. i slici 48. je prikazan model kontrolera.



Slika 47. Model razvijenog kontrolera.

Na slici 47. se može vidjeti da je razvijen kontroler posebno za svaku fazu i da ima četiri ulazna i jedan izlazni signal. Izlazni signal predstavlja signal komande za kontrolisano uključjenje u procijenjenom optimalnom vremenskom trenutku koji kontroler prosleđuje prekidaču. Ulazni signali su, kako je to prethodno objašnjeno, referentni naponski signali napona napajanja i napona sa početka voda, signal eksterne komande za uključjenje prekidača, kao i dodatni signal za otvaranje, tj. isključenje prekidača. U konkretnom posmatranom slučaju uključjenja dalekovoda u praznom hodu na kojem ne postoji zaostalo naelektrisanje, da bi procenio optimalni vremenski trenutak uključjenja prekidača, kontroleru je dovoljan samo referentni naponski signal napona napajanja, referentni naponski signal napona sa početka voda nije potreban. Takođe, za posmatrani slučaj nije potreban ni poslednji signal

koji se tiče signala za otvaranje prekidača. Razlog postojanja prethodno pomenutih signala je primjena u slučaju automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu, o čemu će biti riječi kasnije u okviru ovog potpoglavlja, jer je osnovna ideja ovog magistarskog rada bila razviti jedinstven kontroler koji će objediniti više različitih slučajeva uključanja dalekovoda.



Slika 48. Detaljni prikaz modela razvijenog kontrolera, za jednu fazu.

Detaljniji prikaz modela kontrolera u jednoj fazi je predstavljen na slici 48. Ovdje se može vidjeti da osim ulaznih signala koji se tiču referentnih naponskih signala napajanja i napona sa početka voda, kontroler dobija i signal koji se tiče statusa prekidača. Kako je i prethodno objašnjeno, kontroler optimalni vremenski trenutak uključanja za ovu fazu određuje na osnovu referentnih naponskih signala te faze, a to su konkretno u ovom slučaju kada na vodu ne postoji zaostalo naelektrisanje, vremenski trenuci prolaska referentnog naponskog signala napajanja određene faze kroz nulu. Vremenski trenutak prolaska referentnog naponskog signala kroz nulu se detektuje u vremenskom trenutku kada referentni naponski signal promijeni polaritet između dva uzastopna odbirka.

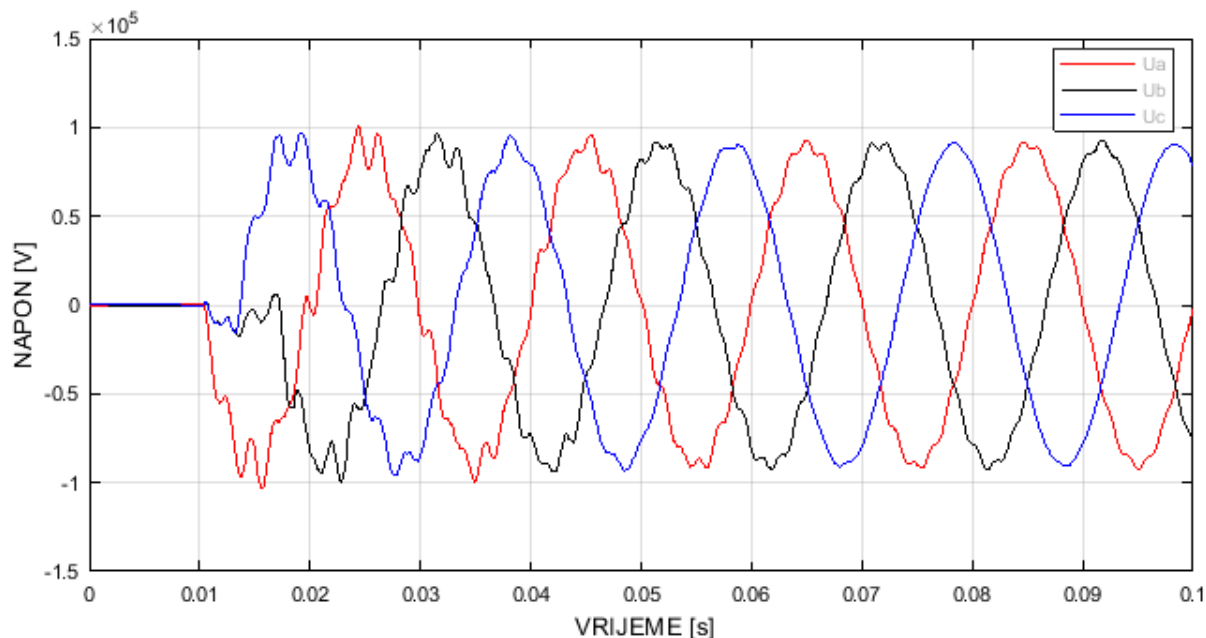
U prvom koraku optimalnog algoritma za kontrolisano uključanje dalekovoda u praznom hodu, provjerava se signal statusa prekidača. Ukoliko je prekidač uključen, tada se ne sprovodi dalje optimalni algoritam, već se tu završava. Dakle, da bi mogli preći na drugi korak algoritma, neophodno je da bude zadovoljen uslov da je prekidač otvoren, tj. isključen. U drugom koraku optimalnog algoritma provjerava se signal eksterne komande za uključanje prekidača, tj. provjera se je li izdata eksterna komanda za uključanje prekidača. Ukoliko su oba uslova iz prva dva koraka ispunjena, tj. ukoliko je prekidač isključen i izdata eksterna

komanda za uključenje prekidača, kontroler može dalje da nastavi sa sprovođenjem optimalnog algoritma za kontrolisano uključenje dalekovoda u praznom hodu i na osnovu referentnih naponskih signala odredi optimalne vremenske trenutke uključjenja prekidača.

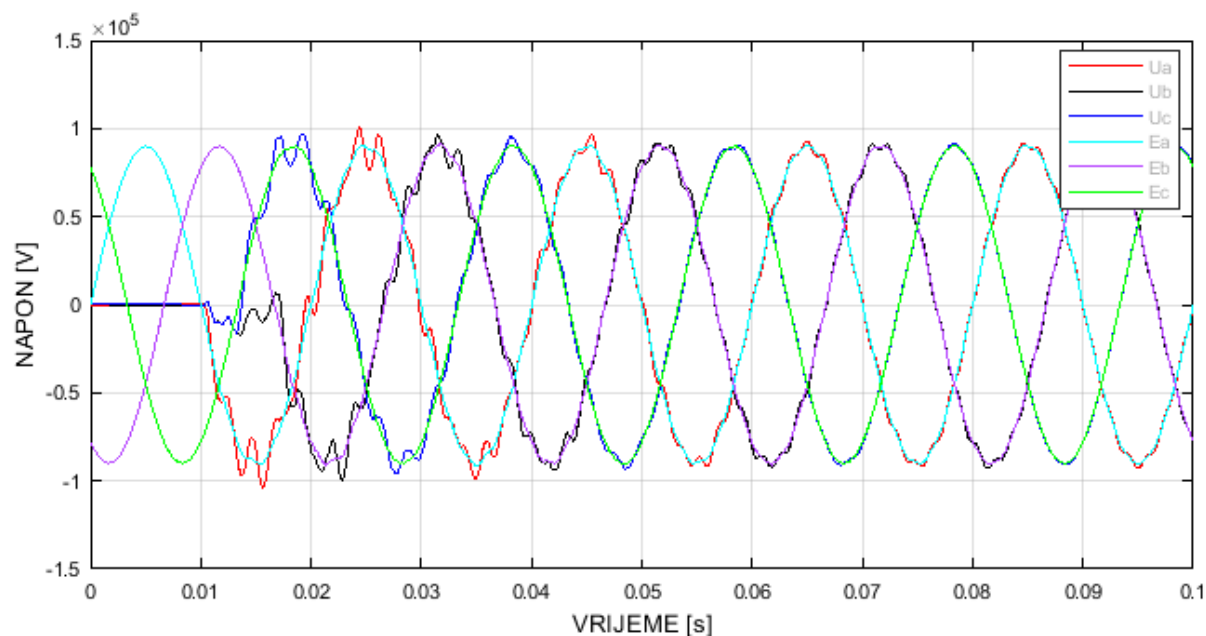
U konkretnom posmatranom slučaju uključjenja dalekovoda u praznom hodu nakon duge beznaponske pauze, optimalni vremenski trenutak uključjenja određene faze odgovara vremenskom trenutku prolaska referentnog naponskog signala napona napajanja odgovarajuće faze kroz nulu. Programski paket MATLAB (moduo Simulink) nema mogućnost određivanja vremenskog trenutka prolaska referentnog naponskog signala napona napajanja kroz nulu na direktan način, tj. poređenja vrijednosti amplitude referentnog naponskog signala napona napajanja sa nulom. Zbog toga je razvijeno nekoliko koraka u prethodno pomenutom algoritmu, na osnovu kojih se određuje taj vremenski trenutak. Naime, nakon što dobije informaciju da je prekidač isključen, kao i eksternu komandu za uključenje prekidača, kontroler kontinuirano počinje da prati referentni naponski signal napona napajanja u cilju određivanja optimalnih vremenskih trenutaka uključjenja prekidača. Da bi odredio vremenski trenutak prolaska referentnog naponskog signala kroz nulu, kontroleru je neophodno da budu ispunjena dva uslova. Prvi uslov koji je potrebno da bude ispunjen jeste da vrijednost amplitude referentnog naponskog signala napona napajanja, koji se analizira u tom trenutku, bude veća od nule. Ukoliko je taj uslov ispunjen, prelazi se na sledeći uslov u gdje se ispituje je li vrijednost amplitude referentnog naponskog signala napona napajanja u prethodnom vremenskom trenutku bila manja od nule. Informaciju o vrijednosti amplitude referentnog naponskog signala napona napajanja u prethodnom vremenskom trenutku je moguće dobiti pomoću određene funkcije u MATLAB-u (moduo Simulink) koja u memoriji čuva odgovarajuće informacije iz prethodnog vremenskog trenutka. Ukoliko su ova oba uslova ispunjena, tada kontroler zaključuje da referentni naponski signal napona napajanja, koji se analizira u tom trenutku, predstavlja vremenski trenutak njegovog prolaska kroz nulu. Kako bi bila obuhvaćena oba slučaja prolaska kroz nulu referentnog naponskog signala napona napajanja, neophodno je u još jednom koraku algoritma obuhvatiti i slučaj kada je promjenjen redosled dva prethodno pomenuta uslova koja treba da budu ispunjena. Naime, tada bi prvi uslov, koji je potrebno da bude ispunjen, bio da vrijednost amplitude referentnog naponskog signala napona napajanja, koji se analizira u tom trenutku, bude manja od nule, dok bi drugi uslov, koji je potrebno da bude ispunjen, bio da je vrijednost amplitude referentnog naponskog signala napona napajanja u prethodnom vremenskom trenutku bila veća od nule. Određivanjem vremenskog trenutka prolaska referentnog naponskog signala napona napajanja kroz nulu, kontroler je odredio i optimalne vremenske trenutke uključjenja prekidača i u završnom koraku optimalnog algoritma izdao izlazni signal, tj. poslao odgovarajuće komande za kontrolisano uključjenje odgovarajućim prekidačima.

Na slici 49. je dat grafički prikaz talasnog oblika napona na kraju dalekovoda dobijen pokretanjem simulacije, dok su na slici 50. na zajedničkom grafiku prikazani talasni oblici napona napajanja i dobijeni talasni oblici napona na kraju dalekovoda. Operater u trafostanici je unio vremenski trenutak uključjenja prekidača u 9ms, čime je kontroler primio eksternu komandu za uključenje prekidača. Stoga, nakon sprovođenja optimalnog algoritma za kontrolisano uključjenja dalekovoda u praznom hodu kontroler je odredio optimalne vremenske trenutke uključjenje za svaku fazu, koji odgovaraju vremenskim trenutcima prolaska kroz nulu određenog referentnog naponskog signala napona napajanja, i prosljedio

komande za uključenje odgovarajućim jednopolnim prekidačima. Time su, kao što se može vidjeti i na grafiku, značajno ograničeni sklopni prenaponi.



Slika 49. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu.



Slika 50. Talasni oblik napona napajanja i napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu.

Apsolutne vrijednosti amplituda, kao i vrijednosti koeficijenata sklopnih prenapona za svaku fazu, za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu, su prikazane u tabeli 3. Kao što se može vidjeti iz tabele 3. maksimalna apsolutna vrijednost amplitude sklopnog prenapona je dostignuta u fazi A, dok je najmanja maksimalna apsolutna vrijednost amplitude sklopnog prenapona dostignuta u fazi C.

Tabela 3. Apsolutne vrijednosti amplituda i vrijednosti koeficijenata sklopnih prenapona za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu.

Faza	$U_{\max}$ [kV]	$K_p$
A	103,79	1,156
B	99,57	1,109
C	96,82	1,078

Poređenjem i analizom dobijenih rezultata sa dobijenim rezultatima nekontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu (tabela 2.) potvrđene su prednosti primjene tehnike kontrolisanih operacija prekidača u cilju ograničenje sklopnih prenapona za slučaj uključanja dalekovoda u praznom hodu.

### 6.2.2. Slučaj automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu

Pored operacije uključanja dalekovoda u praznom hodu, druga operacija koja se takođe veoma često izvodi u elektroenergetskim sistemima je operacija automatskog ponovnog uključanja dalekovoda. Cilj ove operacije je eliminisanje prolaznih kvarova koji se veoma često javljaju na nadzemnim vodovima. Glavna karakteristika operacije automatskog ponovnog uključanja je kratka beznaponska pauza dalekovoda, tj. pretpostavlja se da je dalekovod bio kratko odvojen sa sistema, koja traje od vremenskog trenutka isključenja prekidača do vremenskog trenutka njegovog automatskog ponovnog uključanja. Kratka beznaponska pauza uzrokuje pojavu određenog zaostalog naelektrisanja na dalekovodu, koje značajno utiče na vrijednost amplitude sklopnih prenapona nastalih kao posledica operacije uključanja prekidača.

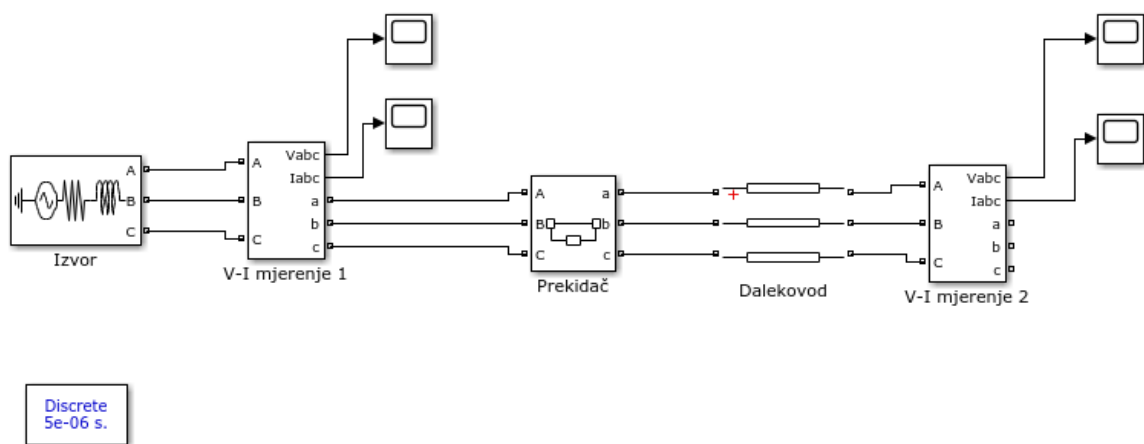
Kao i u slučaju uključanja dalekovoda u praznom hodu, i ovdje su analizirana dva slučaja: slučaj nekontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda, kao i slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda. Razvijeni modeli, kao i analiza dobijenih rezultata biće prikazani u nastavku.

#### 6.2.2.1. Nekontrolisano automatsko ponovno uključanje

U ovom slučaju razvijen je model posmatranog sistema sa slike 40. koji se tiče nekontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda, takođe korišćenjem programskog paketa MATLAB-a (moduo Simulink). Na slici 51. dat je prikaz razvijenog modela, koji je gotovo identičan razvijenom modelu za nekontrolisano uključanje dalekovoda u praznom hodu (slika 41.).

Kao što se može vidjeti posmatranjem slike 51. svi objekti su identični prethodno objašnjenim objektima sa slike 41. Prekidač je i ovdje modelovan trolnim prekidačem, a jedina razlika u poređenju sa nekontrolisanim uključanjem dalekovoda u praznom hodu, je početni položaj trolnog prekidača.

Naime, da bi se simulirao slučaj automatskog ponovnog uključanja, trolni prekidač je u početnom položaju uključen. Zatim, se isključi u proizvoljno odabranom vremenskom trenutku, a nakon kratke beznaponske pauze ponovo uključi, takođe u proizvoljno odabranom vremenskom trenutku, jer se u ovom slučaju radi o nekontrolisanom automatskom ponovnom uključanju dalekovoda.



Slika 51. Model posmatranog sistema u Matlab-u (moduo Simulink) za slučaj nekontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu.

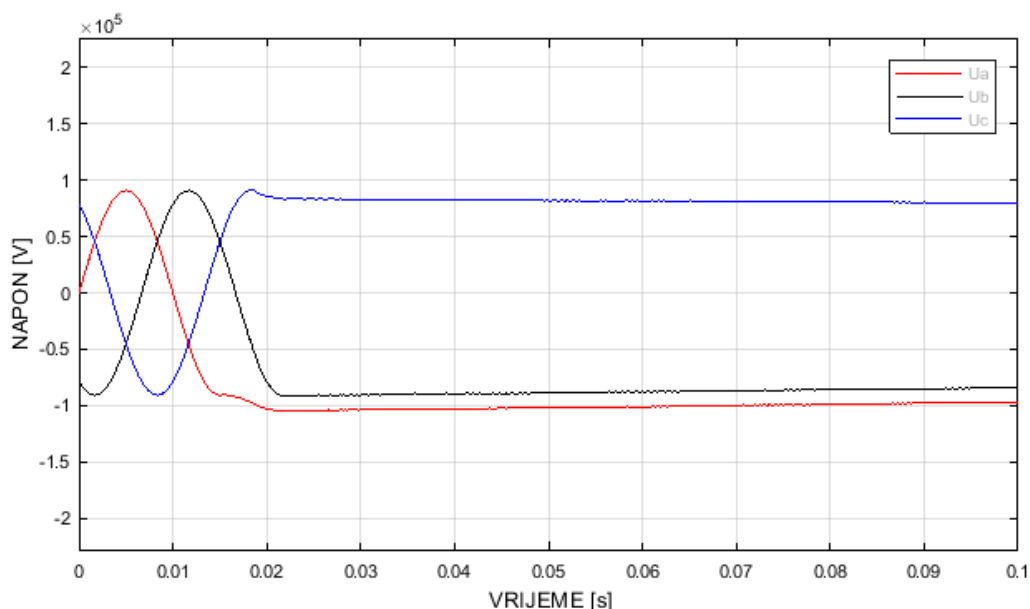
Na slici 52., slici 53. i slici 54. predstavljen je grafički prikaz rezultata dobijenih pokretanjem ove simulacije, tačnije prikazan je talasni oblik napona na kraju dalekovoda u sve tri faze, dok su na slici 55. , slici 56. i slici 57. na zajedničkom grafiku prikazani talasni oblici napona napajanja i dobijeni talasni oblici napona na kraju za sve tri faze, posebno za tri vremenska perioda: vremenski period prije isključenja prekidača i neposredno nakon isključenja prekidača (od 0s do 0,1s), vremenski period neposredno nakon isključenja prekidača, kao i neposredno prije APU prekidača (od 0,1s do 1,35s) i vremenski period neposredno prije APU prekidača, kao i nakon APU prekidača (od 1,35s do 1,6s), respektivno. Detaljniji prikaz slike 57. po fazama A, B i C je predstavljen na slici 58., slici 59. i slici 60. , respektivno.

Analizirani slučaj predstavlja ujedno i najkritičniji slučaj nekontrolisanog uključanja kada se posmatra vod na kojem postoji zaostalo naelektrisanje, sa aspekta proizvoljno odabranog vremenskog trenutka uključanja prekidača. Trolni prekidač se isključuje u vremenskom trenutku kada amplituda napona faze A dostiže svoju maksimalnu negativnu vrijednost (0,015s). Nakon isključenja trolnog prekidača, pri čemu su sve faze isključene u istom vremenskom trenutku, na svakoj fazi dalekovoda se javlja zaostalo naelektrisanje. Zatim, nakon kratke beznaponske pauze, koja traje 1,35s , dolazi do nekontrolisanog

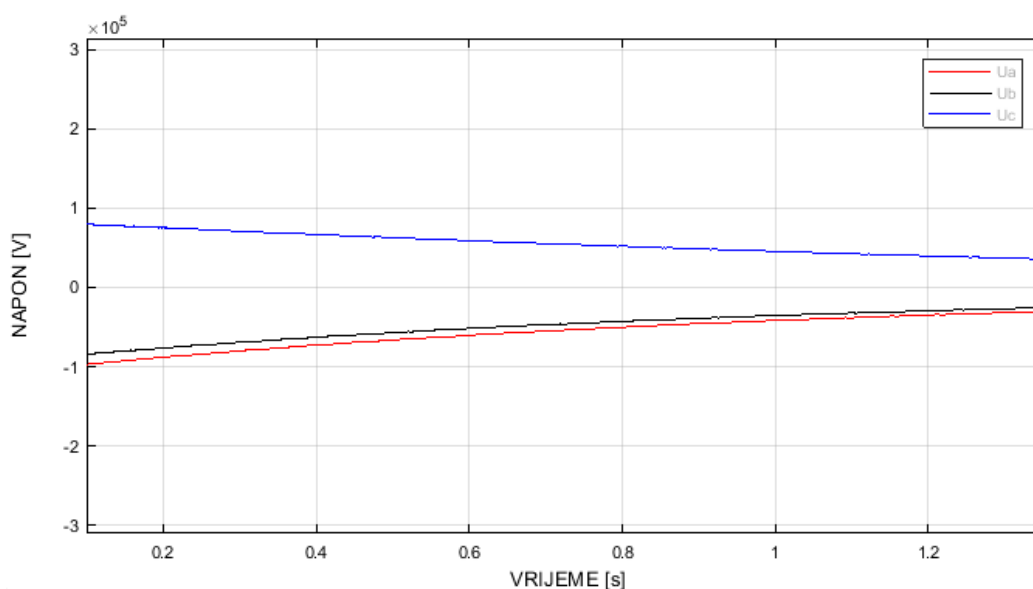


automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u vremenskom trenutku 1,365s , kada amplituda napona faze A dostiže svoju maksimalnu pozitivnu vrijednost.

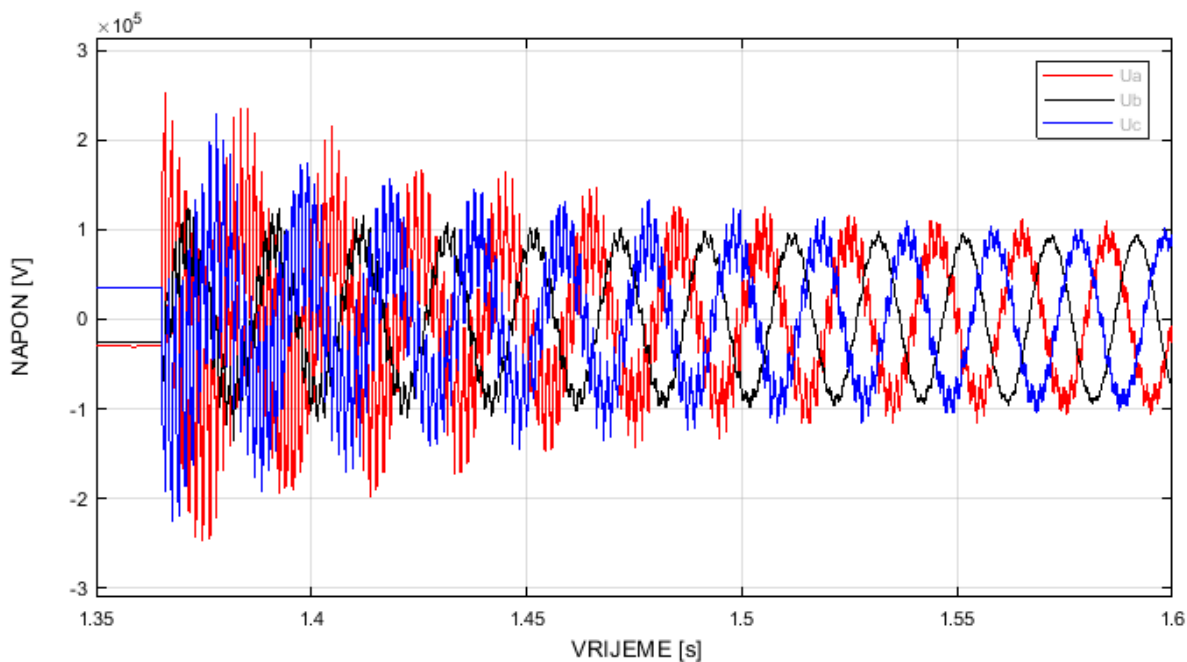
Nekontrolisano automatsko ponovno uključenje dalekovoda u ovako proizvoljno odabranom vremenskom trenutku uzrokuje pojavu sklopnih prenapona, pri čemu koeficijent sklopnog prenapona svoju maksimalnu vrijednost od 2,799 dostiže u fazi A.



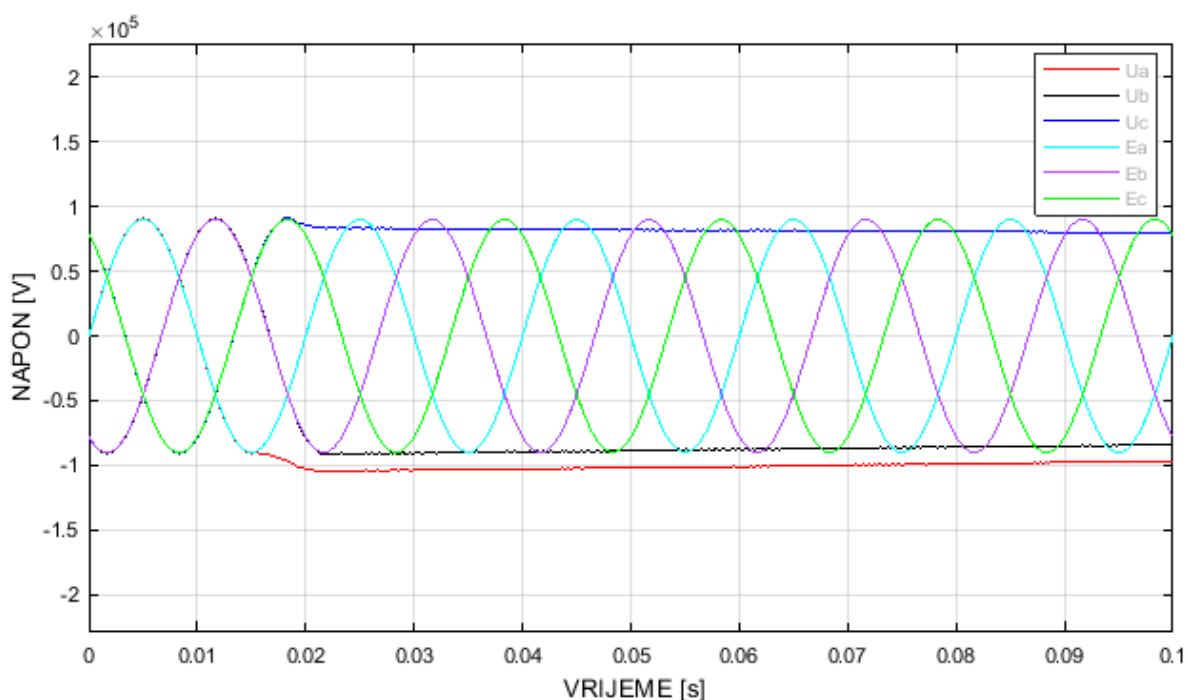
Slika 52. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj nekontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu za vremenski period prije isključenja prekidača, kao i neposredno nakon isključenja prekidača, tj. od 0s do 0,1s .



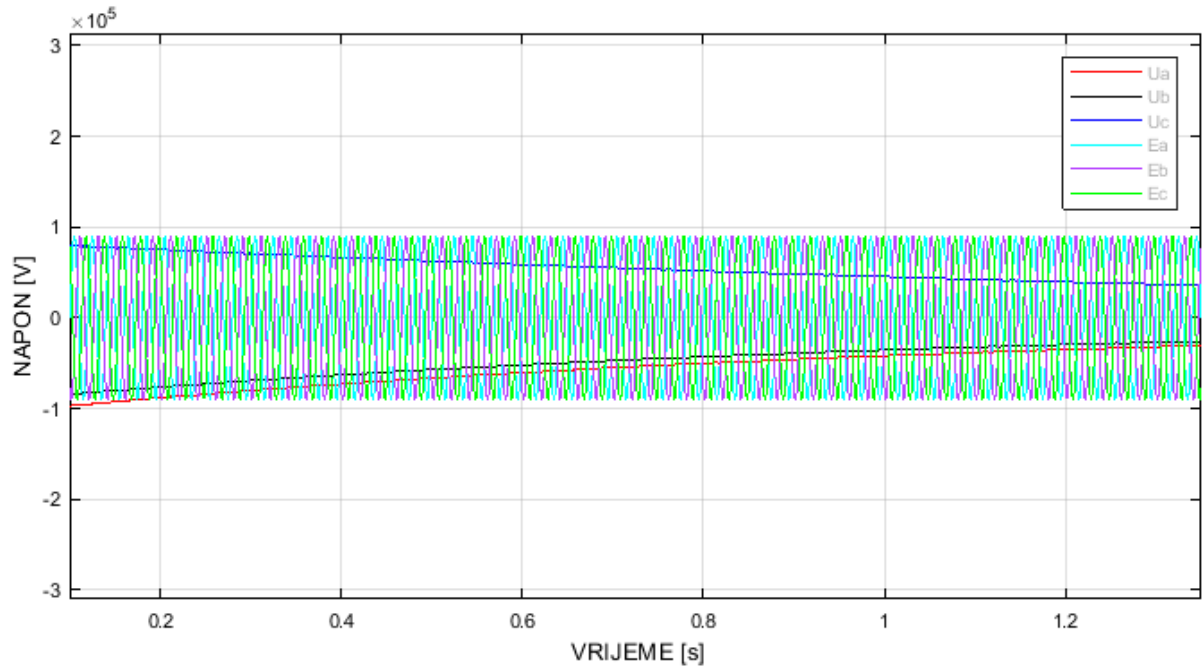
Slika 53. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj nekontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu za vrijeme trajanja beznaponske pauze, tj. vremenski period neposredno nakon isključenja prekidača, kao i neposredno prije APU prekidača, tj. od 0,1s do 1,35s .



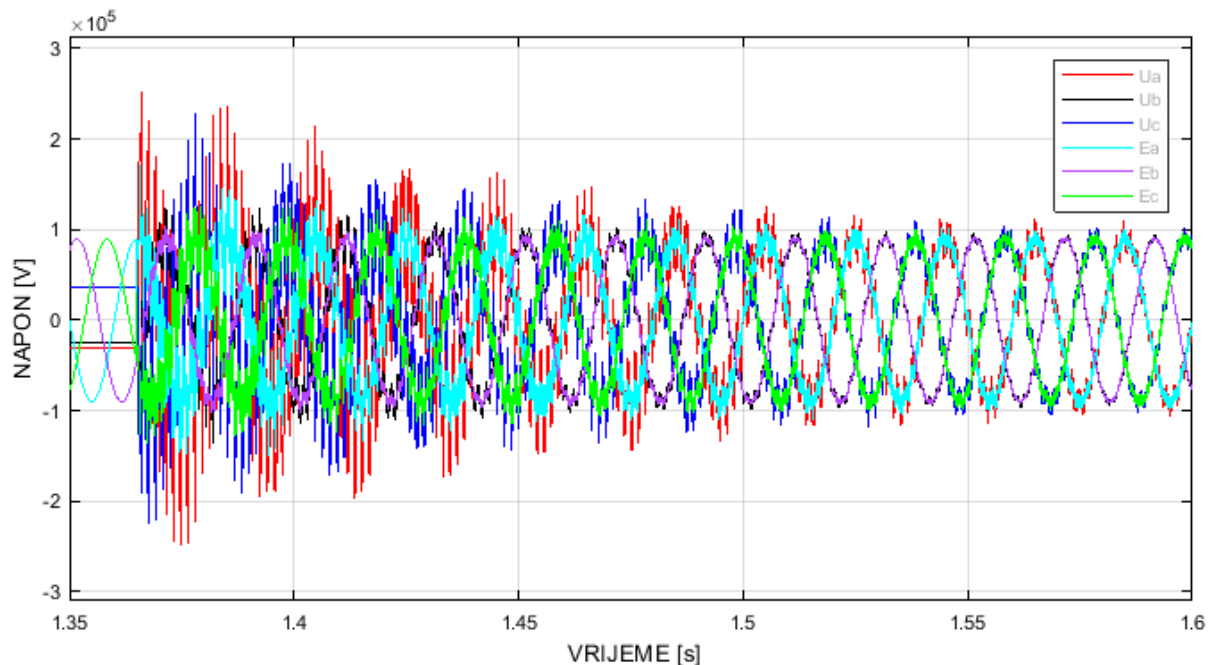
Slika 54. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj nekontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda u praznom hoduu za vremenski period neposredno prije APU prekidača, kao i nakon APU prekidača, tj. od 1,35s do 1,6s .



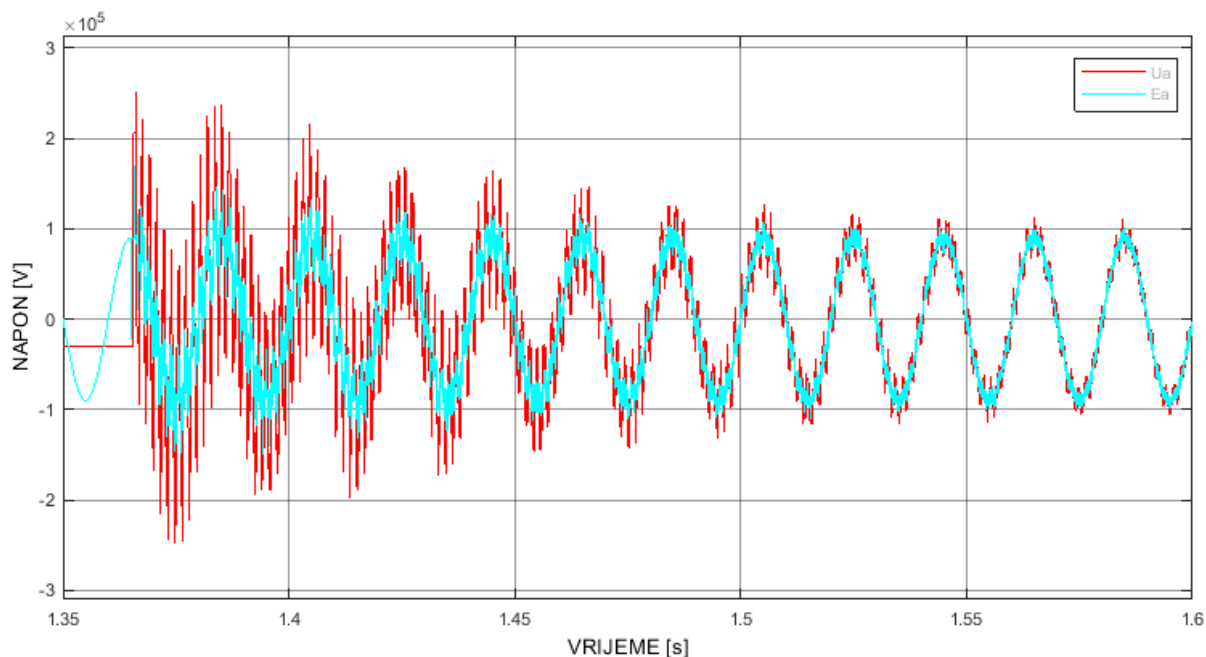
Slika 55. Talasni oblik napona napajanja i napona na kraju dalekovoda za slučaj nekontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda u praznom hoduu za vremenski period prije isključenja prekidača, kao i neposredno nakon isključenja prekidača, tj. od 0s do 0,1s .



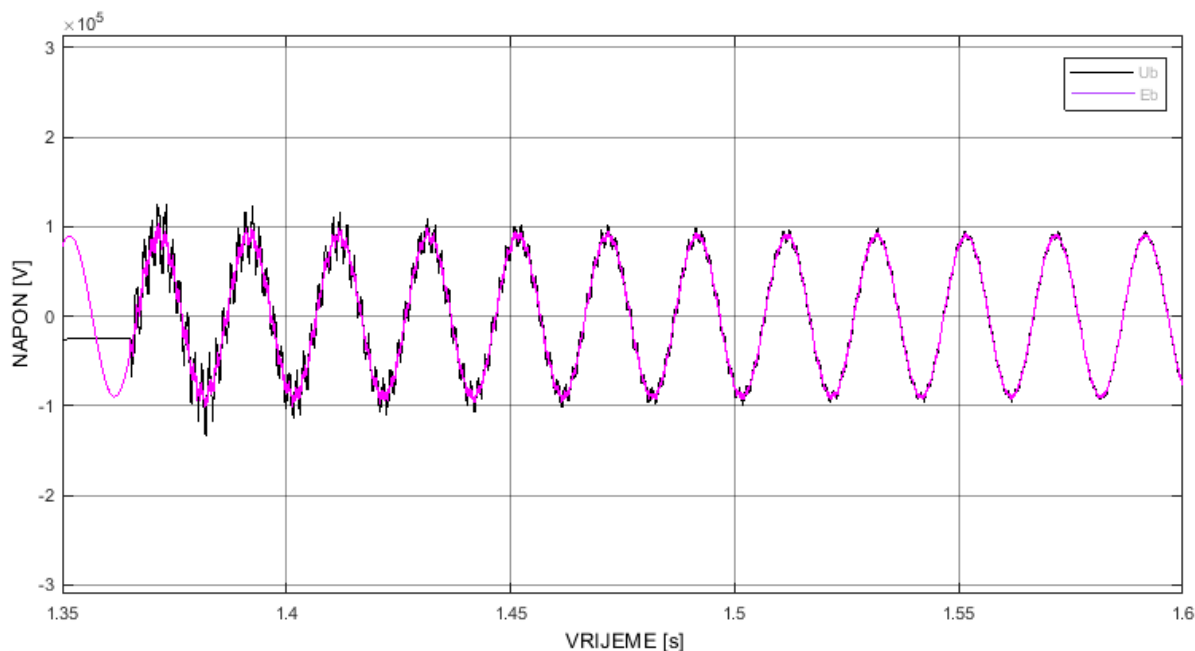
Slika 56. Talasni oblik napona napajanja i napona na kraju dalekovoda za slučaj nekontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda u praznom hodu za vrijeme trajanja beznaponske pauze, tj. vremenski period neposredno nakon isključenja prekidača, kao i neposredno prije APU prekidača, tj. od 0,1s do 1,35s .



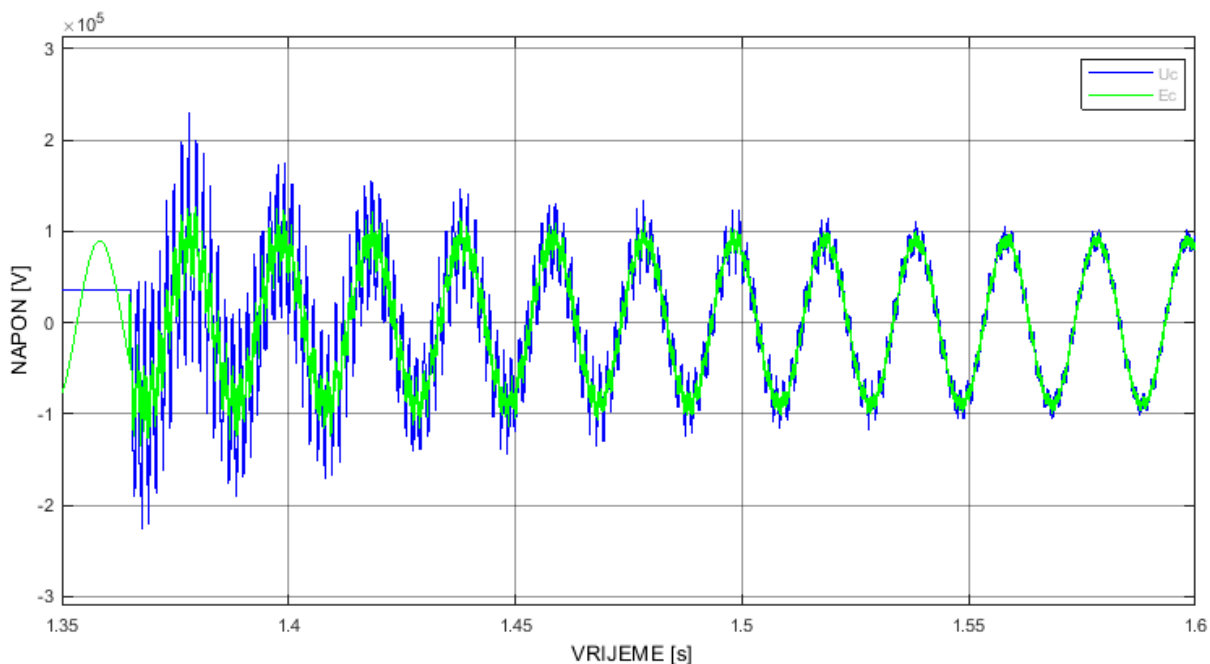
Slika 57. Talasni oblik napona napajanja i napona na kraju dalekovoda za slučaj nekontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda u praznom hodu za vremenski period neposredno prije APU prekidača, kao i nakon APU prekidača, tj. od 1,35s do 1,6s .



Slika 58. Talasni oblik napona napajanja i napona na kraju dalekovoda za slučaj nekontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu za vremenski period neposredno prije APU prekidača, kao i nakon APU prekidača, tj. od 1,35s do 1,6s u fazi A.



Slika 59. Talasni oblik napona napajanja i napona na kraju dalekovoda za slučaj nekontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu za vremenski period neposredno prije APU prekidača, kao i nakon APU prekidača, tj. od 1,35s do 1,6s u fazi B.



Slika 60. Talasni oblik napona napajanja i napona na kraju dalekovoda za slučaj nekontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu za vremenski period neposredno prije APU prekidača, kao i nakon APU prekidača, tj. od 1,35s do 1,6s u fazi C.

Apsolutne vrijednosti amplituda, kao i vrijednosti koeficijenata sklopnih prenapona za svaku fazu, za slučaj nekontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu, su prikazane u tabeli 4. Kao što se može vidjeti iz tabele 4. maksimalna apsolutna vrijednost amplitude sklopnog prenapona je dostignuta u fazi A, dok je najmanja maksimalna apsolutna vrijednost amplitude sklopnog prenapona dostignuta u fazi B.

Tabela 4. Apsolutne vrijednosti amplituda i vrijednosti koeficijenata sklopnih prenapona za slučaj nekontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu.

Faza	$U_{\max}$ [kV]	$K_p$
A	251,39	2,799
B	134,50	1,498
C	228,76	2,547

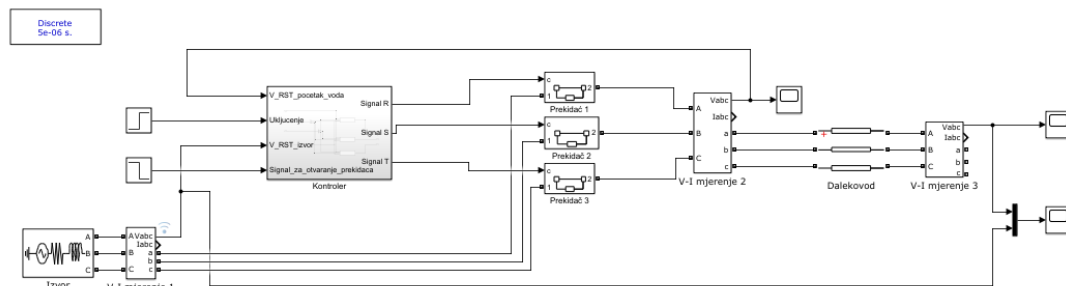
Analizom prethodno dobijenih rezultata može se donijeti zaključak da će nekontrolisano automatsko ponovno uključanje dalekovoda u proizvoljno odabranom vremenskom trenutku dovesti do uključanja trofaznog prekidača u veoma nepovoljnom vremenskom trenutku, imajući u vidu da u ovom slučaju vrijednost amplitude sklopnih prenapona ne zavisi samo od vremenskog trenutka uključanja prekidača već i od vrijednosti zaostalog naelektrisanja koje postoji na dalekovodu.

### 6.2.2.2. Kontrolisano automatsko ponovno uključenje

Tehnika kontrolisanih operacija prekidača je primjenjena i u slučaju kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu, sa ciljem sprječavanja pojave neželjenih sklopnih prenapona. U poređenju sa uključanjem dalekovoda u praznom hodu, koji je predstavljao najjednostavniji slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda, slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda je nešto složeniji. Naime, da bi se odredili optimalni vremenski trenuci uključanja jednopolnih prekidača, neophodno je imati u vidu i zaostalo naelektrisanje na dalekovodu, koje se javlja u ovom slučaju.

Na osnovu optimalnog algoritma za kontrolisano automatsko ponovno uključanje dalekovoda u praznom hodu, koji je ranije predstavljen u okviru ovog poglavlja, razvijen je kontroler koji omogućava kontrolisano automatsko ponovno uključanje prekidača u optimalnim vremenskim trenucima, sa aspekta dobijenih sklopnih prenapona.

Razvijeni model za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu je prikazan na slici 61. Posmatranjem ove slike može se donijeti zaključak da je ovaj model gotovo identičan razvijenom modelu za kontrolisano uključanje dalekovoda u praznom hodu (slika 46.). Jedina razlika je u početnom položaju jednopolnih prekidača, koji su u ovom slučaju u početnom položaju uključeni.



Slika 61. Model posmatranog sistema u Matlab-u (moduo Simulink) za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu.

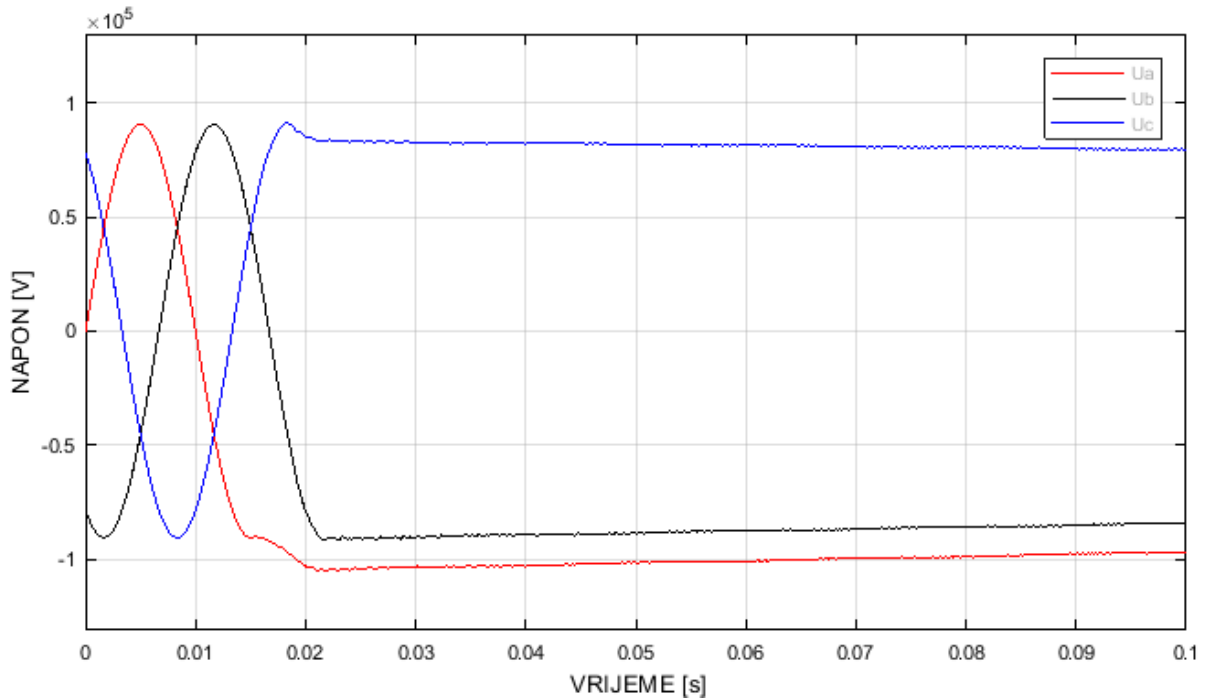
Da bi se simuliralo kontrolisano automatsko ponovno uključanje dalekovoda neophodno je u objektu step funkcije, kojim se modeluje djelovanje relejne zaštite, tj. signal za otvaranje (isključenje) prekidača, upisati vremenski trenutak u kojem relejna zaštita isključuje prekidač. Nakon isključenja prekidača, kontroler sprovodi optimalni algoritam za kontrolisano automatsko ponovno uključanje dalekovoda u praznom hodu sa ciljem određivanja optimalnih vremenskih trenutaka uključanja. Da bi odredio optimalne vremenske trenutke uključanja, kontroleru su i ovdje neophodni referentni naponski signala napona napajanja i napona sa početka voda, koje dobija od objekata *V-I mjerenje 1* i *V-I mjerenje 2*, respektivno. Optimalni vremenski trenutak u slučaju kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda je vremenski trenutak u kojem je napon napajanja određene faze tačno

jednak zaostalom naponu na vodu u toj fazi. Pri čemu, kako je to i ranije pomenuto, takođe treba obratiti pažnju da se odabere ne samo ista vrijednost napona napajanja te faze tako da je jednaka zaostalom naponu na vodu u toj fazi, nego i da taj vremenski trenutak odgovara istom trendu promjene napona. Detaljniji prikaz modela kontrolera, koji je već ranije i objašnjen, je predstavljen na slikama 47. i 48.

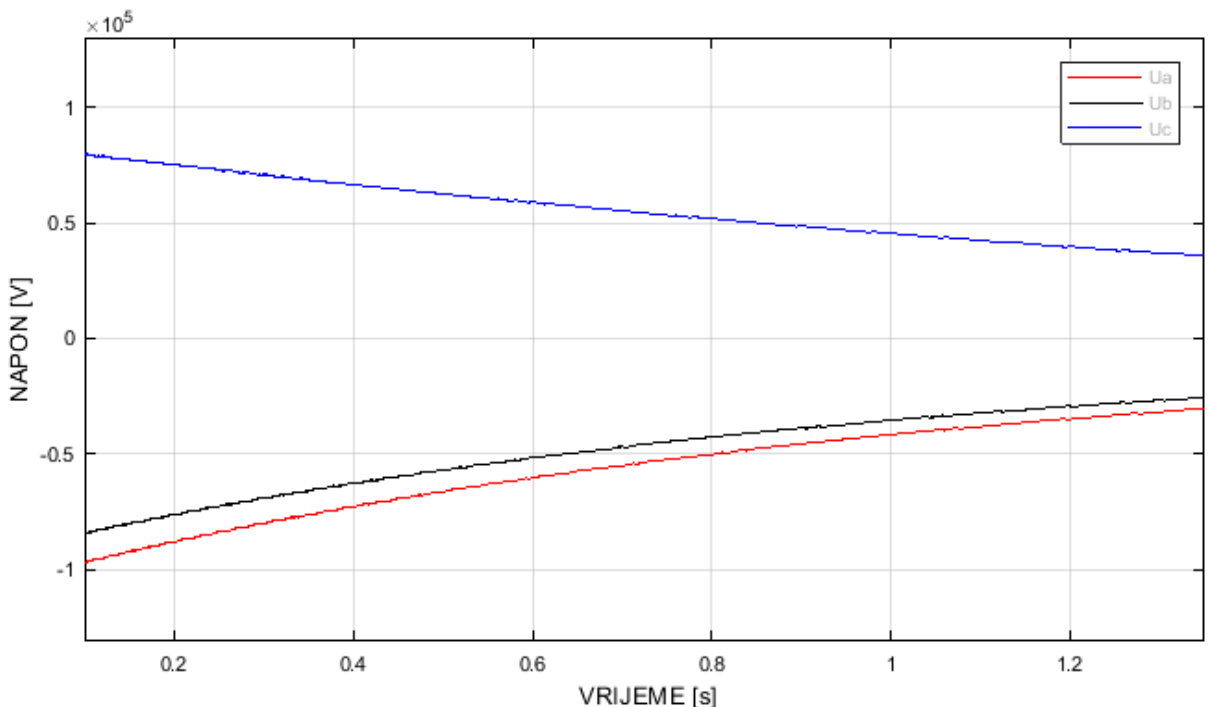
Nakon određivanja optimalnih vremenskih trenutaka uključjenja, kontroler će poslati komande za uključjenje prekidačima ukoliko je primio eksternu komandu za uključjenje, od strane APU-a. Ukoliko pak nije izdata eksterna komanda za uključjenje, kontroler se vraća na početak semplovanja (uzorkovanja) referentnih naponskih signala i kontinuirano se vrši petlja optimalnog algoritma za kontrolisano automatsko ponovno uključjenje dalekovoda i određuju novi optimalni vremenski trenuci uključjenja. Stoga, da bi se mogla uspješno pokrenuti simulacija kontrolisanog automatskog ponovnog uključjenja, potrebno je da sistem APU-a izda eksternu komandu za ponovno uključjenje prekidača. To se postiže tako što se u objektu step funkcije, koja se odnosi na signal za uključjenje, upiše vremenski trenutak ponovnog uključjenja prekidača. Unošenjem prethodno pomenutog vremenskog trenutka, kontroler prima eksternu komandu za uključjenje od strane APU-a, i od tog trenutka prati referentne naponske signale i nakon obrade algoritma određuje prve optimalne vremenske trenutke uključjenja koje automatski prosleđuje prekidačima. Time je postignuto kontrolisano automatsko ponovno uključjenje prekidača u procjenjenim optimalnim vremenskim trenucima, čime su značajno ograničeni sklopni prenaponi.

Grafički prikaz talasnog oblika napona na kraju dalekovoda dobijen pokretanjem simulacije je predstavljen na slici 62., slici 63. i slici 64., dok su na slici 65., slici 66. i slici 67. na zajedničkom grafiku prikazani talasni oblici napona napajanja i dobijeni talasni oblici napona na kraju za sve tri faze, posebno za tri vremenska perioda: vremenski period prije isključenja prekidača i neposredno nakon isključenja prekidača (od 0s do 0,1s), vremenski period neposredno nakon isključenja prekidača, kao i neposredno prije APU prekidača (od 0,1s do 1,35s) i vremenski period neposredno prije APU prekidača, kao i nakon APU prekidača (od 1,35s do 1,6s), respektivno.

Kako bi se izvršilo poređenje dobijenih rezultata sa dobijenim rezultatima nekontrolisanog automatskog ponovnog uključjenja dalekovoda, analiziran je talasni oblik napona na kraju dalekovoda pri identičnim vremenskim trenucima isključenja i APU prekidača. Naime, relejna zaštita isključi prekidač u vremenskom trenutku 0,015s, i kao što se može vidjeti na grafiku, u svakoj fazi dalekovoda se javlja zaostalo naelektrisanje. Nakon toga, sistem APU-a izdaje eksternu komandu za uključjenje prekidača u vremenskom trenutku 1,365s, čime je kontroler primio eksternu komandu za uključjenje i počeo sa sprovođenjem optimalnog algoritma za kontrolisano automatsko ponovno uključjenje dalekovoda, sa ciljem određivanja prvih optimalnih vremenskih trenutaka uključjenja za svaku fazu. Nakon određivanja optimalnih vremenskih trenutaka uključjenja za svaku fazu, kontroler prosleđuje komande za uključjenje odgovarajućim jednopolnim prekidačima.

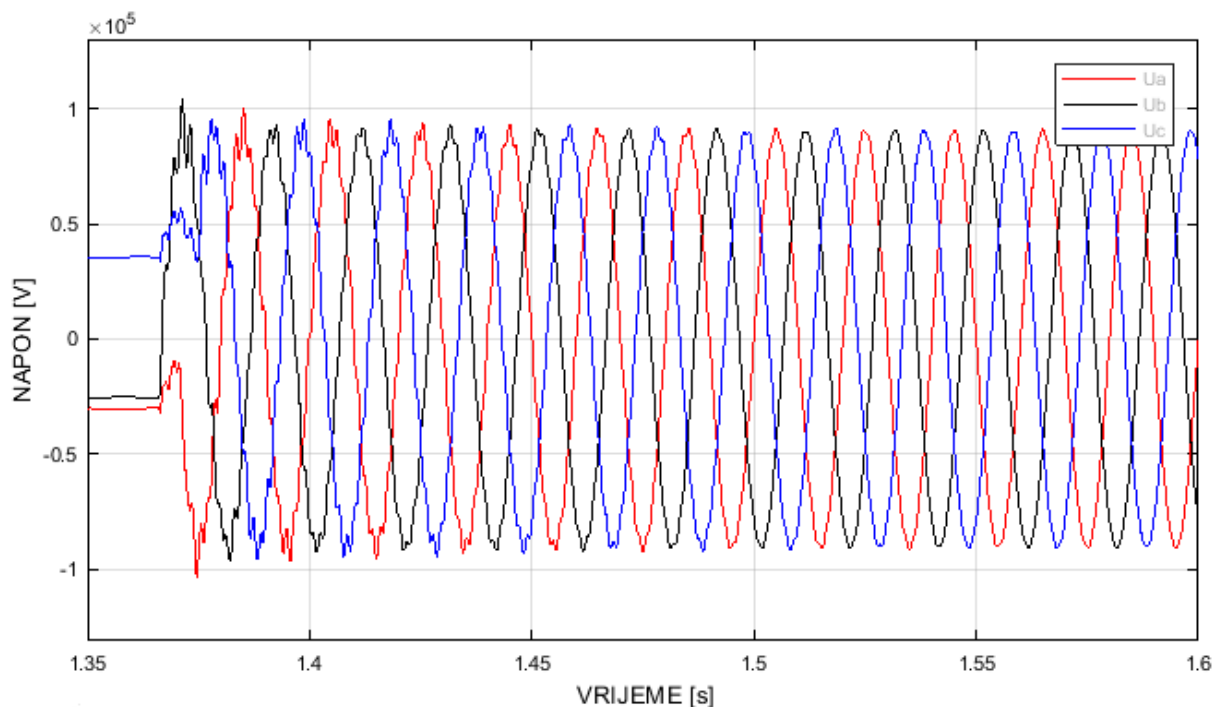


Slika 62. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu za vremenski period prije isključenja prekidača, kao i neposredno nakon isključenja prekidača, tj. od 0s do 0,1s .

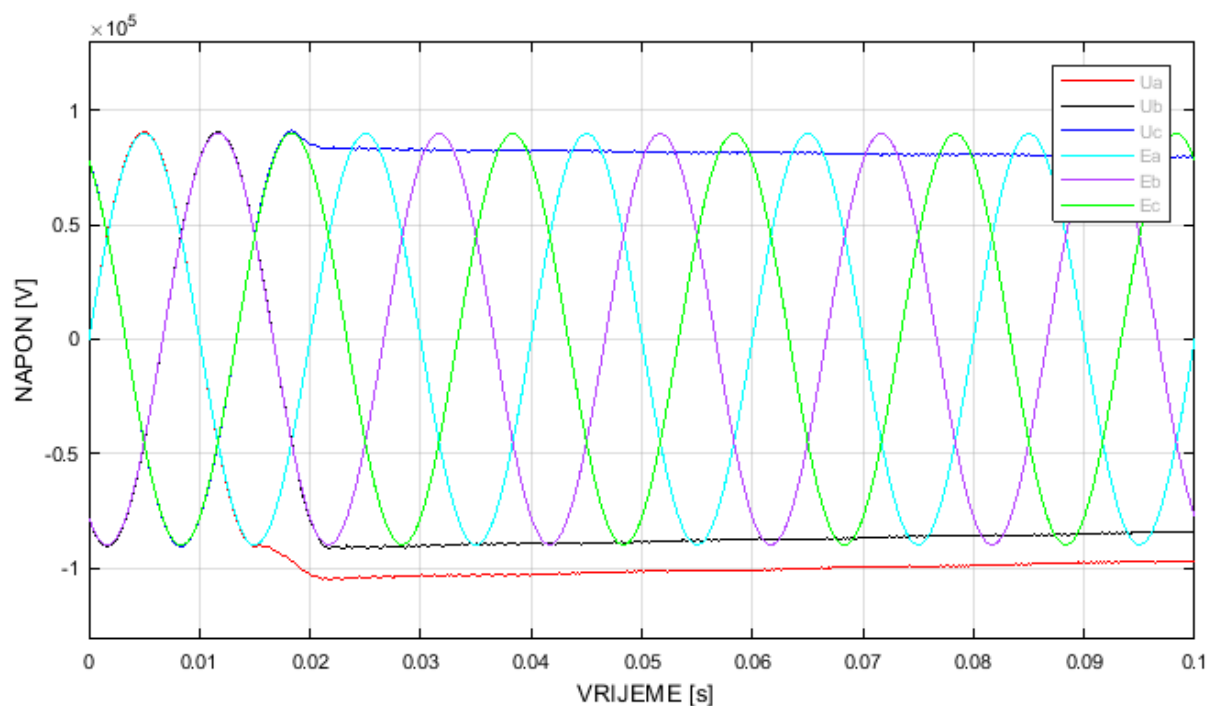


Slika 63. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu za vrijeme trajanja beznaponske pauze, tj. vremenski period neposredno nakon isključenja prekidača, kao i neposredno prije APU prekidača, tj. od 0,1s do 1,35s .

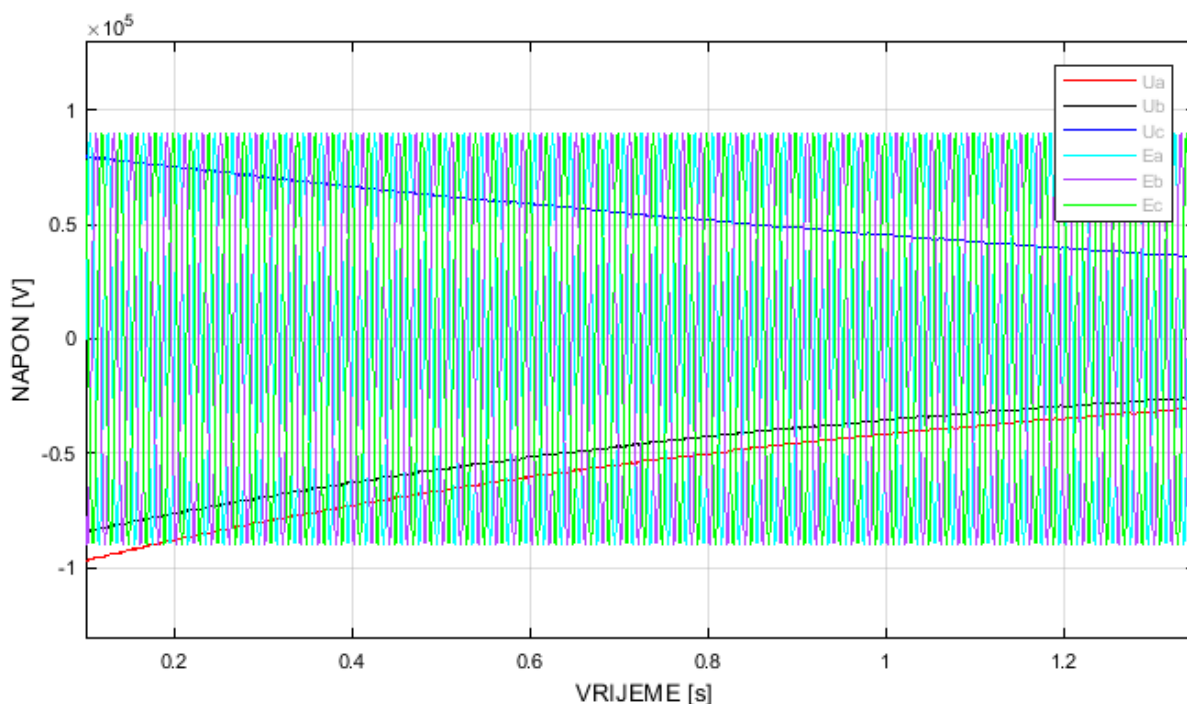




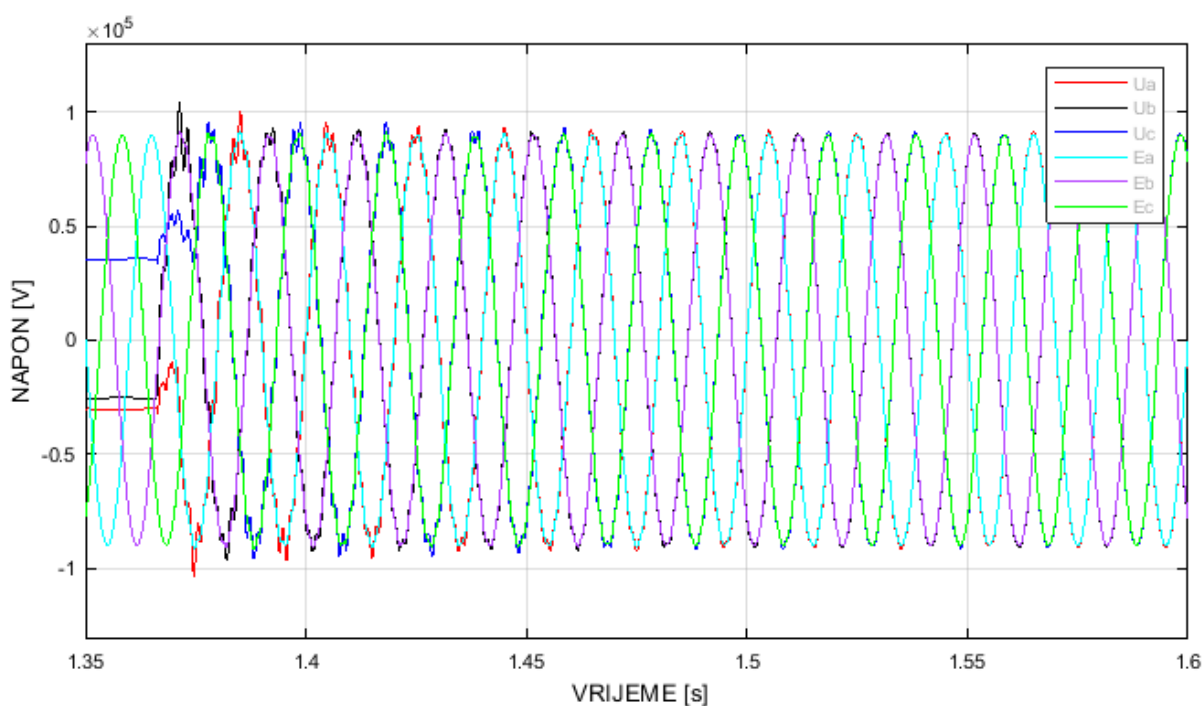
Slika 64. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu za vremenski period neposredno prije APU prekidača, kao i nakon APU prekidača, tj. od 1,35s do 1,6s .



Slika 65. Talasni oblik napona napajanja i napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu za vremenski period prije isključenja prekidača, kao i neposredno nakon isključenja prekidača, tj. od 0s do 0,1s .



Slika 66. Talasni oblik napona napajanja i napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda u praznom hodu za vrijeme trajanja beznaponske pauze, tj. vremenski period neposredno nakon isključenja prekidača, kao i neposredno prije APU prekidača, tj. od 0,1s do 1,35s .



Slika 67. Talasni oblik napona napajanja i napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda u praznom hodu za vremenski period neposredno prije APU prekidača, kao i nakon APU prekidača, tj. od 1,35s do 1,6s .

Apsolutne vrijednosti amplituda, kao i vrijednosti koeficijenata sklopnih prenapona za svaku fazu, za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu, su prikazane u tabeli 5. Maksimalna apsolutna vrijednost amplitude sklopnog prenapona je dostignuta u fazi B, dok je najmanja maksimalna apsolutna vrijednost amplitude sklopnog prenapona dostignuta u fazi C.

Tabela 5. Apsolutne vrijednosti amplituda i vrijednosti koeficijenata sklopnih prenapona za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu.

Faza	$U_{\max}$ [kV]	$K_p$
A	103,49	1,152
B	104,15	1,160
C	95,82	1,067

Posmatranjem talasnog oblika napona na kraju dalekovoda sa prethodno prikazanih grafika, može se donijeti zaključak da su primjenom tehnike kontrolisanih operacija prekidača u slučaju kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda, značajno ograničeni sklopni prenaponi. Maksimalne vrijednosti koeficijenata dobijenih sklopnih prenapona u sve tri faze su neuporedivo manje u poređenju sa vrijednostima dobijenim u slučaju nekontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda gdje je koeficijent sklopnog prenapona dostigao svoju maksimalnu vrijednost od 2,799 u fazi A (tabela 4.).

Poređenjem i analizom dobijenih rezultata u slučaju nekontrolisanog i kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu, i u ovom slučaju su potvrđene prednosti primjene tehnike kontrolisanih operacija prekidača u cilju ograničenje sklopnih prenapona.

### 6.2.3. Uticaj različitih faktora na vrijednost amplitude sklopnih prenapona pri uključanju dalekovoda u praznom hodu

Na osnovu sprovedenog istraživanja i analize dobijenih rezultata prikazanih u prethodnim potpoglavljima, vezanih za sklopne prenapone uzrokovane uključanjem i automatskim ponovnim uključanjem dalekovoda, potvrđeni su zaključci koje je moguće naći u brojnim izvorima. Naime, potvrđeno je da dominantan uticaj na vrijednost amplitude sklopnih prenapona imaju vremenski trenutak uključanja prekidača i dužina trajanja beznaponske pauze [13].

Prvi, a ujedno i najvažniji faktor od kojeg zavisi vrijednost amplitude sklopnih prenapona uzrokovanih operacijama uključanja, je vremenski trenutak uključanja prekidača. Kao, što se može vidjeti u rezultatima koji su prikazani u prethodnim potpoglavljima, u oba analizirana slučaja, kako u slučaju uključanja dalekovoda u praznom hodu, tako i u slučaju automatskog ponovnog uključanja dalekovoda u praznom hodu, vrijednost amplitude sklopnih prenapona je mnogo veća u slučaju nekontrolisanog uključanja prekidača, u poređenju sa kontrolisanim uključanjem. Nekontrolisano uključanje prekidača se izvodi u proizvoljno odabranim vremenskim trenucima pri svakom uključanju, što će makar u jednoj fazi uzrokovati uključanje u veoma nepovoljnim vremenskim trenucima, pa će amplitude

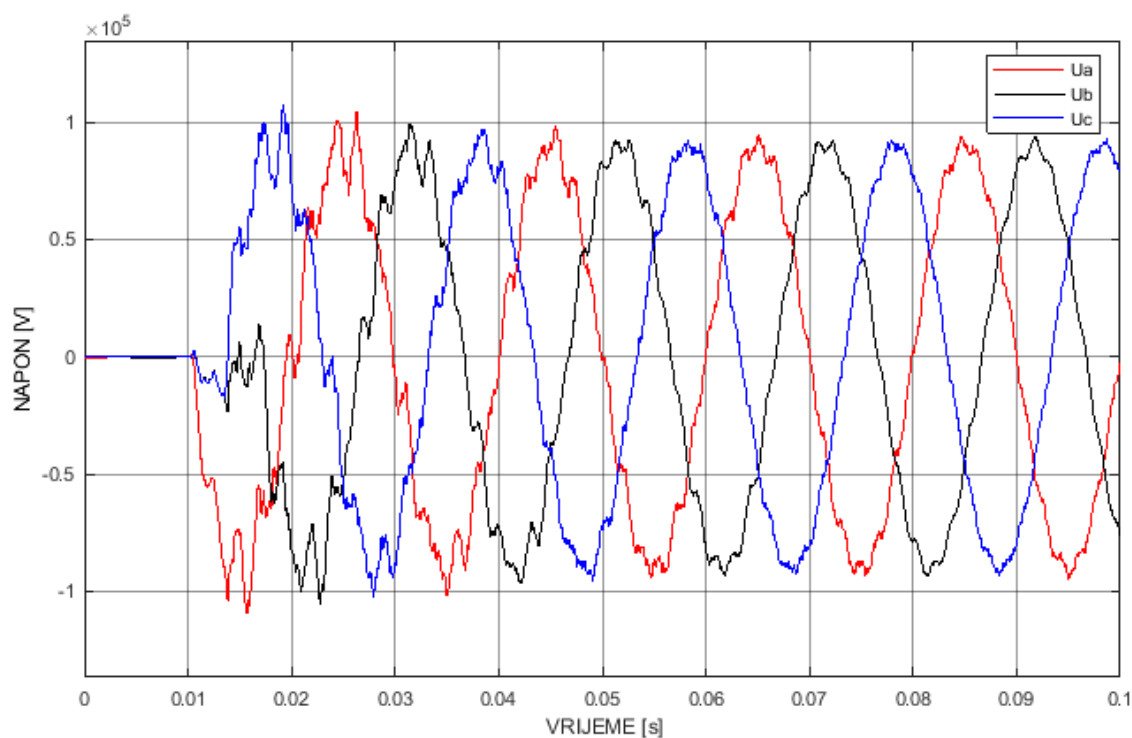
sklopnih prenapona dostići veoma visoke vrijednosti. Ovaj problem se može riješiti primjenom tehnike kontrolisanih operacija prekidača. Naime, uključanje prekidača se izvodi u optimalnim vremenskim trenucima, čime je redukovana pojava sklopnih prenapona i značajno ograničene vrijednosti njihovih amplituda.

Drugi faktor koji ima dominantan uticaj na vrijednost amplitude sklopnih prenapona, uzrokovanih uključanjem dalekovoda, je vrijeme trajanja beznaponske pauze. Poređenjem rezultata dobijenih nekontrolisanim uključanjem dalekovoda u praznom hodu (tabela 2.), i nekontrolisanim automatskim ponovnim uključanjem dalekovoda u praznom hodu (tabela 4.) može se zaključiti da se mnogo veće apsolutne vrijednosti amplitude sklopnih prenapona dobijaju u slučaju postojanja zaostalog naelektrisanja na dalekovodu, tj. u slučaju automatskog ponovnog uključanja dalekovoda. Isto se može zaključiti i poređenjem rezultata dobijenih kontrolisanim uključanjem (tabela 3., tabela 4.). Dakle, uključanje voda nakon kratke beznaponske pauze, bez obzira da li je u pitanju nekontrolisano ili kontrolisano uključanje, rezultiraće mnogo većim vrijednostima amplituda sklopnih prenapona u poređenju sa uključanjem voda nakon duge beznaponske pauze.

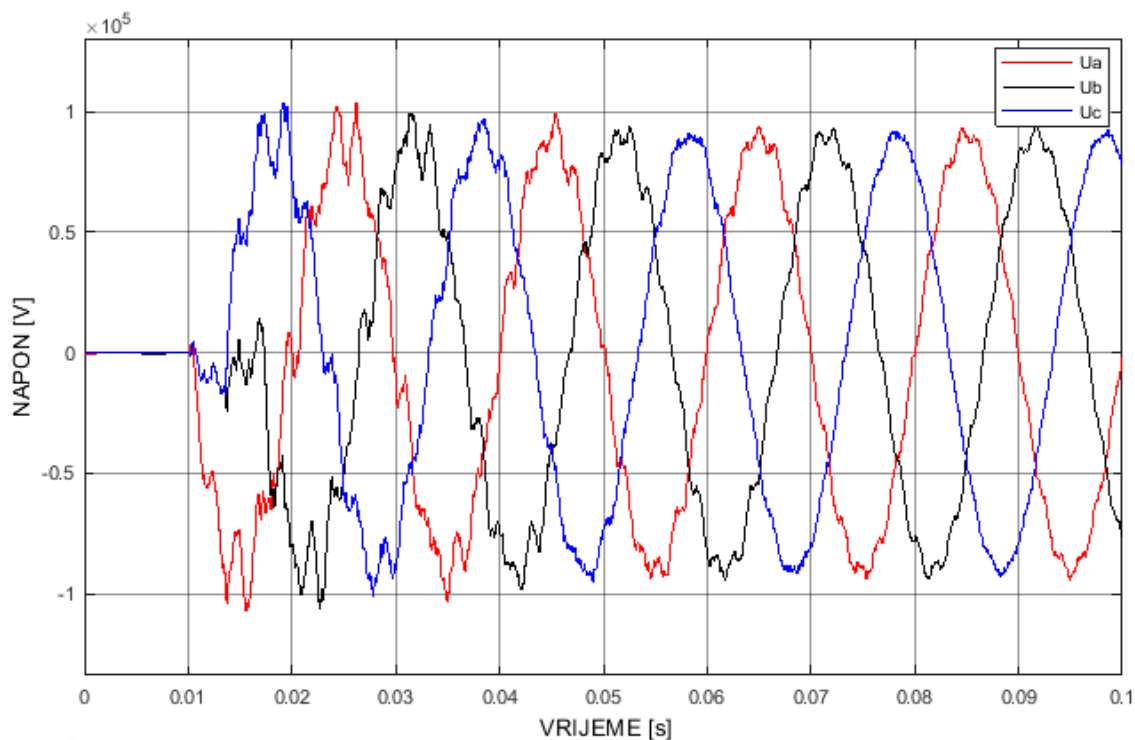
Dakle, kako je to prethodno pomenuto u okviru ovog rada, primjenom tehnike kontrolisanih operacija prekidača postiže se minimum sklopnih prenapona. To je bio i glavni motiv da se na osnovu brojnih istraživačkih radova, koji se mogu pronaći u literaturi, u okviru ovog magistarskog rada razvije optimalni algoritam za kontrolisano uključanje prekidača u dalekovodnim poljima u visokonaponskim postrojenjima. Prednosti primjene ovog algoritma su brojne, i one se mogu posmatrati kako sa tehničkog, tako i sa ekonomskog aspekta. Dobijeni rezultati, prikazani u prethodnim potpoglavljima, svjedoče o uspješnosti razvijenog optimalnog algoritma, i njegovom primjenom će se nesumnjivo postići značajno ograničenje sklopnih prenapona, uzrokovanih uključanjem dalekovoda. Međutim, i pored toga što razvijeni optimalni algoritam teorijski u simuliranim modelima elektroenergetskih sistema daje odlične rezultate, njegova primjena u praksi, tj. u stvarnim elektroenergetskim sistemima može naići na određena ograničenja. Jedno od ograničenja koje se može javiti je statistička pojava električnog luka prilikom uključanja prekidača. Naime, osnovni zadatak razvijenog optimalnog algoritma je određivanje optimalnog vremenskog trenutka kontrolisanog uključanja prekidača u visokonaponskim postrojenjima, kojim se postiže minimum sklopnih prenapona, uzrokovanih uključanjem dalekovoda. Međutim, u praksi se pokazuje, da se prekidač neće baš tačno uključiti u optimalnom vremenskom trenutku koji je proračunat razvijenim optimalnim algoritmom, već će se uključiti nešto ranije. Razlog za to je pojava rasipanja polova prekidača, tj. statistička pojava električnog luka koji se formira prije samog uključanja prekidača, kao posledica približavanja kontakata prekidača, tzv. pojava pred-iskrenja. Kao posledica pojave pred-iskrenja dobijeni sklopni prenaponi u praksi, za iste ispitivane slučajeve uključanja dalekovoda, će imati nešto veće vrijednosti amplituda u poređenju sa onim dobijenim u prethodno sprovedenom istraživanju. Koliko će ta vrijednost amplitude biti veća u praksi zavisi od vremena trajanja pred-iskrenja, tj. vremenskog trenutka u kojem će se pojaviti rasipanje polova prekidača. Što je vrijeme trajanja pred-iskrenje veće, tj. što do pojave rasipanja polova prekidača dođe u vremenskom trenutku koji više prednjači odgovarajućem optimalnom vremenskom trenutku uključanja prekidača, to će i vrijednost amplitude dobijenih sklopnih prenapona biti veća.

Uticaj pojave rasipanja polova prekidača, tj. efekta pred-iskrenja je istražen na primjeru kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu. Poređenjem rezultata

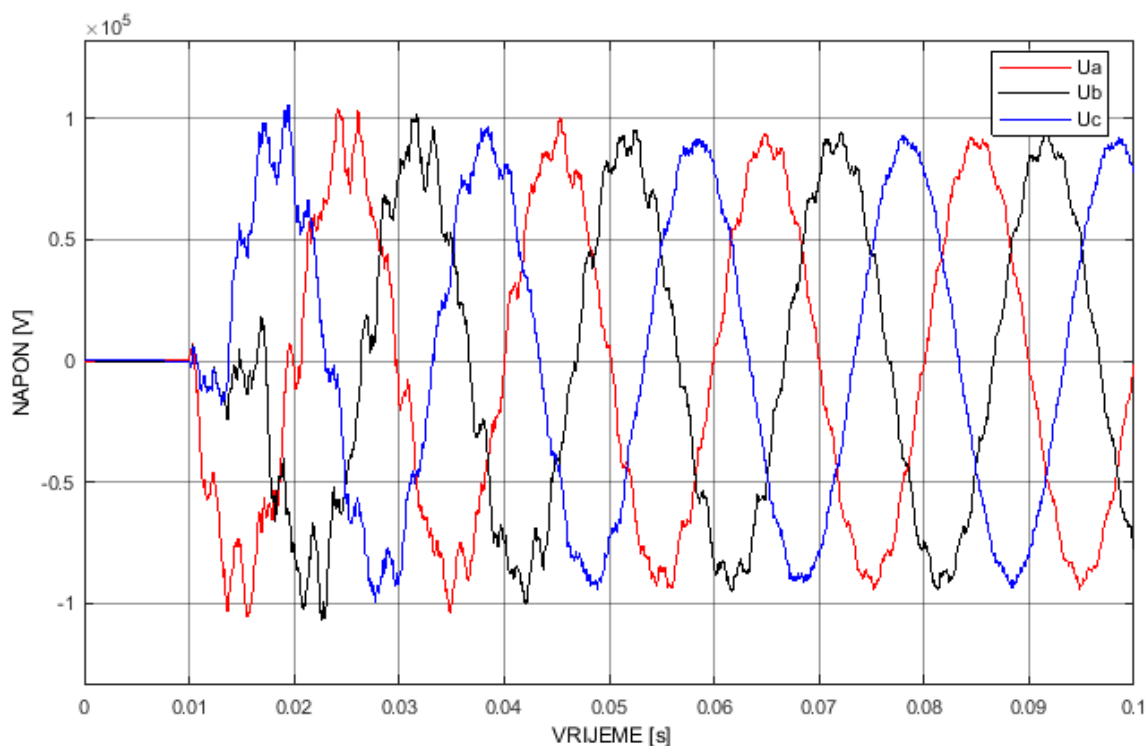
sklopnih prenapona dobijenih kontrolisanim uključanjem prekidača u optimalnim vremenskim trenucima za svaku fazu (slika 49.), sa rezultatima sklopnih prenapona dobijenim, takođe za uključenje dalekovoda u praznom hodu, uzimanjem u obzir efekta rasipanja polova prekidača za različita vremenske trenutke u kojima se pojavljuje rasipanje polova prekidača, može se donijeti zaključak da pojava rasipanja polova prekidača ima veliki uticaj na vrijednost amplitude dobijenih sklopnih prenapona. Naime, što vremenski trenutak u kojem dolazi do pojave rasipanje polova prekidača više prednjači odgovarajućem optimalnom vremenskom trenutku kontrolisanog uključanja prekidača, tj. što ranije dođe do pojave električnog luka prije mehaničkog dodira kontakata prekidača, dobijaju se veće vrijednosti amplitude sklopnih prenapona. To se može vidjeti na graficima prikazanim u nastavku, na kojima su prikazani talasni oblici napona na kraju dalekovoda za slučajeve prediskrenja od 0,1ms (slika 68.), 0,2ms (slika 69.), 0,3ms (slika 70.), 0,4ms (slika 71.), 0,5ms (slika 72.) i 1ms (slika 73.). Dakle, ukoliko do pojave električnog luka dodje 1ms ranije od proračunatih optimalnih vremenskih trenutaka kontrolisanog uključanja (slika 73.), maksimalna vrijednost amplitude sklopnih prenapona biće značajno veća u poređenju sa vrijednošću dobijenom u optimalnim vremenskim trenucima kontrolisanog uključanja (slika 49.).



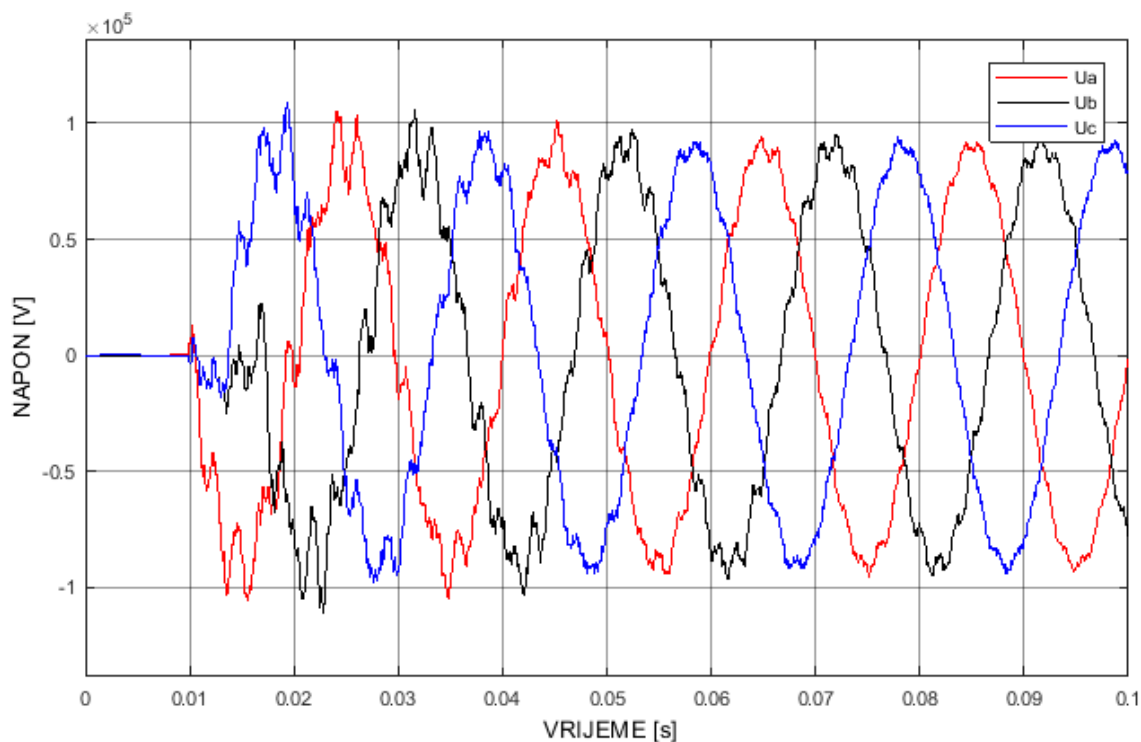
Slika 68. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu, pri čemu do pojave rasipanja polova prekidača dolazi 0,1ms ranije od optimalnih vremenskih trenutaka uključanja prekidača.



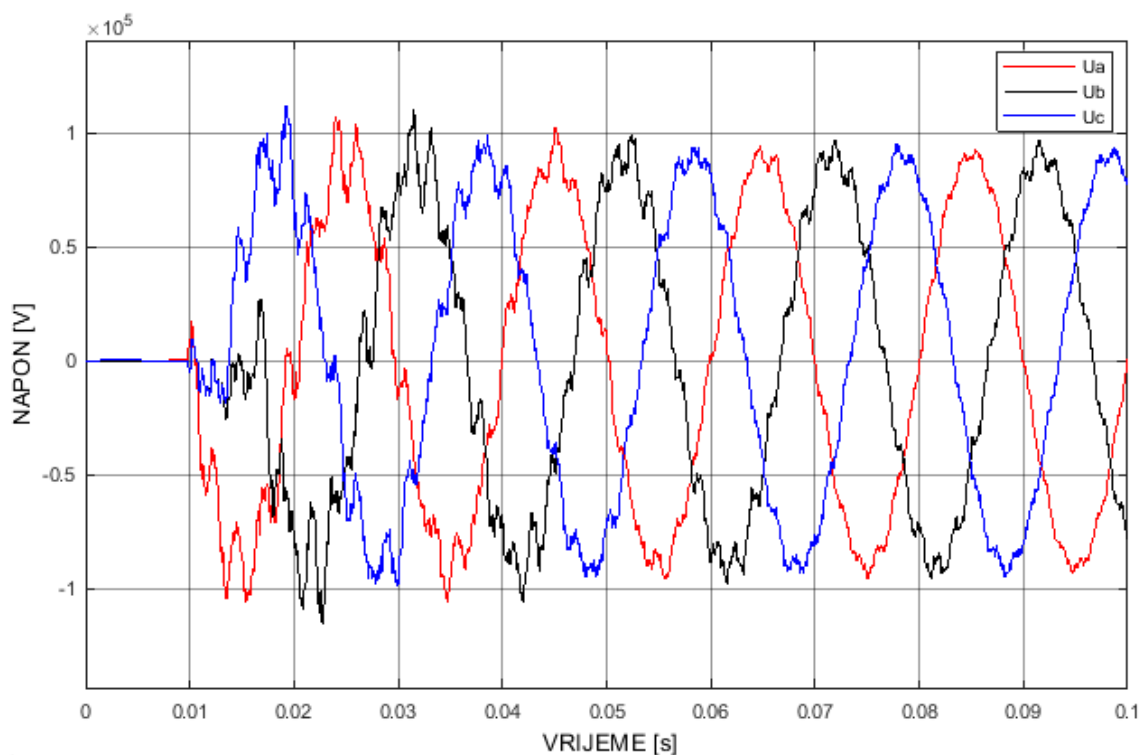
Slika 69. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu, pri čemu do pojave rasipanja polova prekidača dolazi 0,2ms ranije od optimalnih vremenskih trenutaka uključanja prekidača.



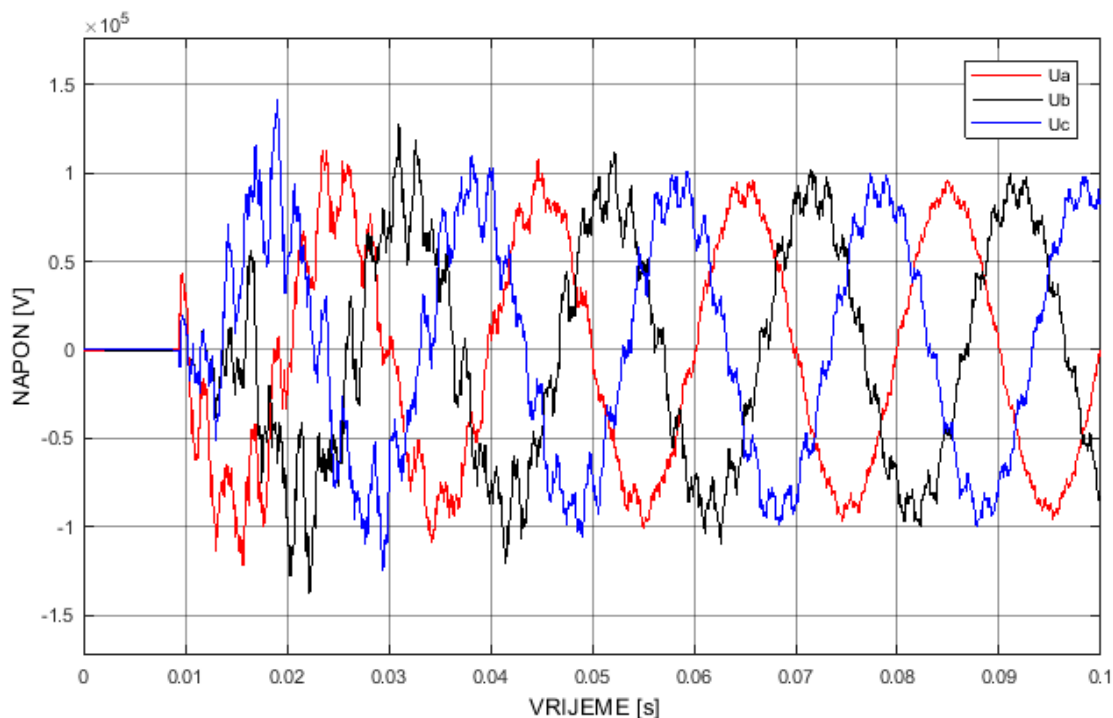
Slika 70. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu, pri čemu do pojave rasipanja polova prekidača dolazi 0,3ms ranije od optimalnih vremenskih trenutaka uključanja prekidača.



Slika 71. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu, pri čemu do pojave rasipanja polova prekidača dolazi 0,4ms ranije od optimalnih vremenskih trenutaka uključanja prekidača.



Slika 72. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu, pri čemu do pojave rasipanja polova prekidača dolazi 0,5ms ranije od optimalnih vremenskih trenutaka uključanja prekidača.



Slika 73. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog uključivanja dalekovoda u praznom hodu, pri čemu do pojave rasipanja polova prekidača dolazi 1ms ranije od optimalnih vremenskih trenutaka uključivanja prekidača.

Vrijednosti koeficijenta sklopnih prenapona na kraju dalekovoda za slučajeve prediskrenja od 0,1ms , 0,2ms , 0,3ms , 0,4ms , 0,5ms i 1ms ranije od optimalnih vremenskih trenutaka uključivanja prekidača, su prikazane u tabeli 6. Dobijeni rezultati potvrđuju ranije tvrdnje, da što vremenski trenutak u kojem dolazi do pojave rasipanje polova prekidača više prednjači odgovarajućem optimalnom vremenskom trenutku kontrolisanog uključivanja prekidača, dobijaju se veće vrijednosti koeficijenta sklopnih prenapona. Maksimalna vrijednost koeficijenta sklopnog prenapona je dostignuta u fazi C, za slučaj prediskrenja od 1ms i iznosi 1,576.

Tabela 6. Vrijednosti koeficijenta sklopnih prenapona na kraju dalekovoda za slučajeve prediskrenja od 0,1ms , 0,2ms , 0,3ms , 0,4ms , 0,5ms i 1ms ranije od optimalnih vremenskih trenutaka uključivanja prekidača.

Faza	0,1ms	0,2ms	0,3ms	0,4ms	0,5ms	1ms
	$K_p$					
A	1,220	1,195	1,174	1,176	1,191	1,363
B	1,172	1,182	1,192	1,206	1,287	1,533
C	1,199	1,156	1,177	1,212	1,247	1,576

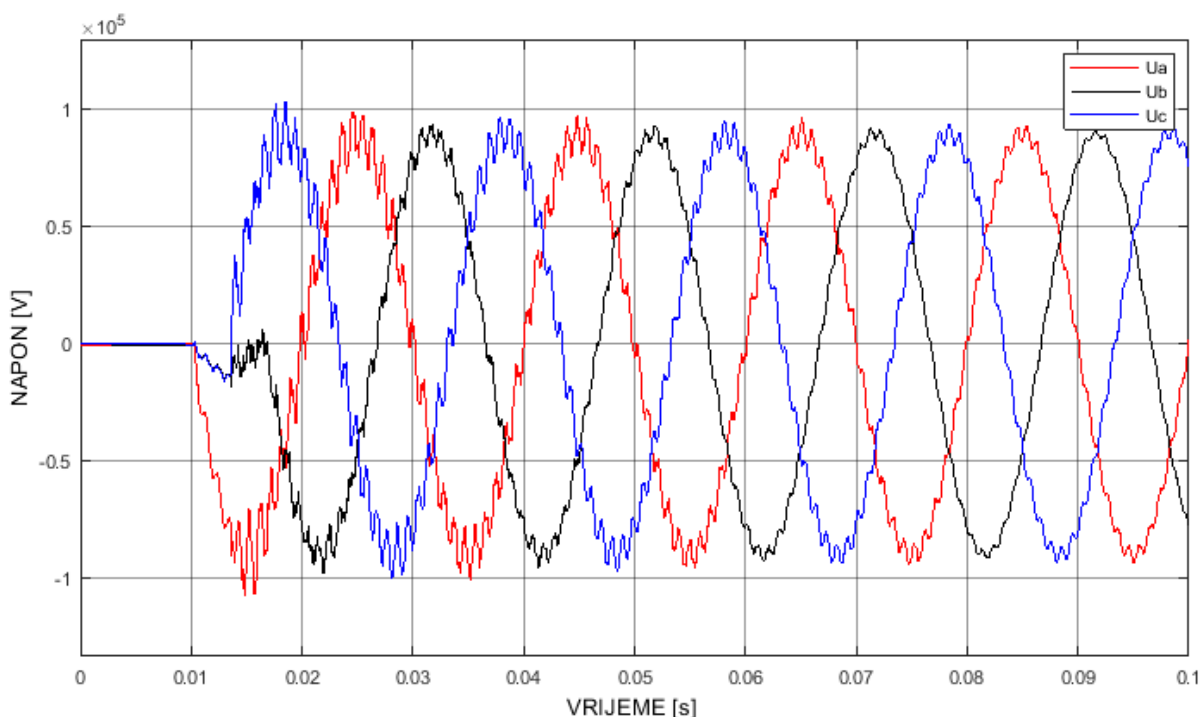
Pored prethodno pomenutih faktora koji utiču na vrijednost amplitude sklopnih prenapona uzrokovanih uključanjem dalekovoda, vrijednost amplitude sklopnih prenapona



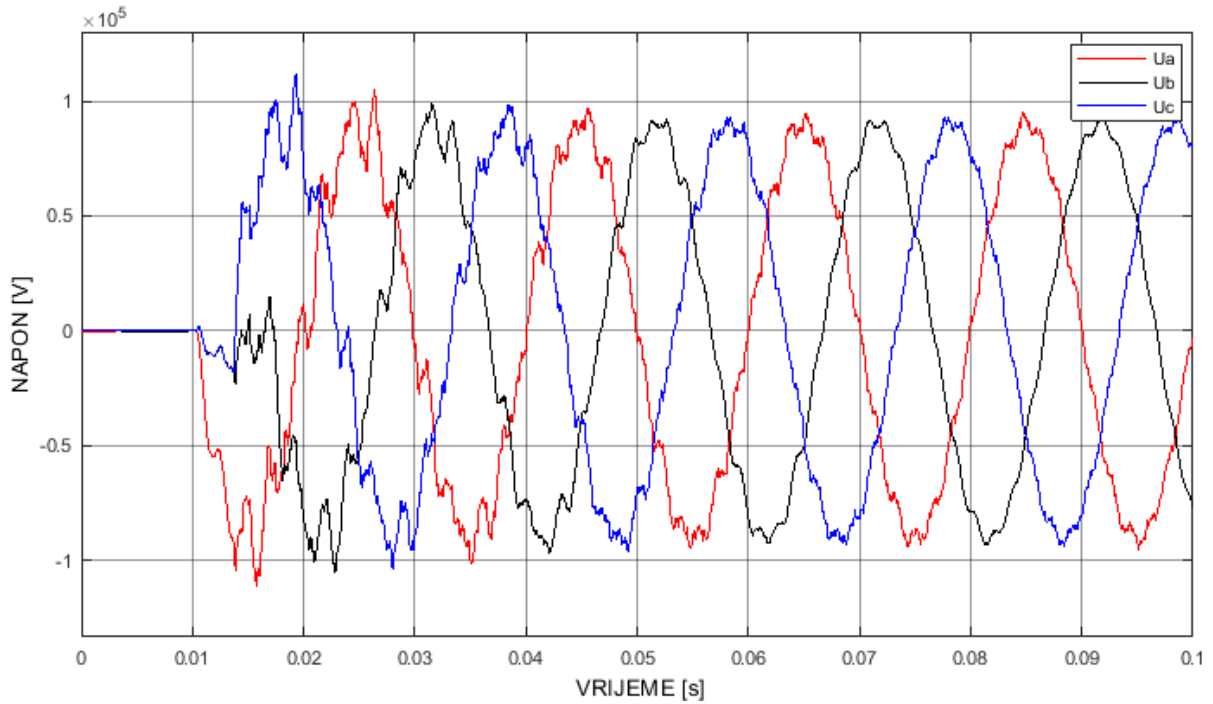
zavisi i od parametara sistema. Kako se sprovedeno istraživanje odnosi na uključenje dalekovoda u raznim slučajevima, analiziran je uticaj dužine dalekovoda, kao jednog od parametara sistema, na vrijednost amplitude dobijenih sklopnih prenapona. Naime, analizirani su rezultati sklopnih prenapona za slučaj kontrolisanog uključnja dalekovoda u praznom hodu u optimalnim vremenskim trenucima za svaku fazu, pri različitim dužinama dalekovoda.

Posmatranjem grafičkog prikaza dobijenih rezultata, prikazanih u nastavku, može se donijeti zaključak da se vrijednost amplitude sklopnih prenapona povećava sa povećanjem dužine dalekovoda. Ovaj zaključak je takođe potvrđen u [3], gdje je sprovedeno istraživanje o analizi uticaja pojedinih parametara sistema na oblik i veličinu sklopnih prenapona uzrokovanih uključnjem dalekovoda.

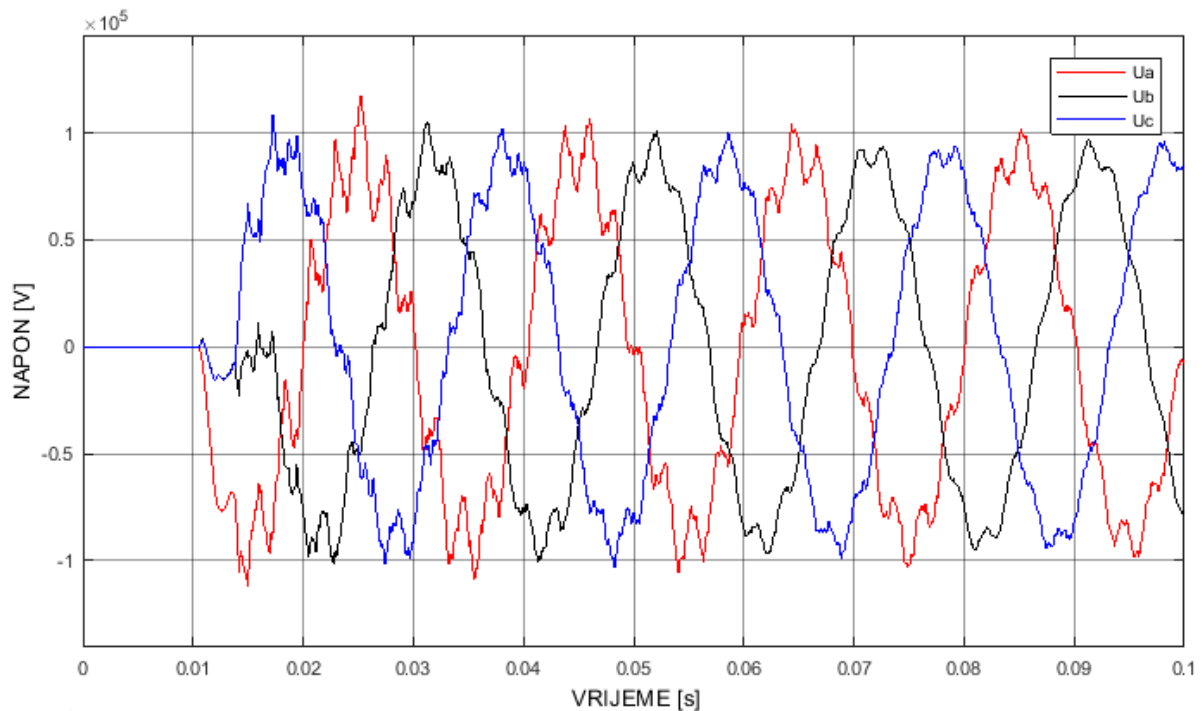
Na graficima prikazanim u nastavku predstavljeni su talasni oblici napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog uključnja dalekovoda u praznom hodu u optimalnim vremenskim trenucima za svaku fazu, pri različitim dužinama dalekovoda od 50km (slika 74.), 100km (slika 75.) i 150km (slika 76.).



Slika 74. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog uključnja dalekovoda u praznom hodu, pri čemu je dužina dalekovoda 50km.



Slika 75. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu, pri čemu je dužina dalekovoda 100km.



Slika 76. Talasni oblik napona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu, pri čemu je dužina dalekovoda 150km.

Vrijednosti koeficijenata sklopnih prenapona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu pri različitim dužinama dalekovoda od

50km, 100km i 150km su prikazane u tabeli 7. Dobijeni rezultati i u ovom slučaju potvrđuju ranije tvrdnje. Naime, sa povećanjem dužine dalekovoda raste i vrijednost koeficijenata sklopnih prenapona. Maksimalna vrijednost koeficijenta sklopnog prenapona je dostignuta u fazi A, za slučaj kontrolisanog uključjenja dalekovoda u praznom hodu pri dužini dalekovoda od 150km i iznosi 1,304.

Tabela 7. Vrijednosti koeficijenata sklopnih prenapona na kraju dalekovoda za slučaj kontrolisanog uključjenja dalekovoda u praznom hodu pri različitim dužinama dalekovoda od 50km, 100km i 150km.

Faza	50km	100km	150km
	$K_p$		
A	1,192	1,284	1,304
B	1,092	1,170	1,172
C	1,156	1,248	1,211

Takođe je potrebno pomenuti još jedan faktor koji utiče na vrijednost amplitude sklopnih prenapona uzrokovanih uključjenjem dalekovoda, a to je vrijednost opterećenja dalekovoda. Kako su u prethodnim poglavljima istraživani sklopni prenaponi za slučaj uključjenja dalekovoda u praznom hodu, nije se moglo govoriti o tim zaključcima, ali će ovaj slučaj biti detaljnije istražen i analiziran u okviru narednog poglavlja gdje će biti sprovedena analiza sklopnih prenapona, uzrokovanih uključjenjem dalekovoda, na primjeru dijela realnog elektroenergetskog sistema, za različite slučajeve opterećenja dalekovoda.

## 7. ANALIZA REZULTATA PRIMJENE OPTIMALNOG ALGORITMA

Razvijeni optimalni algoritam za kontrolisano uključenje i kontrolisano automatsko ponovno uključenje dalekovoda u praznom hodu je predstavljen u okviru prethodnog poglavlja. Dobijenim rezultatima je pokazano da se primjenom tehnike kontrolisanih operacija prekidača, tj. sprovođenjem razvijenog optimalnog algoritma, postiže značajno ograničenje sklopnih prenapona uzrokovanih uključanjem dalekovoda, u oba analizirana slučaja. Kako bi se u potpunosti dokazale prednosti i opravdala primjena razvijenog kontrolera, u okviru ovog poglavlja je sprovedeno istraživanja i simulacija implementacije razvijenog optimalnog algoritma na primjeru dijela realnog elektroenergetskog sistema, tačnije, u okviru jedne trafostanice crnogorskog elektroprenosnog sistema (CGES).

### 7.1. Tehnički podaci CGES-a

Osnovna djelatnost koju obavlja CGES je prenos električne energije u Crnoj Gori preko prenosne mreže na 400kV, 220kV i 110kV naponskom nivou. Takođe, CGES obavlja i funkciju upravljanja sistemom, kao i funkciju održavanja i razvoja prenosne mreže [39].

CGES raspolaže prenosnom mrežom koju čine preko 1300km dalekovoda, kao i 24 trafostanice (TS) naponskih nivoa 400kV, 220kV i 110kV. Ukupna dužina dalekovoda na teritoriji Crne Gore, a koji su vlasništvo i osnovno sredstvo CGES-a je 1305.86km, dok je ukupna snaga transformacije prenosne mreže Crne Gore je 3846.5MVA (sa ukupno 53 transformatorske jedinice) [39]. Na slici 77. [40] je prikazana šema CGES-a, a u tabeli 8. je dat spisak trafostanica CGES-a po naponskim nivoima.

Tabela 8. Trafostanice CGES-a.

Redni broj	Naponski nivo TS	Naziv TS
1.	110/35 kV/kV	Andrijevica
2.	110/35 kV/kV	Bar
3.	110/35 kV/kV	Berane
4.	110/35 kV/kV	Brezna
5.	110/35 kV/kV	Budva
6.	110/35 kV/kV	Cetinje

7.	110/35 kV/kV	Danilovgrad
8.	110/35 kV/kV	Herceg Novi
9.	110/10 kV/kV	Kličevo
10.	110/35 kV/kV	Kotor
11.	400/110/35 kV/kV/kV	Lastva
12.	220/110/35 kV/kV/kV	Mojkovac
13.	110/35 kV/kV	Nikšić
14.	110/35 kV/kV	Pljevlja 1
15.	220/110/35 kV/kV/kV	Podgorica 1
16.	400/110 kV/kV	Podgorica 2
17.	110/10 kV/kV	Podgorica 3
18.	110/10 kV/kV	Podgorica 4
19.	110/10 kV/kV	Podgorica 5
20.	110/35 kV/kV	Ribarevine
21.	110/35 kV/kV	Tivat
22.	110/35 kV/kV	Ulcinj
23.	110/35 kV/kV	Vilusi
24.	110/35 kV/kV	Virpazar

Prenosnu mrežu CGES-a čini 45 dalekovoda [41]:

- Šest dalekovoda naponskog nivoa 400kV ("Podgorica 2 – Ribarevine", "Podgorica 2 – Tirana", "Ribarevine – Pljevlja 2", "Ribarevine – Peć", "Lastva – Trebinje" i "Lastva – Podgorica 2"),
- Osam dalekovoda naponskog nivoa 220kV ("Podgorica 1 - Mojkovac", "Podgorica 1 – Perućica", "Podgorica 1 – Koplík", HE "Perućica – Trebinje", "Piva – Buk Bijela", "Piva – Pljevlja 264", "Piva – Pljevlja 265" i "Mojkovac – Pljevlja 2"),
- Trideset devet dalekovoda 110kV naponskog nivoa od čega su tri dalekovoda dvosistemska (2x110kV), a četiri su u pogonu pod naponom 35kV,
- Dva kabla 110kV naponskog nivoa ("Nikšić - Kličevo" i "Podgorica 3 – Podgorica 5").



Slika 77. Detaljniji prikaz šeme crnogorskog elektroprenosnog sistema.

Iz prenosne mreže električnu energiju, osim distributivnog konzuma, preuzimaju i direktni potrošači, tj. potrošači koji su direktno priključeni na prenosnu mrežu CGES-a [39]:

- Željeznička infrastruktura Crne Gore AD Podgorica,
- Kombinat Aluminijskog "Podgorica" i
- Željezara "Nikšić".

U transformatorskim stanicama CGES-a primjenjuju se različiti tipovi prekidača: HPGE 11/14, HPGE 11/15, HPGE 11A/15, PS1231, VPS 123 2/2F, VPS 245 2/4F, koji pripadaju grupi maloulnjnih prekidača snage [16]. Pored prethodno pomenutih koriste se i prekidači u SF<sub>6</sub> izvedbi, tj. prekidači tipa: LTB, 3AP1, SFE, SFEL [16]. Na slici 78. i slici 79. prikazani su neki od prethodno pomenutih tipova prekidača [16].



Slika 78. Prekidač HPGE 11/15



Slika 79. Prekidač LTB 145 D1/B

## **7.2. Simulacija primjene razvijenog kontrolera na primjeru dalekovodnog polja 110kV u TS 400/110kV „Podgorica 2“**

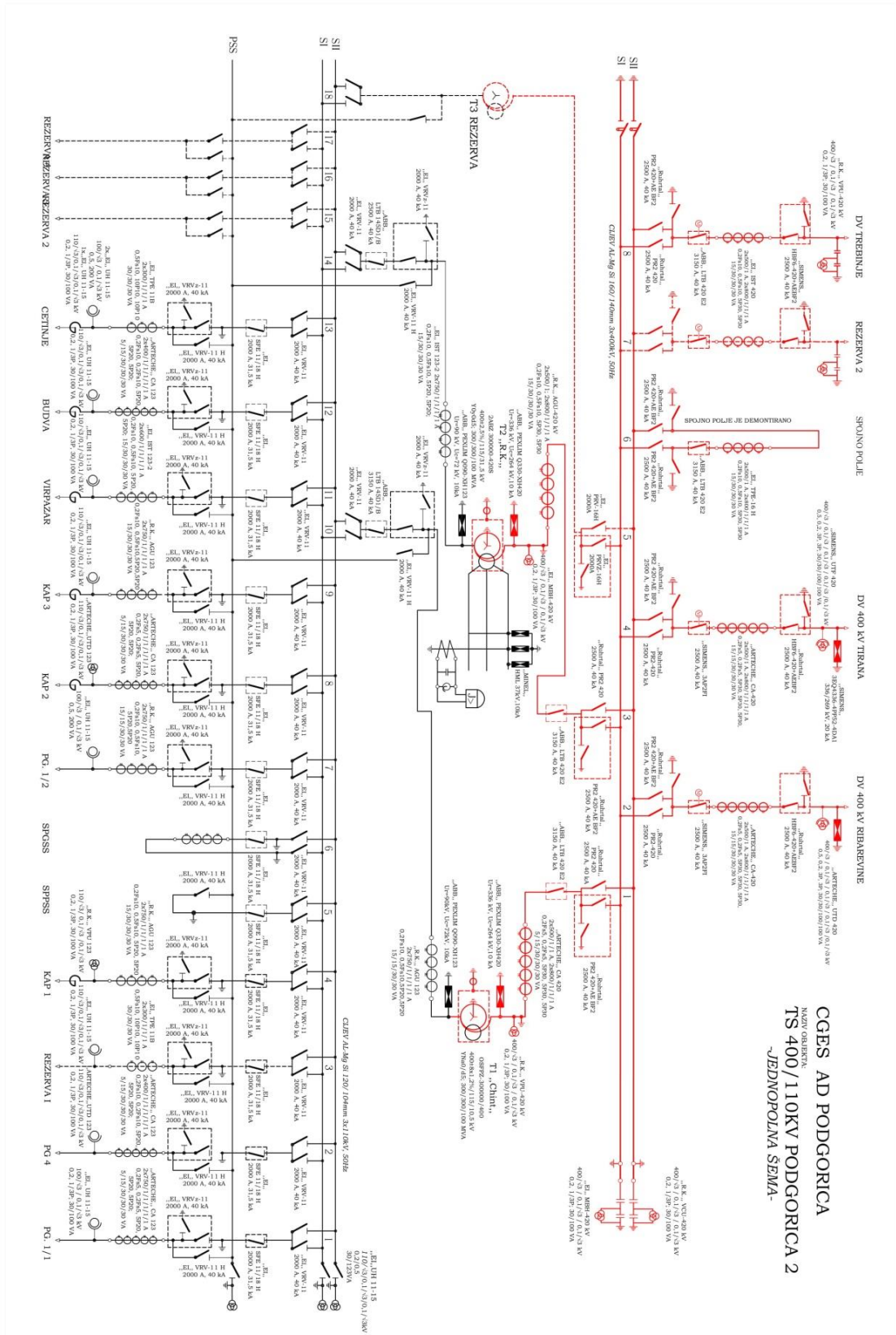
U cilju provjere performansi razvijenog algoritma i kontrolera za napredno upravljanje prekidačima izvršena je simulacija uključivanja dalekovoda 110kV u TS 400/110kV „Podgorica 2“ koja pripada CGES-u.

### **7.2.1. Tehnički podaci TS 400/110kV „Podgorica 2“**

U okviru CGES-a postoje dvije transformatorske stanice naponskog nivoa 400/110 kV/kV : TS Podgorica 2 i TS Lastva. U ovom radu istraživanje je sprovedeno na primjeru TS 400/110kV „Podgorica 2“. U nastavku će biti prikazani tehnički podaci TS 400/110kV „Podgorica 2“: jednopolna šema, podaci o broju i dužinama priključenih dalekovoda, podaci o parametrima transformatora itd.

Na slici 80. je prikazana jednopolna šema TS 400/110kV „Podgorica 2“.





Slika 80. Jednopolna šema TS 400/110kV „Podgorica 2“.

Posmatranjem jednogpolne šeme sa slike 80. može se vidjeti da postoje tri 400kV dalekovoda koja ulaze u TS 400/110kV „Podgorica 2“. Sva tri dalekovoda su istog poprečnog presjeka Al/Fe 490/67 mm<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>, a u tabeli 9. su prikazane njihove dužine.

Tabela 9. Dužine 400kV dalekovoda koji ulaze u TS 400/110kV „Podgorica 2“.

Naziv 400kV dalekovoda	Dužina 400 kV dalekovoda [km]
DV Podgorica 2 - Ribarevine	84,7
DV Podgorica 2 - Lastva	64
DV Podgorica 2 - Tirana	156

Za razliku od 400kV dalekovoda koji su svi istog poprečnog presjeka, 110kV dalekovodi koji izlaze iz TS 400/110kV „Podgorica 2“ u zavisnosti od njihovog poprečnog presjeka je moguće podijeliti u dvije grupe. Prvu grupu čini sedam 110kV dalekovoda sa Al/Fe provodnikom, čiji je poprečni presjek 240/40 mm<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>, njihove dužine su prikazane u tabeli 10.

Tabela 10. Dužine 110kV dalekovoda poprečnog presjeka provodnika Al/Fe 240/40 mm<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>.

Naziv 110kV dalekovoda	Dužina 110kV dalekovoda [km]
DV Podgorica 2 – Podgorica 1 I	5,8
DV Podgorica 2 – Podgorica 1 II	5,9
DV Podgorica 2 – Podgorica 5	11,7
DV Podgorica 2 – KAP II	8
DV Podgorica 2 – KAP III	8,1
DV Podgorica 2 – Podgorica 4	3,5
DV Podgorica 2 – Cetinje	31,7

Drugu grupu 110kV dalekovoda čine dva 110kV dalekovoda sa Al/Fe provodnikom, čiji je poprečni presjek 150/25 mm<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>, njihove dužine su prikazane u tabeli 11.

Tabela 11. Dužine 110kV dalekovoda poprečnog presjeka provodnika Al/Fe 150/25 mm<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>.

Naziv 110kV dalekovoda	Dužina 110kV dalekovoda [km]
DV Podgorica 2 - Virpazar	30
DV Podgorica 2 – Budva	36

U TS 400/110kV „Podgorica 2“ su dva transformatora instalisane snage od 300 MVA.

### 7.2.2. Proračun parametara elemenata TS 400/110kV „Podgorica 2“

Da bi se mogao sprovesti proračun strujnih i naponskih prilika pri nastanku sklopnih prenapona uzrokovanih uključanjem dalekovoda u CGES-u, tj. posmatranoj TS 400/110kV „Podgorica 2“, neophodno je modelovati elemente TS 400/110kV „Podgorica 2“ u okviru programskog paketa Matlab-a (moduo Simulink).

Na osnovu raspoloživih tehničkih podataka TS 400/110kV „Podgorica 2“, koji su predstavljeni u prethodnom poglavlju, neophodno je proračunati odgovarajuće parametre jake mreže, transformatora i dalekovoda, u cilju modelovanja odgovarajućih elemenata TS 400/110kV „Podgorica 2“.

#### 7.2.2.1. Proračun parametara jake mreže

Parametri koji su neophodni za modelovanje jake mreže su: napon, snaga trolnog kratkog spoja, kao i odnos induktivnosti i otpornosti.

Napon je 400kV.

Snaga trolnog kratkog spoja se može izračunati primjenom sledećeg izraza:

$$S_{3KS} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{3KS} \quad (25)$$

gdje je:

U – napon (V),

$I_{3KS}$  – struja trolnog kratkog spoja subtranzijentnog perioda (A).

Ukupna struja trolnog kratkog spoja subtranzijentnog perioda na naponskom nivou 400kV u TS 400/110kV „Podgorica 2“, za 2019. godinu je data u tabeli 12. i iznosi 12401,5A [42].

Sada kada su poznati svi neophodni podaci, može se izračunati i snaga trolnog kratkog spoja:

$$S_{3KS} = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 10^3 \cdot 12,4015 \cdot 10^3 = 8581,838\text{MVA} \quad (26)$$

Tabela 12. Vrijednosti struje tropolnog kratkog spoja u TS 400/110kV „Podgorica 2“ na naponskom nivou 400kV.

Kratki spoj u čvoru	Godina	Doprinos Čvor / element	Tropolni kratki spoj					
			Subtranzijentni		Tranzijentni		Ustaljeni	
			$I_A = I_e$ [A]	$\theta''_A$ [deg]	$I_A = I_e$ [A]	$\theta'_A$ [deg]	$I_A = I_e$ [A]	$\theta_A$ [deg]
Podgorica 2, 400 kV	2019	Tirana (AL)	3.279,70	-84,87	3.181,50	-84,93	2.759,90	-84,98
		Trebinje (BA)	3.613,70	-85,30	3.447,80	-85,36	2.837,80	-85,14
		Ribarevine	3.758,90	-85,15	3.623,20	-85,17	3.053,60	-85,05
		T 1 400/110	872,40	-82,65	819,30	-82,69	585,70	-82,15
		T2 400/110	878,40	-82,52	824,90	-82,56	589,70	-82,02
		Ukupno	12.401,50	-84,76	11.895,30	-84,81	9.625,30	-84,69

Odnos induktivnosti i otpornosti X/R se može izračunati primjenom sledećeg izraza:

$$1,8 = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3R}{X}} \quad (27)$$

gdje je:

R – ekvivalentna otpornost jake mreže ( $\Omega$ ),

X – ekvivalentna induktivnost jake mreže ( $\Omega$ ).

Rješavanjem izraza (27) po nepoznatoj promjenljivoj X/R, dobija se da je vrijednost odnosa induktivnosti i otpornosti:

$$\frac{X}{R} = 13,16 \quad (28)$$

Nakon određivanja svih neophodnih parametara može se modelovati jaka mreža u modelu TS 400/110kV „Podgorica 2“, odgovarajućim objektom.

### 7.2.2.2. Parametri transformatora

U tabeli 13. su date karakteristike oba transformatora u TS 400/110kV „Podgorica 2“, a u tabeli 14. su dati svi neophodni parametri za modelovanje oba trafo-a odgovarajućim objektima, u modelu TS 400/110kV „Podgorica 2“.

Tabela 13. Karakteristike trafo-a u TS 400/110kV „Podgorica 2“.

NAZIV TS	Prenosni odnos (kV/kV)	Redni broj transform.	Nominalna snaga (MVA)	Step. regul. (+/-) %	Sprega transformat.	Proizvđač transform.	Godina		Serijski broj
							proizvodnje	ugradnje	
Podgorica 2	400/115/31.5	T1	300	5	YNaOd5	Rade Končar	1981	1984	319027
		T2	300	5	YNaOd5	Rade Končar	1982	1984	319038

Tabela 14. Parametri trafo-a u TS 400/110kV „Podgorica 2“.

NAZIV TS	Redni broj transform.	uk 1-2	uk 1-3	uk 2-3	$P_{fe}$	$P_{cu}$	R	X	$I_{n1}$	$I_{n2}$	$I_{n3}$
		(%)	(%)	(%)	(kW)	(kW)	( $\Omega$ )	( $\Omega$ )	(A)	(A)	(A)
Podgorica 2	T1	12.25	14	9.3	129.70	619.10	1.10	65.33	433	1056	1058
	T2	12.15	13.81	9.18	128.75	608.60	1.08	64.8	433	1506	1058

### 7.2.2.3. Proračun parametara 110kV dalekovoda

Na osnovu konstrukcionih podataka Al/Fe provodnika iz kataloga nadzemnih vodova za odgovarajuće tipove i poprečne presjeka provodnika 110kV dalekovoda iz TS 400/110kV „Podgorica 2“ prikazanih u tabeli 15. [43] i konstrukcionih podataka o zaštitnom užetu datih u tabeli 16. [44], proračunati su odgovarajući parametri svih 110 kV dalekovoda iz TS 400/110kV „Podgorica 2“.

Tabela 15. Konstrukcioni podaci Al/Fe provodnika.

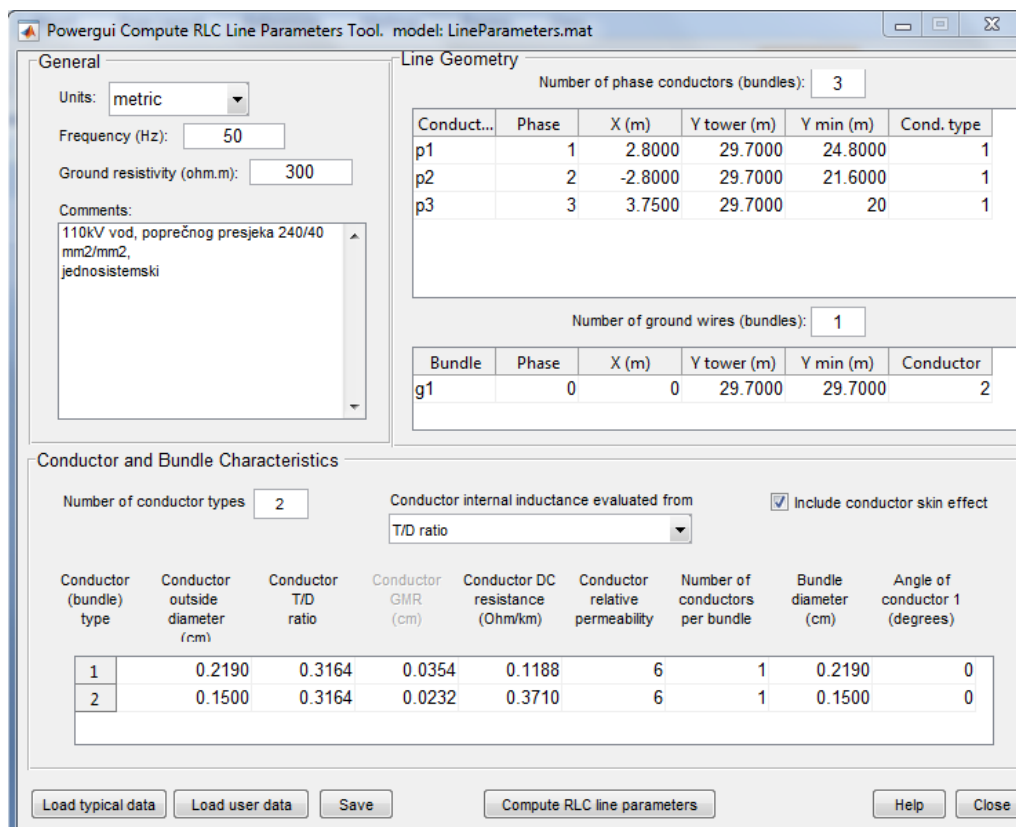
Nazivni presjek	Broj x prečnik žice		Prečnik	Modul elast	Koef linearnog širenja	Težina	Računska sila kidanja, min	Računski el otpor pri 20°C, max
	aluminijum	čelik						
	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]						
150/25	26 x 2,70	7 x 2,10	17,1	75 500	1,89	605	55, 250	0,19390
240/40	26 x 3,45	7 x 2,68	21,9	75 500	1,89	987	86, 460	0,11880

Tabela 16. Konstrukcioni podaci zaštitnog užeta.

Površina poprečnog presjeka	Prečnik	Računska sila kidanja	Modul elastičnosti	Podužna otpornost
[mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[daN]	[daN/mm <sup>2</sup> ]	[ $\Omega$ /km]
116,40	15,00	8000	9560	0,371

Na osnovu prethodno prikazanih podataka, proračunati su parametri svih 110kV dalekovoda pomoću matematičkog paketa MATLAB-a. Potrebno je naglasiti da su parametri dalekovoda određeni za rastojanja i geometriju stubova koji su najčešće zastupljeni na trasama pojedinih dalekovoda.

110kV dalekovode, koji izlaze iz TS 400/110kV „Podgorica 2“, je prema poprečnom presjeku i broju provodnika po fazi moguće podijeliti u tri grupe. Prvu grupu čine jednosistemske 110kV dalekovodi, poprečnog presjeka provodnika Al/Fe 240/40 mm<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>, a interfejs ugrađenog potprograma u MATLAB-u za proračun njihovih parametara je predstavljen na slici 81.



Slika 81. Proračun parametara jednosistenskog 110kV dalekovoda, poprečnog presjeka provodnika Al/Fe 240/40 mm<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>.

Prvoj grupi pripadaju sledeći 110kV dalekovodi iz TS 400/110kV „Podgorica 2“:

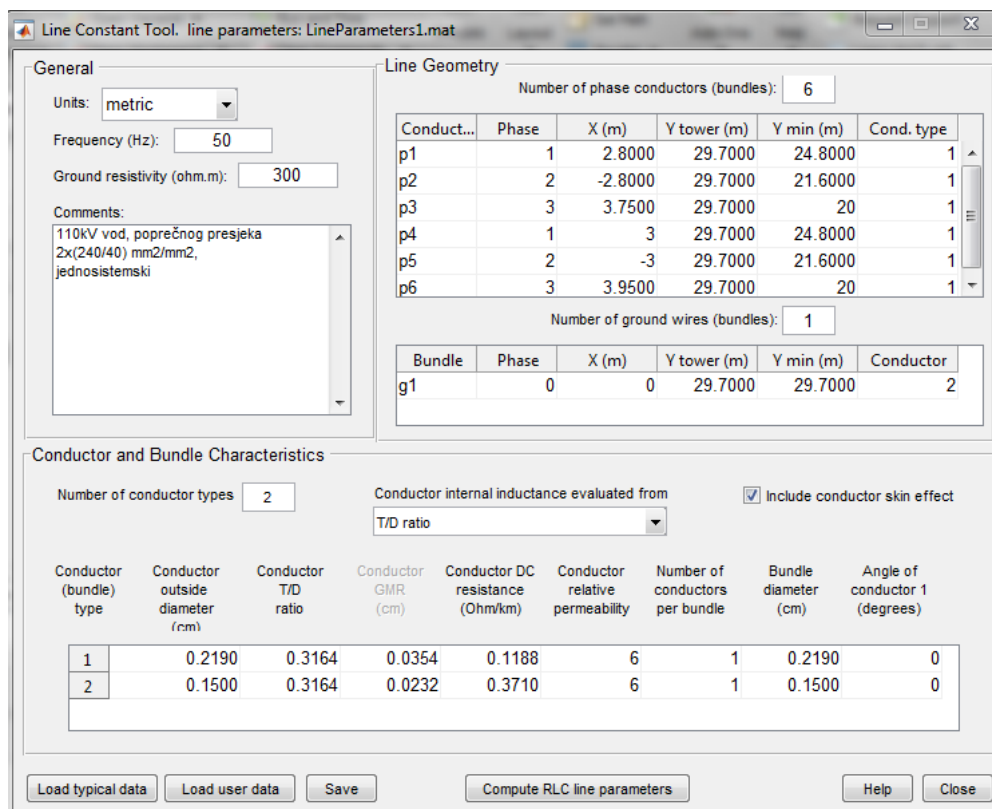
1. DV Podgorica 2 – Podgorica 1 I,
2. DV Podgorica 2 – Podgorica 1 II,
3. DV Podgorica 2 – Podgorica 5,
4. DV Podgorica 2 – Podgorica 4,
5. DV Podgorica 2 – Cetinje.

Proračunati parametri prethodno pomenutih 110kV dalekovoda, koji pripadaju prvoj grupi dalekovoda, su predstavljani u tabeli 17.

Tabela 17. Parametri jednosistenskog 110kV dalekovoda, poprečnog presjeka provodnika Al/Fe 240/40 mm<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>.

Parametar	Vrijednost	Jedinica
R <sub>1</sub>	0,13123	[Ω/km]
R <sub>0</sub>	0,32312	[Ω/km]
L <sub>1</sub>	0,001914	[H/km]
L <sub>0</sub>	0,0042566	[H/km]
C <sub>1</sub>	6,6175·10 <sup>-9</sup>	[F/km]
C <sub>0</sub>	3,9969·10 <sup>-9</sup>	[F/km]

Drugoj grupi 110kV dalekovoda pripadaju jednosistemski 110kV dalekovodi sa dva provodnika po fazi, poprečnog presjeka provodnika Al/Fe 2x(240/40) mm<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>, a interfejs ugrađenog potprograma u MATLAB-u za proračun njihovih parametara je predstavljen na slici 82.



Slika 82. Proračun parametara jednosistemskog 110kV dalekovoda, poprečnog presjeka provodnika Al/Fe 2x(240/40) mm<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>.

Drugoj grupi pripadaju sledeći 110kV dalekovodi iz TS 400/110kV „Podgorica 2“:

1. DV Podgorica 2 – KAP II,
2. DV Podgorica 2 – KAP III.

Proračunati parametri prethodno pomenutih 110kV dalekovoda, koji pripadaju drugoj grupi dalekovoda, su predstavljeni u tabeli 18.

Tabela 18. Parametri jednosistemskog 110kV dalekovoda, poprečnog presjeka provodnika Al/Fe 2x(240/40) mm<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>.

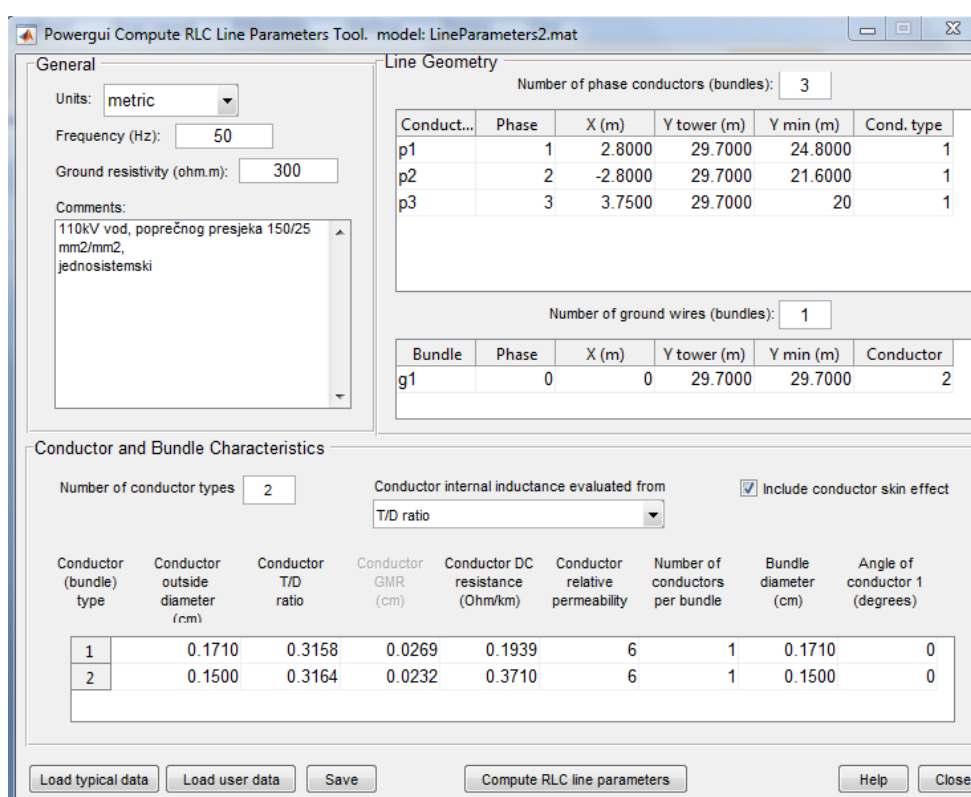
Parametar	Vrijednost	Jedinica
R <sub>1</sub>	0,065672	[Ω/km]
R <sub>0</sub>	0,25723	[Ω/km]
L <sub>1</sub>	0,0012845	[H/km]
L <sub>0</sub>	0,0036188	[H/km]

$C_1$	$9,5758 \cdot 10^{-9}$	[F/km]
$C_0$	$4,9312 \cdot 10^{-9}$	[F/km]

Treću grupu 110kV dalekovoda čine jednosistemski 110kV dalekovodi, poprečnog presjeka provodnika Al/Fe 150/25 mm<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>, a interfejs ugrađenog potprograma u MATLAB-u za proračun njihovih parametara je predstavljen na slici 83.

Trećoj grupi pripadaju sledeći 110kV dalekovodi iz TS 400/110kV „Podgorica 2“:

1. DV Podgorica 2 – Virpazar,
2. DV Podgorica 2 – Budva.



Slika 83. Proračun parametara jednosistemskog 110kV dalekovoda, poprečnog presjeka provodnika Al/Fe 150/25 mm<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>.

Proračunati parametri 110kV dalekovoda, koji pripadaju trećoj grupi dalekovoda, su predstavljeni u tabeli 19.

Tabela 19. Parametri jednosistemskog 110kV dalekovoda, poprečnog presjeka provodnika Al/Fe 150/25 mm<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>.

Parametar	Vrijednost	Jedinica
$R_1$	0,20186	[Ω/km]
$R_0$	0,39374	[Ω/km]

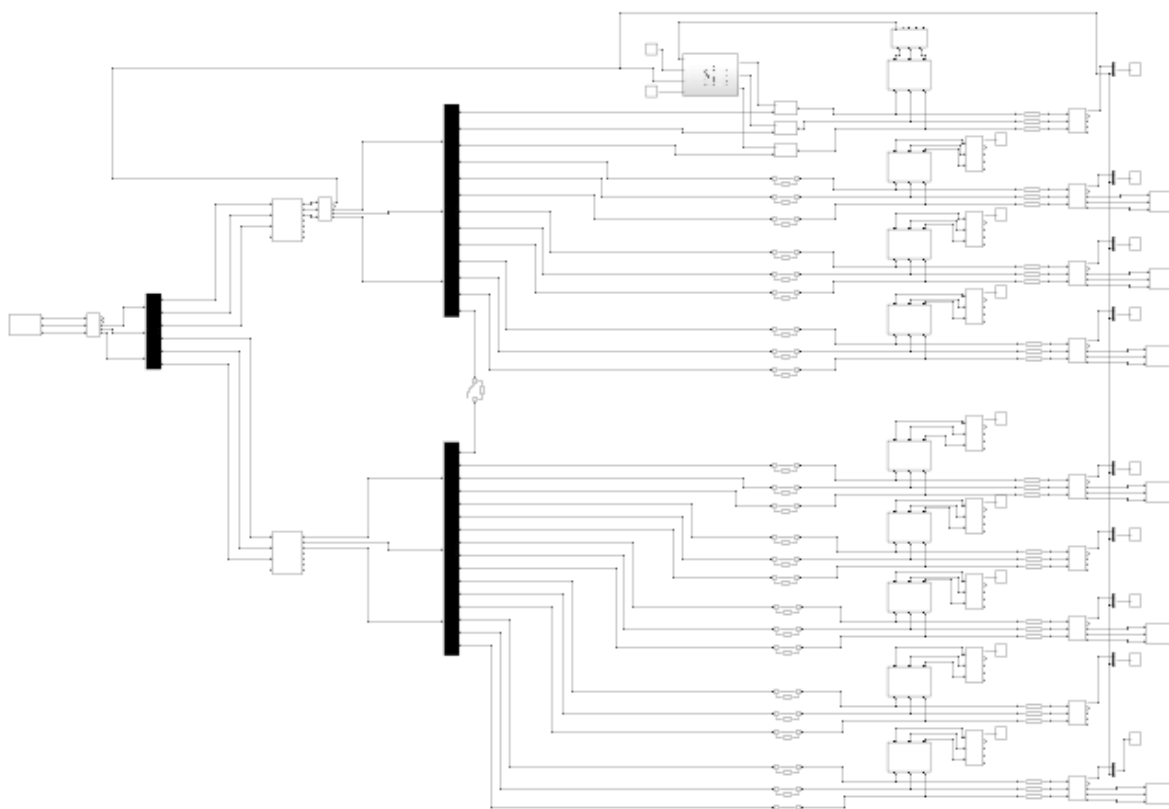


$L_1$	0,0019693	[H/km]
$L_0$	0,0043119	[H/km]
$C_1$	$6,4278 \cdot 10^{-9}$	[F/km]
$C_0$	$3,927 \cdot 10^{-9}$	[F/km]

Nakon određivanja svih neophodnih parametara mogu se modelovati svi 110kV dalekovodi u modelu TS 400/110kV „Podgorica 2“, odgovarajućim objektima.

### 7.2.3. Model TS 400/110kV „Podgorica 2“

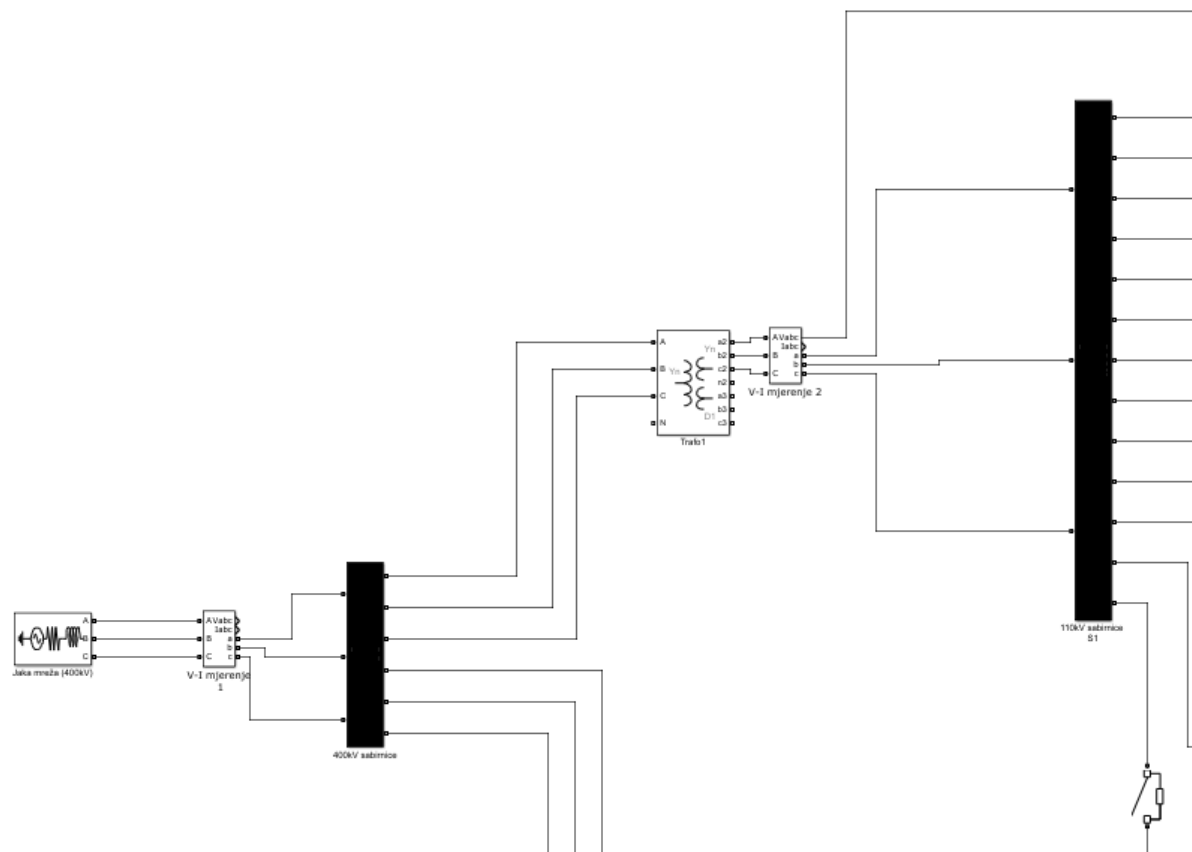
Nakon proračuna svih neophodnih parametara, svi elementi TS 400/110kV „Podgorica 2“ se modeluju odgovarajućim objektima u matematičkom paketu MATLAB-u (moduo Simulnk). Da bi se dobio model TS 400/110kV „Podgorica 2“ neophodno je prethodno pomenute objekte povezati u jednu cjelinu. Na slici 84. dat je prikaz modela TS 400/110kV „Podgorica 2“.



Slika 84. Prikaz modela TS 400/110kV „Podgorica 2“.

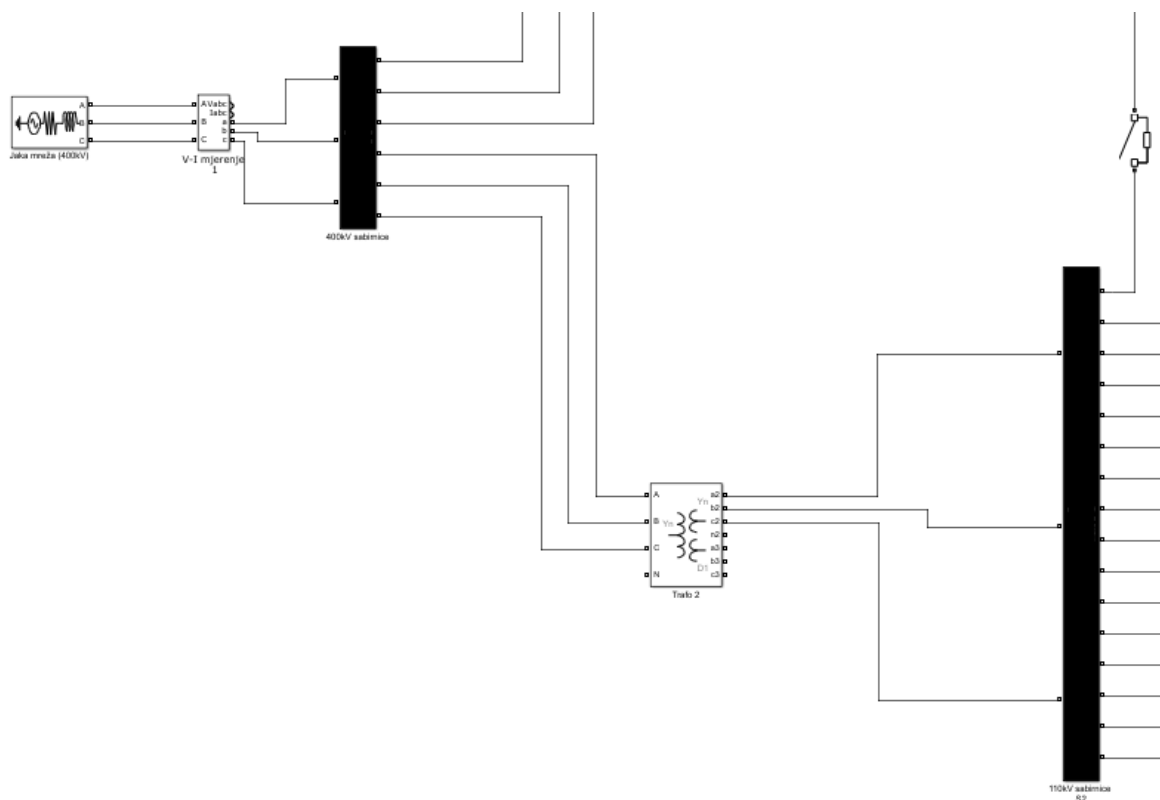
Zbog složenosti samog modela na prethodno prikazanoj slici 84., gdje je prikazan u cjelosti model TS 400/110kV „Podgorica 2“, ne mogu se jasno uočiti svi elementi TS 400/110kV „Podgorica 2“. Stoga će u nastavku biti dat uvećani prikaz modela iz više djelova, na nekoliko slika.

Na slici 85. dat je prikaz objekata kojima su modelovani: jaka mreža, transformator 1, sabirnice 400kV, sistem sabirnica 1 110kV, kao i objekti kojima su modelovana mjerenje napona i struje, tj. naponski i strujni mjerni transformatori, pri čemu se objekat *V-I mjerenje 1* odnosi na mjerenja napona i struje jake mreže, a *V-I mjerenje 2* predstavlja mjerenja napona i struje transformatora 1.



Slika 85. Detaljniji prikaz modela jake mreže i transformatora 1.

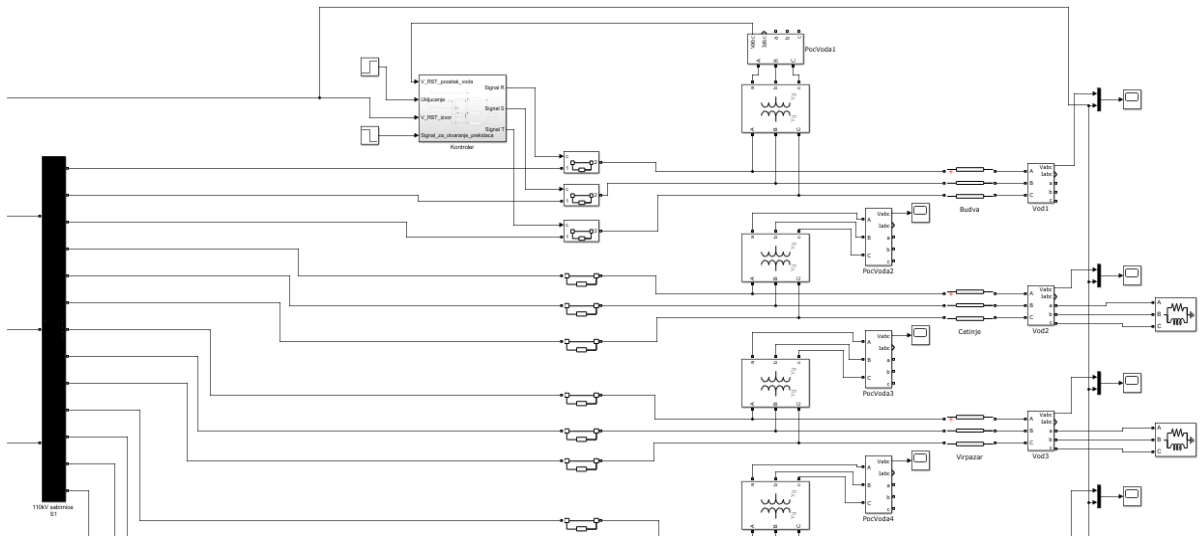
Na slici 86. dat je prikaz objekata kojima su modelovani: jaka mreža, transformator 2, sabirnice 400kV, sistem sabirnica 2 110kV.



Slika 86. Detaljniji prikaz modela jake mreže i transformatora 2.

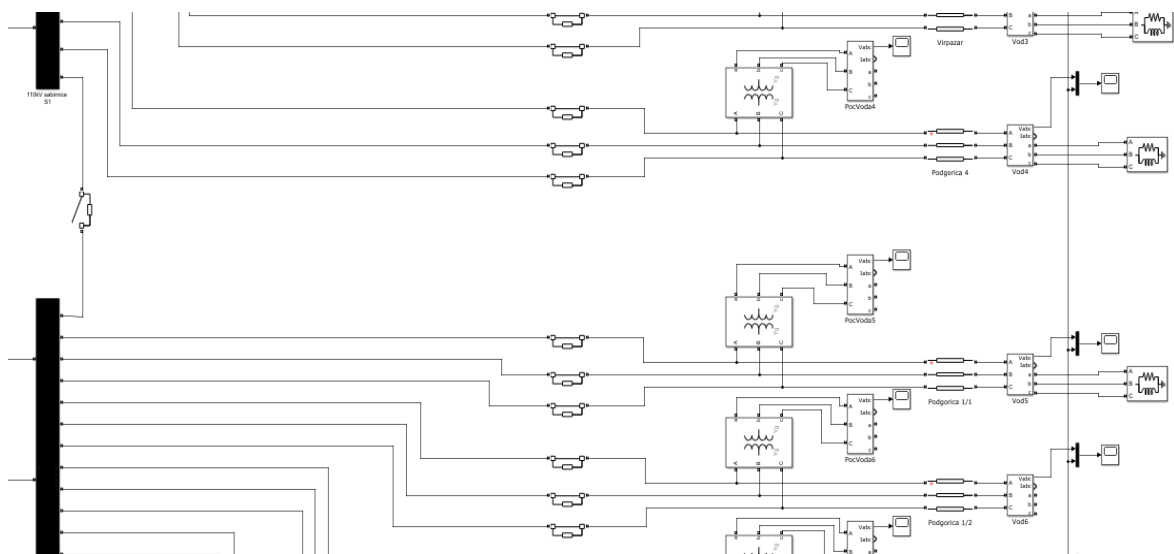
Što se tiče dalekovodnih polja, u svakom od njih su odgovarajućim objektima modelovani sledeći elementi TS 400/110kV „Podgorica 2“: jednopolni prekidači, naponski mjerni transformator, dalekovod, kao i objekti kojima su modelovana mjerenje napona i struje na početku i na kraju svakog dalekovoda. Takođe, u svim dalekovodnim poljima postoji još jedan dodatni objekat na kojem se mogu vidjeti talasni oblici napona napajanja, tj. jake mreže, kao i dobijeni talasni oblici napona na kraju dalekovoda, na zajedničkom grafiku. Osim toga, samo u dalekovodnom polju Budva postoji i objekat kojim je modelovan kontroler, i ovaj dalekovod je u praznom hodu. Pored DV Podgorica 2 – Budva, u praznom hodu su i sledeći dalekovodi: DV Podgorica 2 – Podgorica 1 II i DV Podgorica 2 – Kap II, odnosno, pretpostavljeno je da se Kombinat aluminijuma napaja preko samo jednog dalekovoda. Svi ostali dalekovodi su opterećeni, pa se u njihovim dalekovodnim poljima nalazi i objekat kojim je modelovano odgovarajuće opterećenje svakog od njih. Uvećani prikaz svih dalekovodnih polja biće dat na nekoliko slika u nastavku.

Na slici 87. dat je prikaz sledećih dalekovodnih polja, koja su priključena na 110kV sekciju sabirnica 1: Budva, Cetinje i Virpazar.



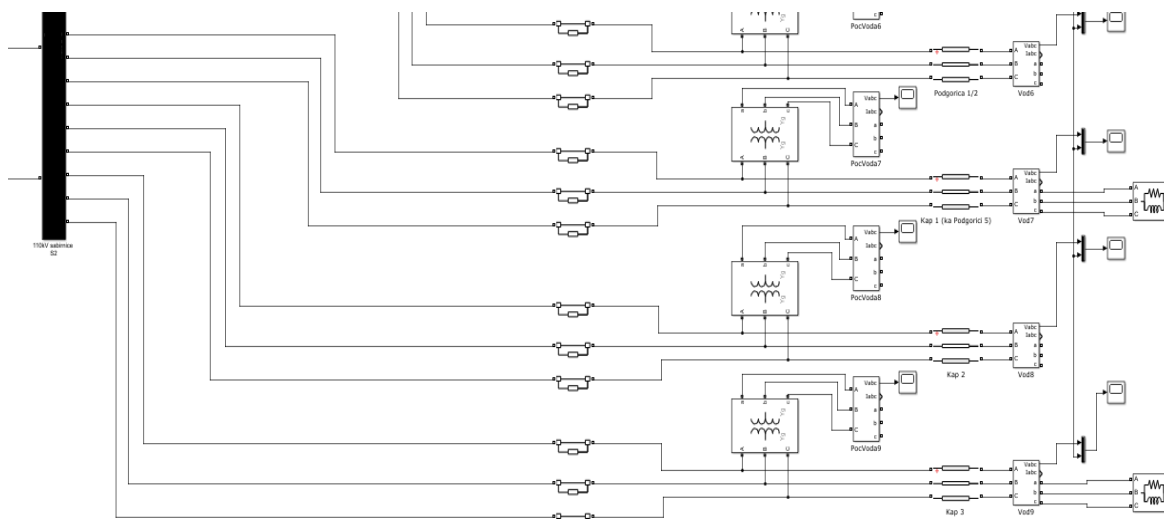
Slika 87. Prikaz dijela dalekovodnih polja koja su priključena na 110kV sekciju sabirnica 1.

Na slici 88. dat je prikaz sledećih dalekovodnih polja: Podgorica 4, priključena na 110kV sekciju sabirnica 1, Podgorica 1 I i Podgorica 1 II priključenih na 110kV sekciju sabirnica 2.



Slika 88. Prikaz dijela dalekovodnih polja koja su priključena na 110kV sekciju sabirnica 1 i 110kV sekciju sabirnica 2.

Na slici 89. dat je prikaz preostalih dalekovodnih polja koja su priključena na 110kV sekciju sabirnica 2: Podgorica 5, Kap 2 i Kap 3.



Slika 89. Prikaz dijela dalekovodnih polja koja su priključena na 110kV sekciju sabirnica 2.

#### 7.2.4. Proračun i analiza sklopnih prenapona

Mogućnosti i performanse kontrolisanog uključivanja prekidača u TS 400/110kV „Podgorica 2“ ilustrovane su za slučaj uključivanja prekidača u 110kV dalekovodnom polju Budva. Naime, kako je to prethodno i pomenuto, kontroler je implementiran samo u 110kV dalekovodnom polju Budva, dok su u ostalim 110kV dalekovodnim poljima sve operacije uključivanja jednopolnih prekidača nekontrolisane, tj. ovi prekidači se uključuju u proizvoljno odabranim vremenskim trenucima.

U sprovedenom istraživanju, kao i u slučaju sprovedenog istraživanja na primjeru jednostavnog elektroenergetskog sistema, razmatrana su i analizirana dva karakteristična slučaja uključivanja 110kV dalekovoda Podgorica 2 – Budva:

1. Slučaj uključivanja 110kV dalekovoda Podgorica 2 – Budva u praznom hod,
2. Slučaj automatskog ponovnog uključivanja 110kV dalekovoda Podgorica 2 – Budva u praznom hod.

pri čemu je u oba slučaja analizirano samo kontrolisano uključivanje jednopolnih prekidača u 110kV dalekovodnom polju Budva, primjenom tehnike kontrolisanih operacija prekidača.

Kako je i ranije objašnjeno, prvi slučaj karakteriše duga beznaponska pauza dalekovoda, tj. pretpostavlja se da je dalekovod bio dovoljno dugo izolovan sa sistema i da ne sadrži zaostalo naelektrisanje, dok je u drugom slučaju dalekovod bio u kratkoj beznaponskoj pauzi pa samim tim na njemu, u vremenskom trenutku uključivanja prekidača, postoji određena vrijednost zaostalog naelektrisanja.

#### 7.2.4.1. Slučaj kontrolisanog uključanja 110kV dalekovoda Podgorica 2 – Budva

U početnom položaju sva tri jednopolna prekidača u 110kV dalekovodnom polju Budva su isključena, dok su svi jednopolni prekidači u ostalim dalekovodnim poljima u početnom položaju uključeni, tj. svi ostali dalekovodi su pod naponom. Osim dalekovoda: Podgorica 2 – Budva, Podgorica 2 – Podgorica 1 II i Podgorica 2 – Kap 2, koji su u praznom hodu, svi ostali dalekovodi su opterećeni. Njihova odgovarajuća opterećenja, kako aktivna, tako i reaktivna, su upisana u odgovarajuće objekte kojima su modelovana.

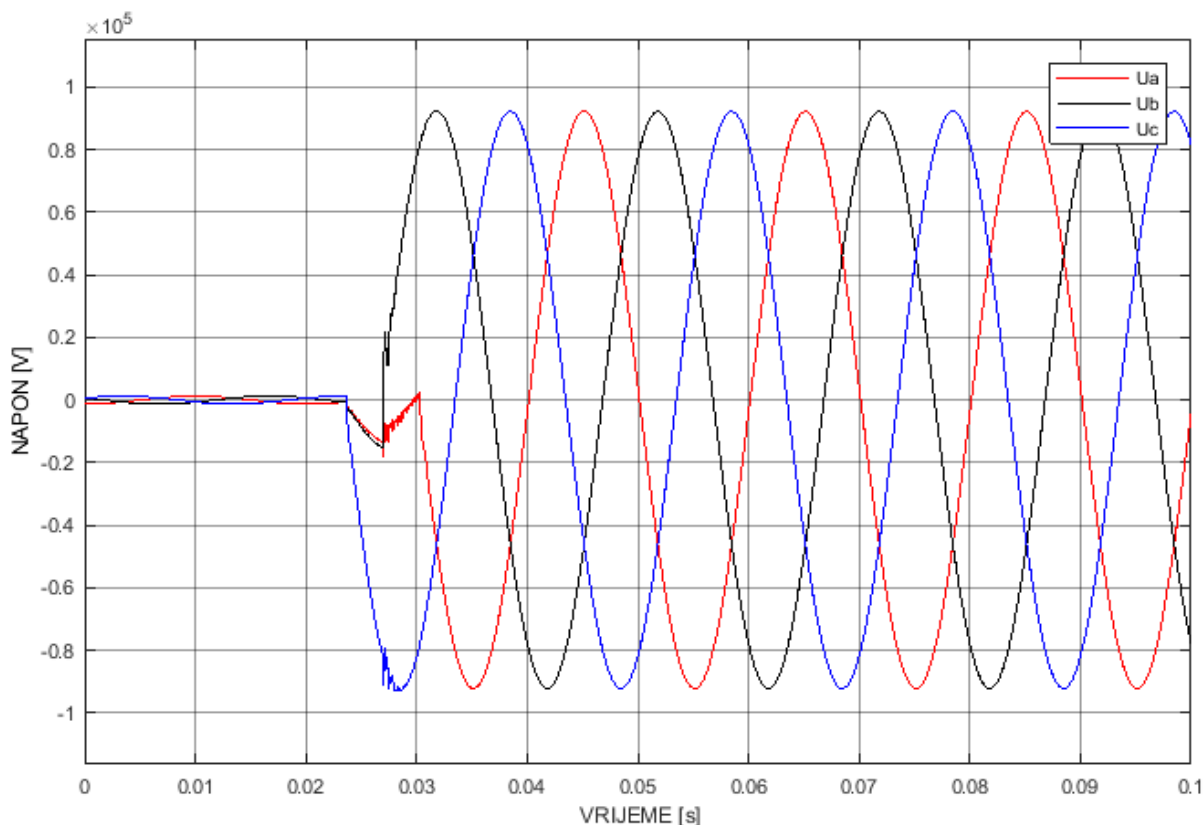
Na osnovu jednogminutnih dijagrama opterećenja 110kV dalekovoda iz TS 400/110kV „Podgorica 2“, za posmatrani period 01.10.2020.g. – 07.10.2020.g. , proračunate su srednje vrijednosti aktivnih i reaktivnih opterećenja odgovarajućih opterećenih dalekovoda u modelu TS 400/110kV „Podgorica 2“, i ona su prikazana u tabeli 20.

Tabela 20. Srednje vrijednosti opterećenja 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“.

Naziv 110kV dalekovoda	$P_{sr}$ [MW]	$Q_{sr}$ [MVar]
DV Podgorica 2 – Cetinje	15,83	5,85
DV Podgorica 2 - Virpazar	14,13	7,69
DV Podgorica 2 – Podgorica 4	19,99	2,97
DV Podgorica 2 – Podgorica 1 I	46,76	5,9
DV Podgorica 2 – Podgorica 5	3,98	0,65
DV Podgorica 2 – KAP III	65,17	44,26

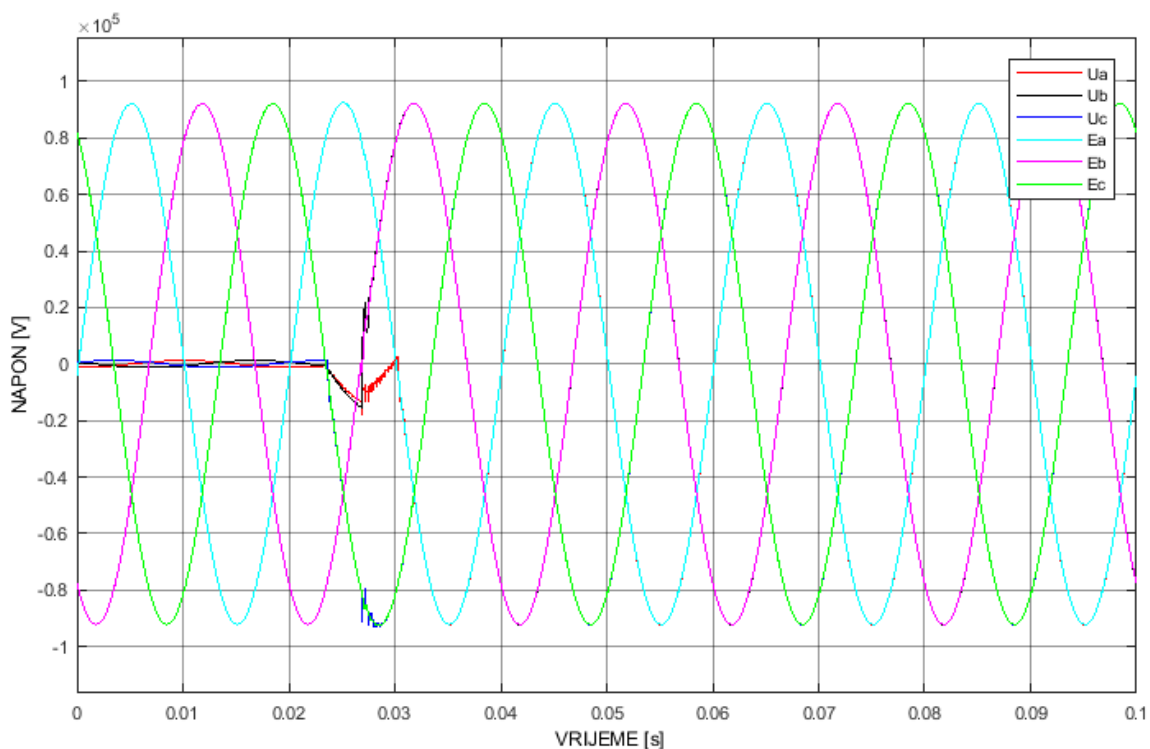
Kako se 110kV dalekovod Podgorica 2 – Budva uključuje nakon duže beznaponske pauze, pretpostavljeno je da na njemu u vremenskom trenutku uključanja prekidača ne postoji zaostalo naelektrisanje, što ujedno predstavlja i najjednostavniji i najmanje zahtjevan slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda. Da bi odredio optimalne vremenske trenutke uključanja prekidača, kontroleru su neophodni referentni naponski signali napona napajanja, tj. jake mreže i napona sa početka DV Podgorica 2 – Budva, koje dobija od *V-I mjerenje 2* (slika 85.) i *V-I mjerenja PocVoda1* (slika 87.), respektivno. Nakon prikupljanja referentnih naponskih signala kontroler sprovodi optimalni algoritam za kontrolisano uključanje dalekovoda u praznom hodu, i kao rezultat dobija optimalne vremenske trenutke uključanja prekidača za svaku fazu.

Na slici 90. je dat grafički prikaz talasnog oblika napona na kraju dalekovoda dobijen pokretanjem simulacije kontrolisanog uključanja 110kV DV Podgorica 2 – Budva u praznom hodu.



Slika 90. Talasni oblik napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog uključjenja dalekovoda u praznom hodu.

Operater u trafostanici je poslao komandu za uključenje prekidača u 21ms nakon pokretanja simulacije, čime je kontroler primio eksternu komandu za uključenje prekidača. Kontroler je odredio optimalne vremenske trenutke uključjenja za svaku fazu, koji odgovaraju vremenskim trenucima prolaska kroz nulu određenog referentnog naponskog signala napajanja, tj. jake mreže i prosljedio komande za uključenje odgovarajućim jednopolnim prekidačima. Na slici 91. su na zajedničkom grafiku prikazani talasni oblici napona napajanja, tj. jake mreže, kao i dobijeni talasni oblici napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 – Budva.



Slika 91. Talasni oblik napona napajanja, tj. jake mreže i napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog uključivanja dalekovoda u praznom hodu.

Kao što se može vidjeti sa slike 91. kontroler je nakon vremenskog trenutka 21ms, kada je izdata eksterna komanda za uključenje, odredio prve optimalne vremenske trenutke uključnje pojedinih faza i poslao ih odgovarajućim prekidačima, tako da su prekidači uključeni u optimalnim vremenskim trenucima koji odgovaraju trenucima prolaska kroz nulu određenog referentnog naponskog signala napona napajanja, tj. jake mreže.

Može se donijeti zaključak da je primjenom optimalnog algoritma kontrolisanog uključnja dalekovoda u praznom hodu na primjeru kontrolisanog uključnja 110kV DV Podgorica 2 – Budva u TS 400/110kV „Podgorica 2“, spriječena pojava sklopnih prenapona. Samim tim opravdana je primjena tehnike kontrolisanih operacija prekidača u crnogorskom elektroenergetskom sistemu.

#### 7.2.4.2. Slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključnja dalekovoda Podgorica 2 – Budva

Tehnika kontrolisanih operacija prekidača je primjenjena i u slučaju kontrolisanog automatskog ponovnog uključnja 110kV dalekovoda Podgorica 2 – Budva u praznom hodu, sa ciljem sprječavanja pojave neželjenih sklopnih prenapona.

U ovom slučaju, sva tri jednopolna prekidača u 110kV dalekovodnom polju Budva su u početnom položaju uključena, kao i svi jednopolni prekidači u ostalim dalekovodnim poljima. I ovdje su dalekovodi: Podgorica 2 – Budva, Podgorica 2 – Podgorica 1 II i Podgorica 2 – Kap 2 u praznom hodu, dok su svi ostali dalekovodi opterećeni, pri čemu su

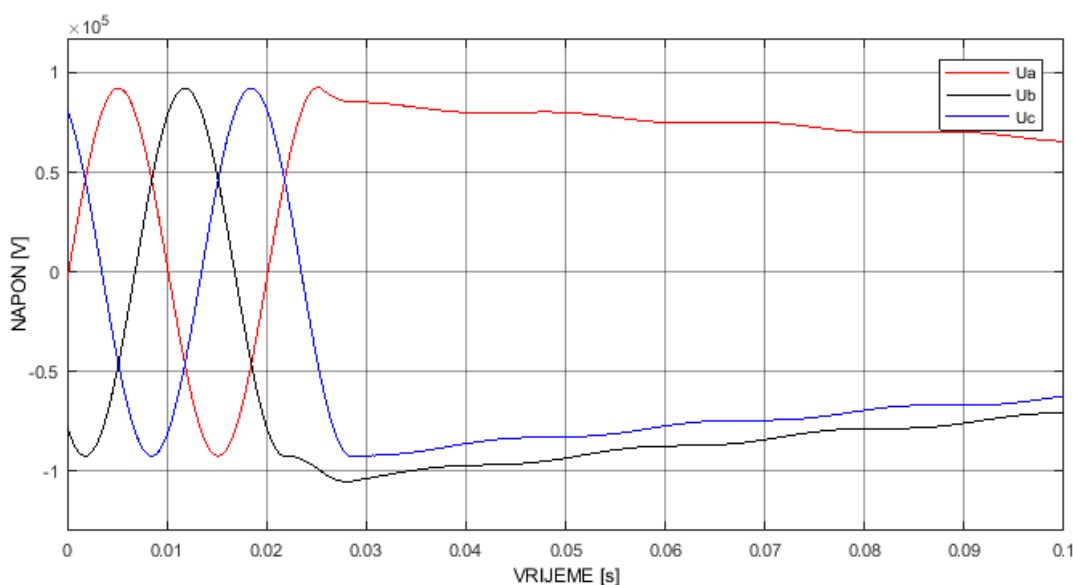


njihova opterećenja identična onim u slučaju kontrolisanog uključanja 110kV dalekovoda Podgorica 2 – Budva u praznom hodu, data u tabeli 20.

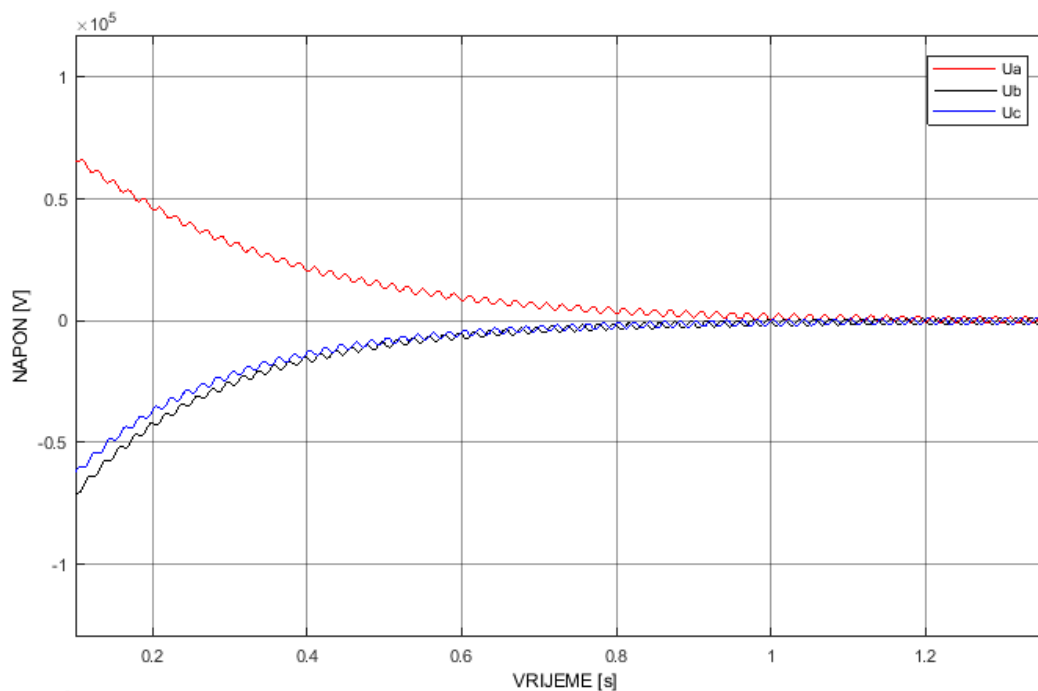
Ovaj slučaj kontrolisanog uključanja je nešto složeniji u poređenju sa prethodnim istraživanim slučajem, jer se dalekovod uključuje nakon kratke beznaponske pauze, pa na njemu u vremenskom trenutku uključanja prekidača postoji određena vrijednost zaostalog naelektrisanja. Da bi odredio optimalne vremenske trenutke uključanja prekidača, kontroleru su i ovdje takođe neophodni referentni naponski signali napona napajanja, tj. jake mreže i napona sa početka DV Podgorica 2 – Budva, koje dobija od *V-I mjerenje 2* (slika 85.) i *V-I mjerenja PocVoda1* (slika 87.), respektivno. Nakon prikupljanja referentnih naponskih signala kontroler sprovodi optimalni algoritam za kontrolisano automatsko ponovno uključanje dalekovoda u praznom hodu, i kao rezultat dobija optimalne vremenske trenutke uključanja prekidača za svaku fazu.

Detaljnije objašnjenje principa rada kontrolera, tj. sprovođenje optimalnog algoritma za kontrolisano automatsko ponovno uključanje dalekovoda u praznom hodu, kao i način slanja komandi za uključanje jednopolnim prekidačima je dato u okviru prethodnog poglavlja.

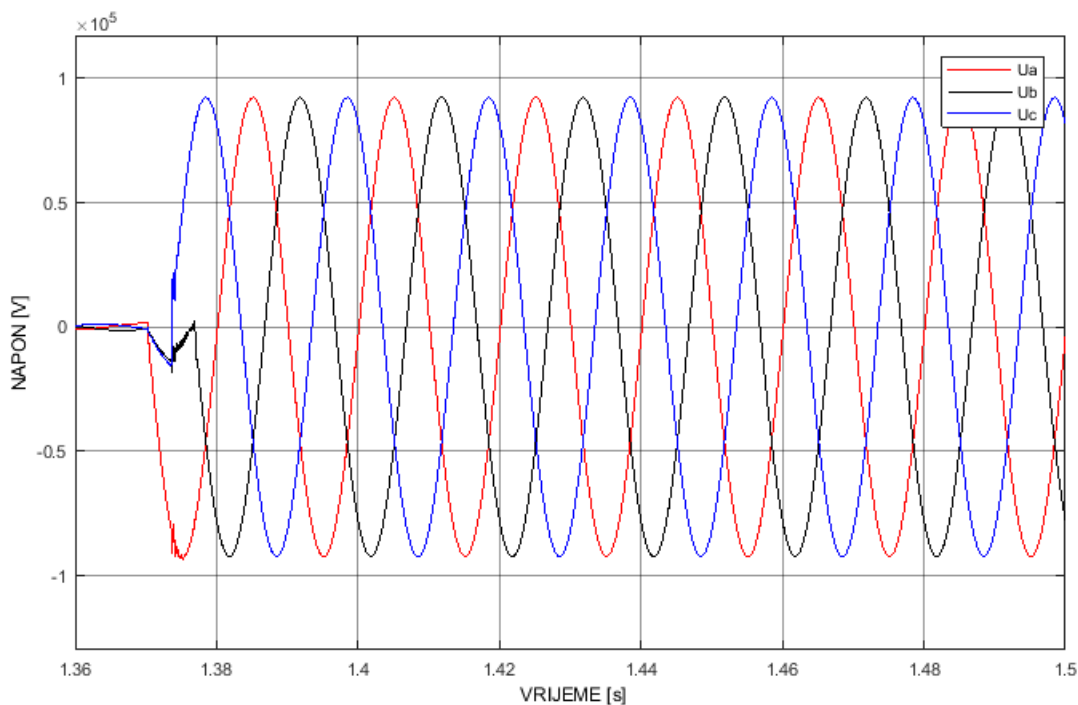
Grafički prikaz talasnog oblika napona na kraju dalekovoda dobijen pokretanjem simulacije kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja 110kV DV Podgorica 2 – Budva u praznom hodu je predstavljen na slici 92., slici 93. i slici 94., dok su na slici 95., slici 96. i slici 97. na zajedničkom grafiku prikazani talasni oblici napona napajanja i dobijeni talasni oblici napona na kraju za sve tri faze, posebno za tri vremenska perioda: vremenski period prije isključenja prekidača i neposredno nakon isključenja prekidača (od 0s do 0,1s), vremenski period neposredno nakon isključenja prekidača, kao i neposredno prije APU prekidača (od 0,1s do 1,36s) i vremenski period neposredno prije APU prekidača, kao i nakon APU prekidača (od 1,36s do 1,5s), respektivno.



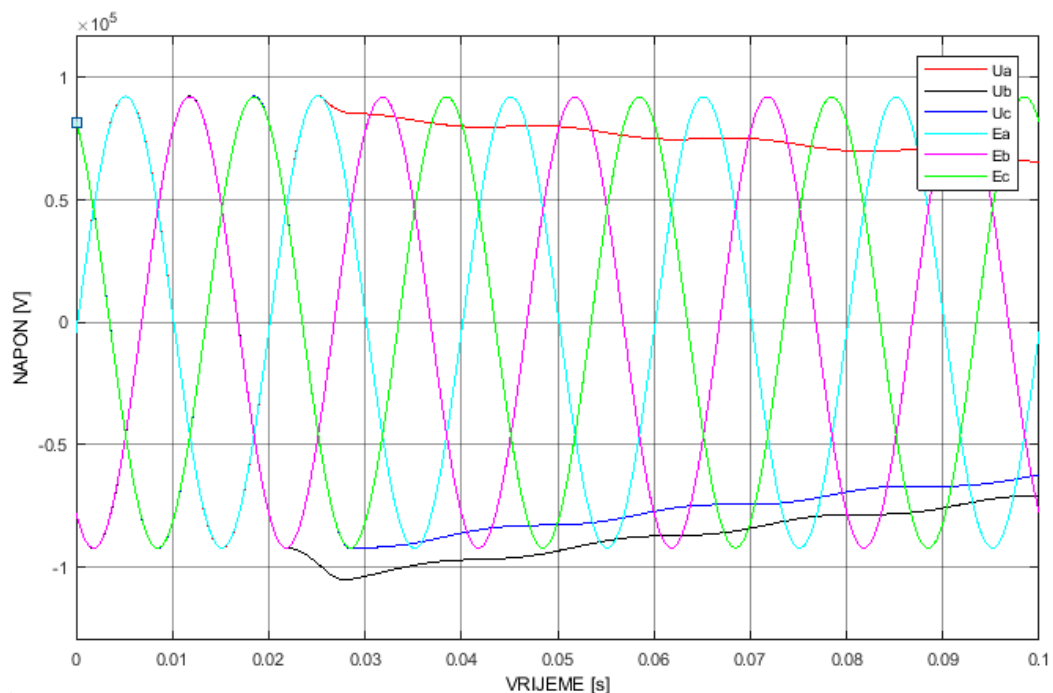
Slika 92. Talasni oblik napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog APU dalekovoda u praznom hodu za vremenski period prije isključenja prekidača, kao i neposredno nakon isključenja prekidača, tj. od 0s do 0,1s .



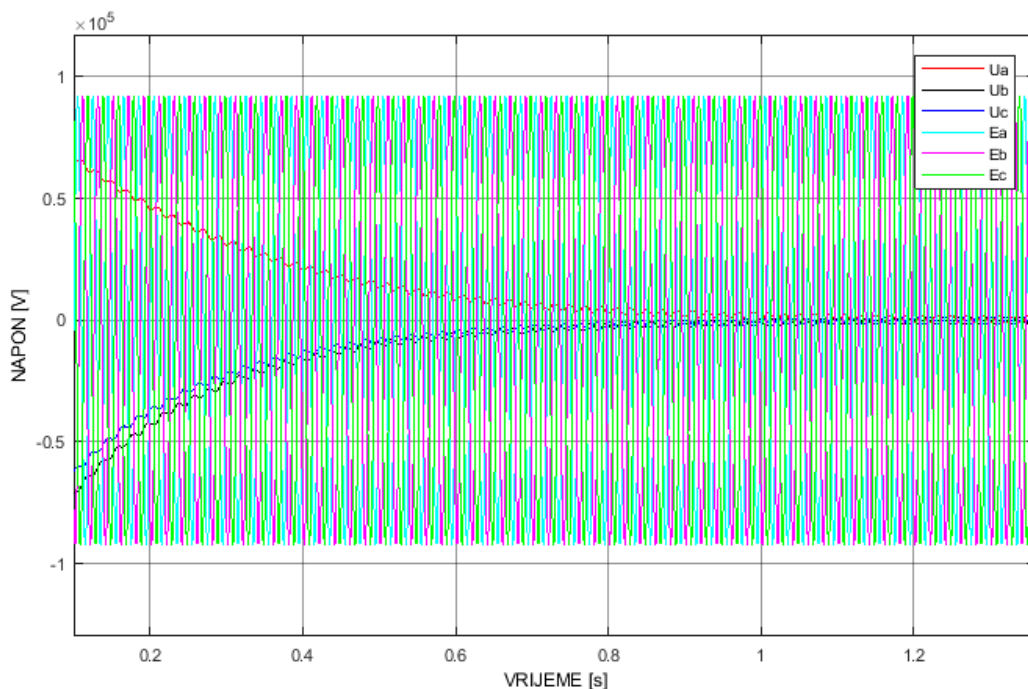
Slika 93. Talasni oblik napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda u praznom hodu za vrijeme trajanja beznaponske pauze, tj. vremenski period neposredno nakon isključenja prekidača, kao i neposredno prije APU prekidača, tj. od 0,1s do 1,36s .



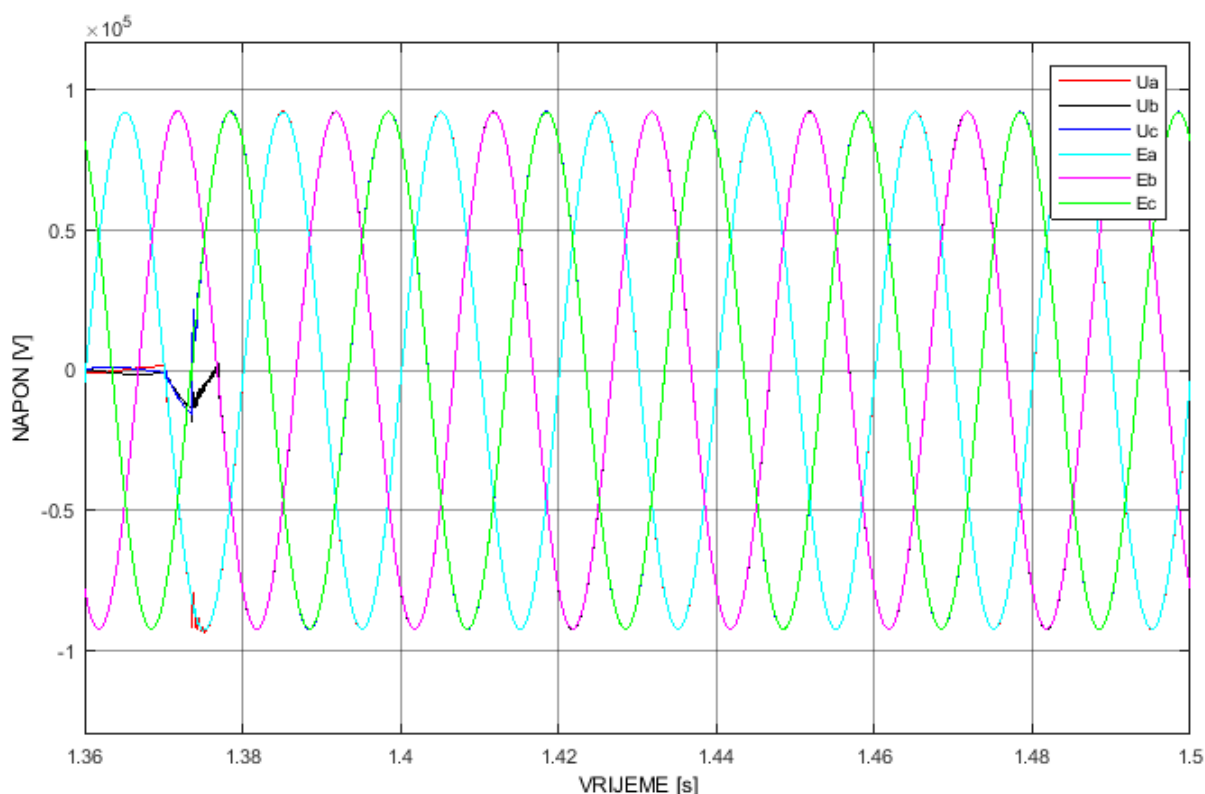
Slika 94. Talasni oblik napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda u praznom hodu za vremenski period neposredno prije APU prekidača, kao i nakon APU prekidača, tj. od 1,36s do 1,5s .



Slika 95. Talasni oblik napona napajanja, tj. jake mreže i napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda u praznom hodu za vremenski period prije isključenja prekidača, kao i neposredno nakon isključenja prekidača, tj. od 0s do 0,1s .



Slika 96. Talasni oblik napona napajanja, tj. jake mreže i napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključenja dalekovoda u praznom hodu za vrijeme trajanja beznaponske pauze, tj. vremenski period neposredno nakon isključenja prekidača, kao i neposredno prije APU prekidača, tj. od 0,1s do 1,36s .



Slika 97. Talasni oblik napona napajanja, tj. jake mreže i napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog automatskog ponovnog uključivanja dalekovoda u praznom hodu za vremenski period neposredno prije APU prekidača, kao i nakon APU prekidača, tj. od 1,36s do 1,5s .

Relejna zaštita isključuje prekidač u vremenskom trenutku 0,02s, i kao što se može vidjeti na prethodno prikazanim graficima, u svakoj fazi dalekovoda se od tog trenutka javlja zaostalo naelektrisanje. Nakon kratke beznaponske pauze, sistem APU-a izdaje eksternu komandu za uključivanje prekidača u vremenskom trenutku 1,37s, čime je kontroler primio eksternu komandu za uključivanje i počeo sa sprovođenjem optimalnog algoritma za kontrolisano automatsko ponovno uključivanje dalekovoda. Nakon određivanja optimalnih vremenskih trenutaka uključivanja za svaku fazu, kontroler prosleđuje komande za uključivanje odgovarajućim jednopolnim prekidačima.

Kao što se može vidjeti na prethodno prikazanim graficima, kontroler je nakon vremenskog trenutka 1,37s, kada je izdata eksterna komanda za uključivanje, odredio prve optimalne vremenske trenutke uključivanje pojedinih faza i proslijedio ih odgovarajućim prekidačima, tako da su prekidači uključeni u optimalnim vremenskim trenucima, čime je značajno spriječena pojava sklopnih prenapona. Optimalni vremenski trenutak uključivanja prekidača u ovom slučaju, kao što je i prikazano na slici 97., odgovara vremenskom trenutku u kojem je referentni naponski signal napona napajanja, tj. jake mreže, određene faze tačno jednak referentnom naponskom signalu napona sa početka 110kV voda Podgorica 2 – Budva u toj fazi.

Primjenom optimalnog algoritma za kontrolisano automatsko ponovno uključenje dalekovoda u praznom hodu na primjeru kontrolisanog automatskog ponovnog uključanja 110kV DV Podgorica 2 – Budva u TS 400/110kV „Podgorica 2“ spriječena je pojava sklopnih prenapona. Time su još jednom dokazane sve prednosti primjene tehnike kontrolisanih operacija prekidača u cilju ograničenja sklopnih prenapona uzrokovanih uključanjem dalekovoda, i takođe opravdana primjena ove tehnike i u crnogorskom elektrenergetskom sistemu, kao što je to praksa u brojnim savremenim elektroenergetskim sistemima.

### **7.2.5. Uticaj različitih faktora na vrijednost amplitude sklopnih prenapona pri uključanju dalekovoda u praznom hodu**

Simulacijom rada razvijenog optimalnog algoritma, tj. primjenom tehnike kontrolisanih operacija prekidača na primjeru uključanja prekidača u dalekovodnom polju TS u okviru modelovanog dijela realnog elektroenergetskog sistema, postignuta su značajna ograničenja sklopnih prenapona uzrokovanih uključanjem i automatskim ponovnim uključanjem dalekovoda. U sprovedenom istraživanju, uključanje dalekovoda se u oba slučaja postiže u kontrolisanim vremenskim trenucima, tj. optimalnim vremenskim trenucima sa aspekta uzrokovanih sklopnih prenapona. Dakle, prvi faktor koji utiče na vrijednost amplitude sklopnih prenapona, vremenski trenutak uključanja u ovom sprovedenom istraživanju ne uzrokuje porast vrijednosti amplitude sklopnih prenapona, već omogućava postizanje minimuma sklopnih prenapona.

Primjena tehnike kontrolisanih operacija prekidača u praksi, tj. u realnom elektroenergetskom sistemu može naići na određena ograničenja. Jedno od ograničenja koje se može javiti je statistička pojava električnog luka prilikom uključanja prekidača. Drugo ograničenje se odnosi na kašnjenje referentnih naponskih signala na osnovu kojih se primjenom razvijenog optimalnog algoritma određuju optimalni vremenski trenuci uključanja prekidača. Uticaj ovih ograničenja na vrijednost amplitude sklopnih prenapona biće analiziran u nastavku.

Pored vremenskog trenutka uključanja prekidača i prethodno pomenutih ograničenja koja se mogu javiti primjenom tehnike kontrolisanih operacija prekidača u praksi, vrijednost amplitude sklopnih prenapona zavisi i od parametara sistema. Stoga će u nastavku biti analiziran i uticaj vrijednosti opterećenja dalekovoda na vrijednost amplitude sklopnih prenapona.

#### **7.2.5.1. Uticaj vrijednosti opterećenja 110kV dalekovoda na vrijednost amplitude dobijenih sklopnih prenapona**

Jedan od parametara sistema koji utiče na vrijednost amplitude sklopnih prenapona uzrokovanih uključanjem i automatskim ponovnim uključanjem dalekovoda u sprovedenom istraživanju, su opterećenja 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“.

Na slici 90. i slici 91. prikazani su dobijeni talasni oblici napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 – Budva, kao i talasni oblik napona napajanja, za slučaj kontrolisanog uključanja 110kV DV Podgorica 2 – Budva u praznom hodu, zatvaranjem 110kV prekidača u

dalekovodnom polju Budva u TS 400/110kV „Podgorica 2“. U praznom hodu su takođe i 110kV DV Podgorica 2 – Podgorica 1 II i Podgorica 2 – Kap 2, dok su svi ostali 110kV dalekovodi opterećeni. Njihova aktivna i reaktivna opterećenja odgovaraju srednjim vrijednostima aktivnih i reaktivnih opterećenja, proračunata na osnovu odgovarajućih jednominutnih dijagrama opterećenja 110kV dalekovoda iz TS 400/110kV „Podgorica 2“, za posmatrani period 01.10.2020.g. – 07.10.2020.g. i data su u tabeli 20.

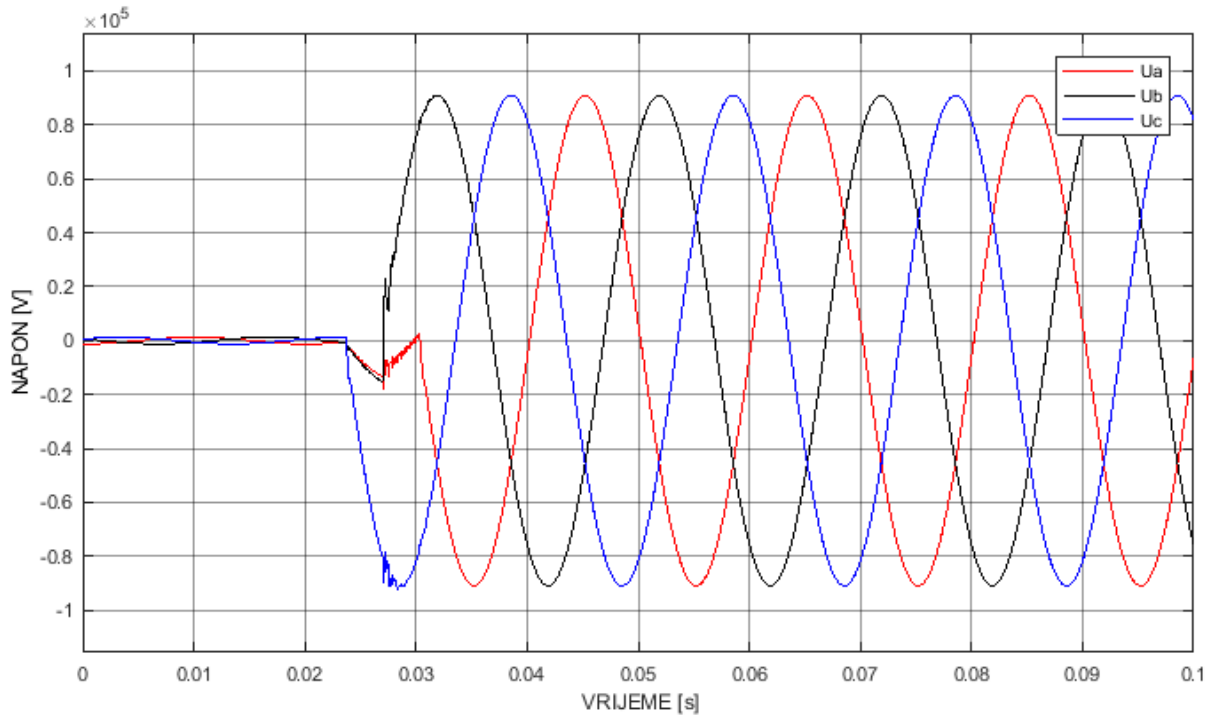
Da bi se ispitaio uticaj vrijednosti opterećenja 110kV dalekovoda iz TS 400/110kV „Podgorica 2“ na vrijednost amplitude sklopnih prenapona, sprovedeno je istraživanje sklopnih prenapona dobijenih kontrolisanim uključanjem 110kV DV Podgorica 2 – Budva za slučaj maksimalnih i minimalnih aktivnih i reaktivnih opterećenja 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“.

Na osnovu jednominutnih dijagrama opterećenja 110kV dalekovoda iz TS 400/110kV „Podgorica 2“, za posmatrani period 01.10.2020.g. – 07.10.2020.g. proračunate su minimalne i maksimalne vrijednosti aktivnih i reaktivnih opterećenja odgovarajućih opterećenih 110kV dalekovoda u modelu TS 400/110kV „Podgorica 2“. U tabeli 21. su prikazane proračunate maksimalne vrijednosti opterećenja.

Tabela 21. Maksimalne vrijednosti opterećenja 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“.

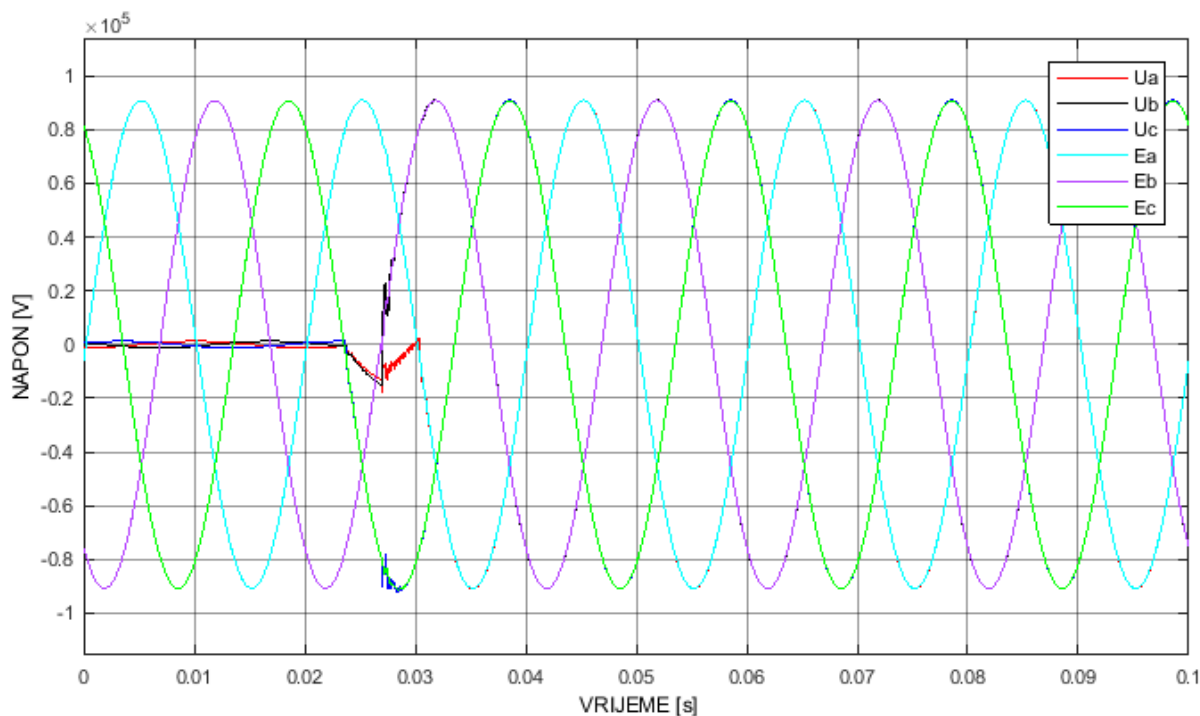
<b>Naziv 110kV dalekovoda</b>	<b>P<sub>max</sub> [MW]</b>	<b>Q<sub>max</sub> [MVar]</b>
DV Podgorica 2 – Cetinje	25,96	9,68
DV Podgorica 2 – Virpazar	31,38	15,1
DV Podgorica 2 – Podgorica 4	26,45	5,04
DV Podgorica 2 – Podgorica 1 I	86,09	14,3
DV Podgorica 2 – Podgorica 5	14,56	4,08
DV Podgorica 2 – KAP III	69	49,35

Upisivanjem odgovarajućih maksimalnih vrijednosti aktivnih i reaktivnih opterećenja u objekte kojima su modelovana odgovarajuća opterećenja 110kV dalekovoda i pokretanjem simulacije kontrolisanog uključanja 110kV DV Podgorica 2 – Budva dobijeni su talasni oblici napona koji su predstavljeni na slikama 98. i 99. Kao, što se može vidjeti posmatranjem slike 98., na kojoj je prikazan dobijeni talasni oblik napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 – Budva, operater u trafostanici je poslao komandu za uključenje prekidača u 21ms nakon pokretanja simulacije, kao i u slučaju srednjih opterećenja 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“.



Slika 98. Talasni oblik napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu u DV polju Budva, pri maksimalnim opterećenjima 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“.

Sprovedenjem razvijenog optimalnog algoritma za kontrolisano uključanje dalekovoda u praznom hodu, kontroler je i ovdje ispravno odredio optimalne trenutke uključanja svih jednopolnih prekidača u 110kV dalekovodnom polju Budva, što se može vidjeti na slici 99. na kojoj su prikazani talasni oblici napona napajanja, tj. jake mreže, kao i dobijeni talasni oblici napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 – Budva.



Slika 99. Talasni oblik napona napajanja, tj. jake mreže i napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog uključivanja dalekovoda u praznom hodu u DV polju, pri maksimalnim opterećenjima 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“.

Poređenjem dobijenih rezultata sa slike 98. i slike 90., tj. talasnih oblika napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 – Budva za slučaj maksimalnih i srednjih vrijednosti opterećenja 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“, respektivno, može se donijeti zaključak da su u slučaju maksimalnih opterećenja 110kV dalekovoda dobijene nešto manje vrijednosti amplituda sklopnih prenapona.

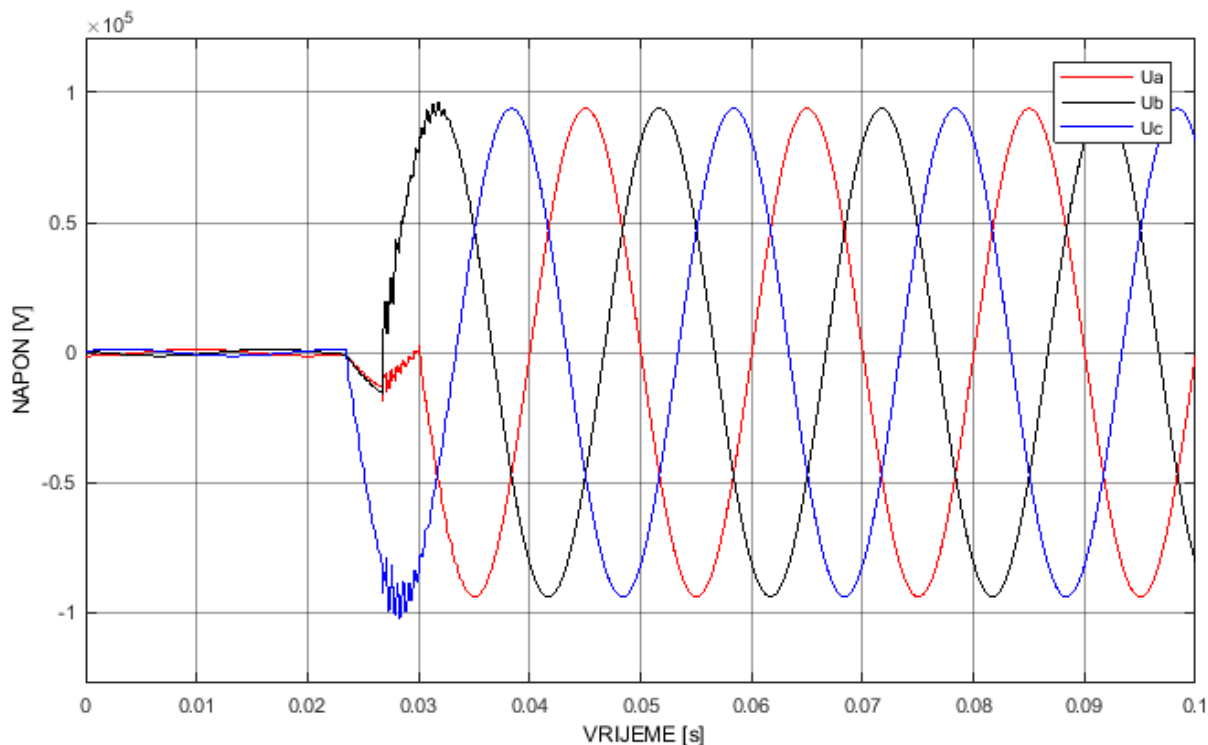
U tabeli 22. prikazane su proračunate minimalne vrijednosti aktivnih i reaktivnih opterećenja 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“, dobijene takođe na osnovu odgovarajućih jednodimenzionalnih dijagrama opterećenja za posmatrani period 01.10.2020.g. – 07.10.2020.g.

Tabela 22. Minimalne vrijednosti opterećenja 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“.

Naziv 110kV dalekovoda	$P_{\min}$ [MW]	$Q_{\min}$ [MVar]
DV Podgorica 2 – Cetinje	3,25	2,07
DV Podgorica 2 - Virpazar	0,01	0,5
DV Podgorica 2 – Podgorica 4	10,91	1,04
DV Podgorica 2 – Podgorica 1 I	1,67	0,01
DV Podgorica 2 – Podgorica 5	0,01	0,01
DV Podgorica 2 – KAP III	1,08	1,28



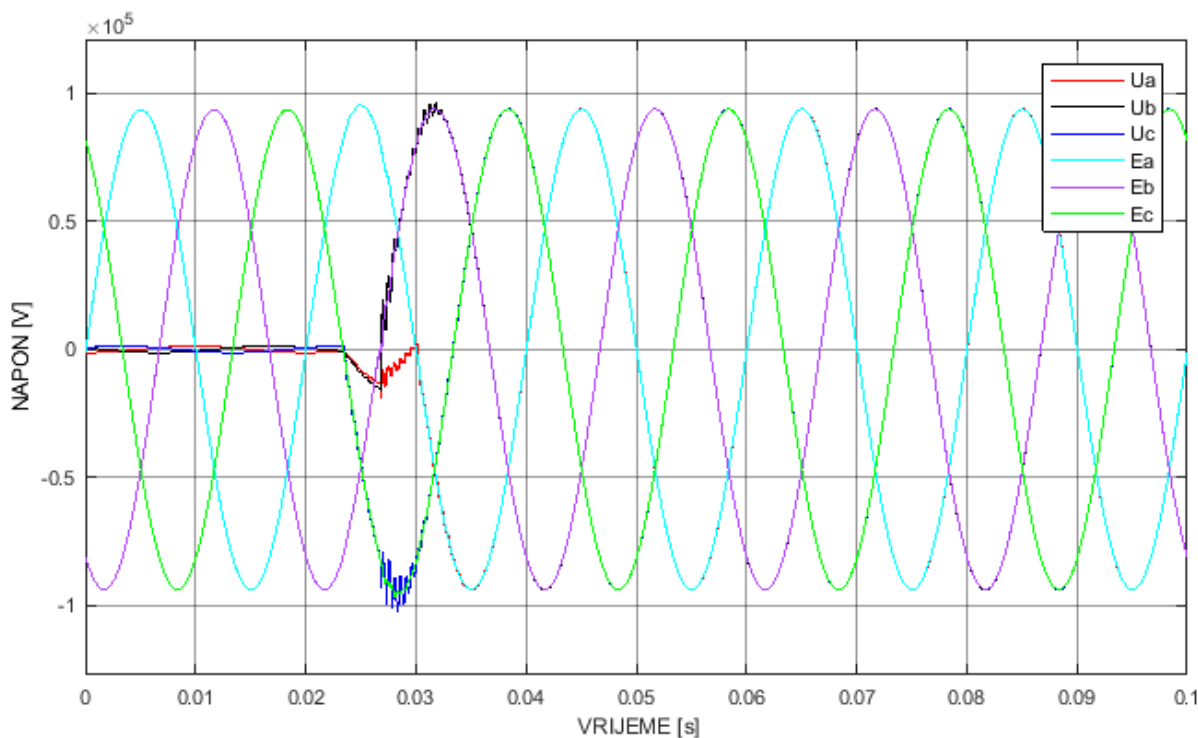
Grafički prikaz rezultata dobijenih za slučaj kontrolisanog uključanja 110kV DV Podgorica 2 – Budva pri minimalnim opterećenjima 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“, je predstavljen na slikama 100. i 101.



Slika 100. Talasni oblik napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu u DV polju Budva, pri minimalnim opterećenjima 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“.

Da bi se moglo izvršiti poređenje dobijenih rezultata sklopnih prenapona za različite vrijednosti opterećenja 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“, vremenski trenutak uključanja prekidača je identičan kao u slučajevima kontrolisanog uključanja 110kV DV Podgorica 2 – Budva pri srednjim i maksimalnim opterećenjima 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“. Dakle, i u ovom slučaju operater u trafostanici je poslao komandu za uključanje prekidača u 21ms nakon pokretanja simulacije, kao što se može vidjeti na slici 100.

Posmatranjem slike 101. može se donijeti zaključak da je kontroler i ovdje ispravno odredio optimalne vremenske trenutke uključanja jednopolnih prekidača u 110kV dalekovodnom polju Budva. Optimalni vremenski trenutak uključanja određene faze u ovom slučaju, odgovara vremenskom trenutku prolaska referentnog naponskog signala napona napajanja, tj. jake mreže, te faze kroz nulu.



Slika 101. Talasni oblik napona napajanja, tj. jake mreže i napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog uključivanja dalekovoda u praznom hodu u DV polju Budva, pri minimalnim opterećenjima 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“.

Poređenjem dobijenih rezultata prikazanih na slici 90., slici 98. i slici 100., tj. talasnih oblika napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 – Budva za slučaj srednjih, maksimalnih i minimalnih vrijednosti opterećenja 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“, respektivno, može se donijeti zaključak da je vrijednost amplitude dobijenih sklopnih prenapona, uzrokovanih uključivanjem dalekovoda, najveća u slučaju minimalnih vrijednosti opterećenja 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“ (slika 100.), a najmanja u slučaju maksimalnih vrijednosti opterećenja 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“ (slika 98.).

Vrijednosti koeficijenta sklopnih prenapona na kraju 110kV DV Podgorica 2 – Budva za svaku fazu, za slučaj kontrolisanog uključivanja dalekovoda u praznom hodu u dalekovodnom polju Budva, pri minimalnim, srednjim i maksimalnim opterećenjima 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“, su prikazane u tabeli 23.

Tabela 23. Vrijednosti koeficijentata sklopnih prenapona na kraju 110kV DV Podgorica 2 – Budva, za slučaj kontrolisanog uključenja dalekovoda u praznom hodu u DV polju Budva, pri minimalnim, srednjim i maksimalnim opterećenjima 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“.

Faza	$P_{\min}, Q_{\min}$	$P_{sr}, Q_{sr}$	$P_{\max}, Q_{\max}$
	$K_p$		
A	1,0456	1,0273	1,0132
B	1,0718	1,0271	1,0151
C	1,1392	1,0390	1,0329

Kao što se može vidjeti iz tabele 23. koeficijent sklopnog prenapona je dostigao svoju maksimalnu vrijednost od 1,139 u fazi C, pri minimalnim opterećenjima 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“. Dakle, sa porastom vrijednosti opterećenja 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“ smanjuje se vrijednost amplitude dobijenih sklopnih prenapona na kraju 110kV DV Podgorica 2 – Budva.

Ovaj zaključak je takođe potvrđen u [3], u kojem je sprovedeno istraživanje o analizi uticaja pojedinih parametara sistema na oblik i veličinu sklopnih prenapona uzrokovanih uključenjem dalekovoda, pri čemu je jedan od parametara sistema čiji je uticaj analiziran upravo vrijednost opterećenje dalekovoda. Dobijeni rezultati pokazuju da sa porastom vrijednosti opterećenja 35kV dalekovoda opada maksimalna vrijednost amplitude sklopnih prenapona [3].

#### 7.2.5.2. Uticaj efekta kašnjenja referentnih naponskih signala na vrijednost amplitude dobijenih sklopnih prenapona

Nesumnjivo je da primjena tehnike kontrolisanih operacija prekidača ima veliki značaj sa aspekta ograničenja sklopnih prenapona uzrokovanih uključenjem dalekovoda. Prethodno prikazani rezultati dobijeni u sprovedenim istraživanjima to i dokazuju. Međutim, primjena razvijenog optimalnog algoritma u praksi, tj. realnim elektroenergetskim sistemima može naići na određena ograničenja, koja će uticati na dobijene rezultate sklopnih prenapona.

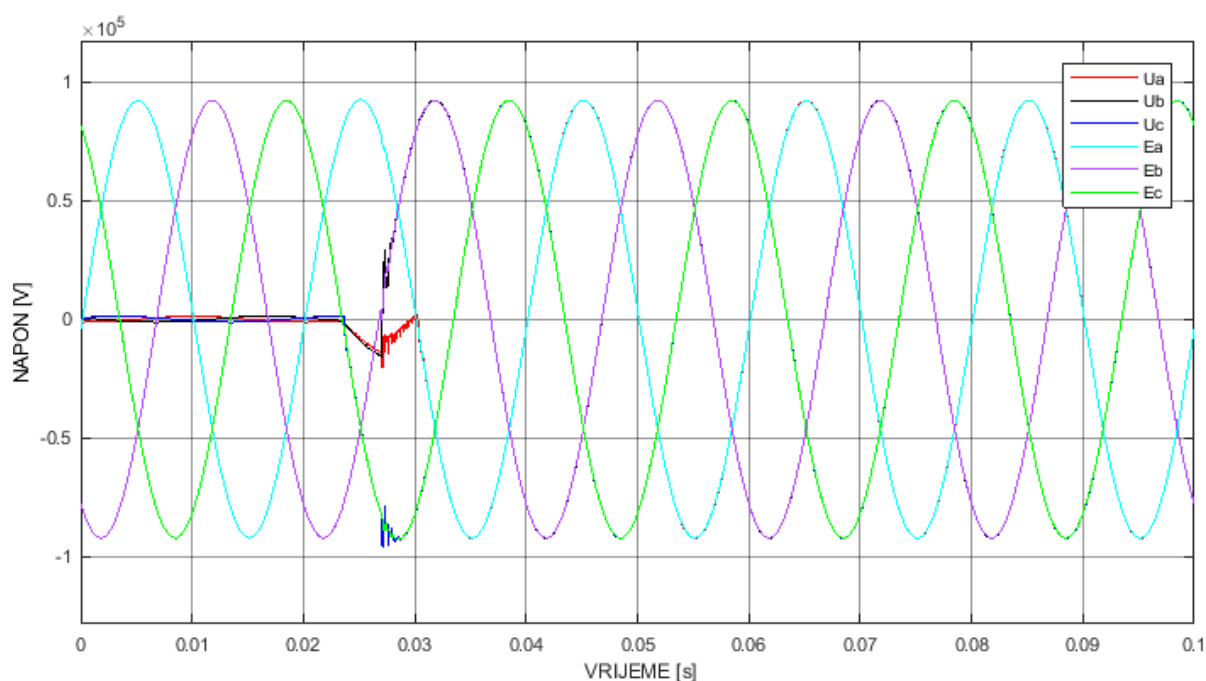
Prvo od ograničenja, koje će ovdje biti razmotreno, tiče se efekta kašnjenja od jednog ili više semplinga u odnosu na optimalne vremenske trenutke uključenja. Naime, kao posledica kašnjenja referentnih naponskih signala usled tehničkih razloga, koje kontroler dobija od naponskih mjernih transformatora, doći će do pojave određene greške u određivanju optimalnih vremenskih trenutaka uključenja prekidača. Samim tim, do uključenja prekidača neće doći u procjenjenim optimalnim vremenskim trenutcima, sa aspekta uzrokovanih sklopnih prenapona, već će se prekidači uključiti nešto kasnije, pri čemu će to zakašnjenje biti u iznosu jednog ili više semplinga zavisno od kašnjenja referentnih naponskih signala.

U tehničkom priručniku [45], vezanom za opremu koja se primjenjuje u okviru crnogorskog elektroprenosnog sistema, mogu se naći detaljni podaci o vremenu semplovanja

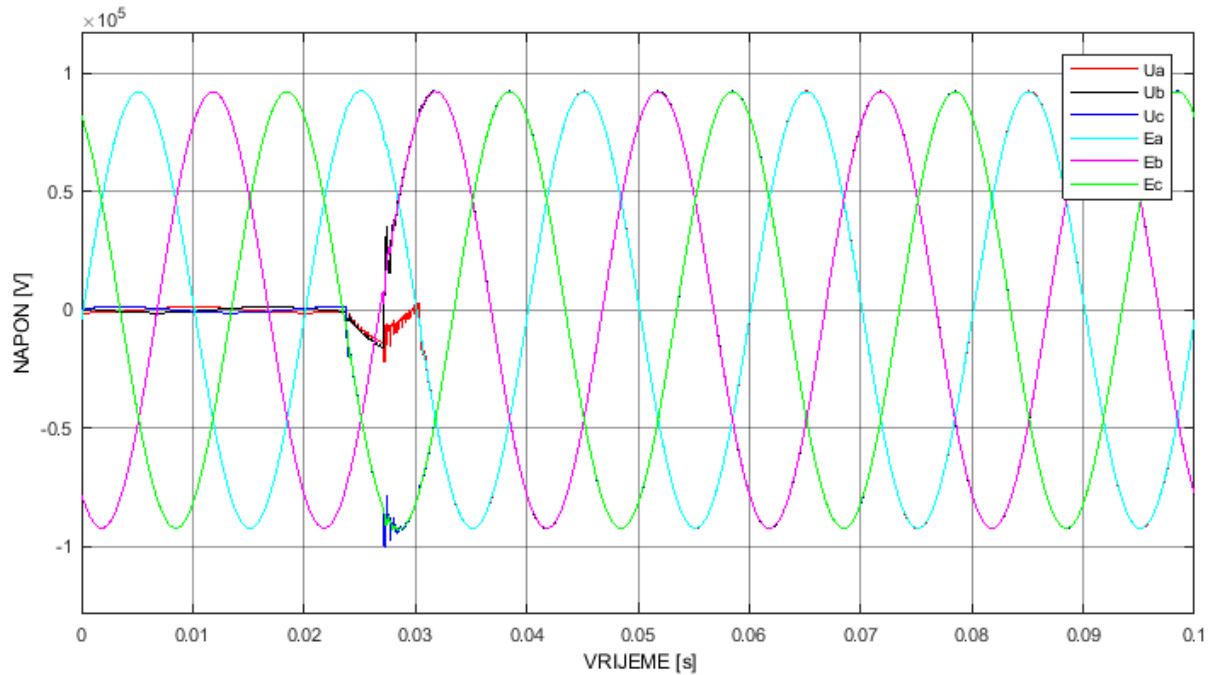
struja i napona u zaštitnim uređajima. Naime, za mjerenje snage, efektivnih vrijednosti napona i struje, itd. frekvencija odabiranja je 8kHz, što je jednako 0,125ms, odnosno 160 odbiraka za periodu 50Hz [45]. Dakle, kašnjenje referentnih naponskih signala, usled tehničkih razloga, od jednog semplinga, ima za posledicu uključenje prekidača u vremenskom trenutku koji za 0,125ms kasni u poređenju sa procjenjenim optimalnim vremenskim trenutkom uključjenja. Dalje, kašnjenje referentnog naponskog signala u iznosu od dva semplinga, uzrokuje uključjenje prekidača u vremenskom trenutku koji za 0,250ms kasni u poređenju sa procjenjenim optimalnim vremenskim trenutkom uključjenja, itd.

Na primjeru kontrolisanog uključjenja 110kV DV Podgorica 2 – Budva u TS 400/110kV „Podgorica 2“, sprovedeno je istraživanje o uticaju efekta kašnjenja referentnih naponskih signala, za jedan ili više semplinga, na vrijednost amplitude dobijenih sklopnih prenapona. Grafički prikaz dobijenih rezultata je dat u nastavku na slikama 102., 103. i 104., na kojima su prikazani dobijeni talasni oblici napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 – Budva, kao i talasni oblik napona napajanja, tj. jake mreže, za slučaj kašnjenja referentnih naponskih signala od jednog, dva i tri semplinga, respektivno.

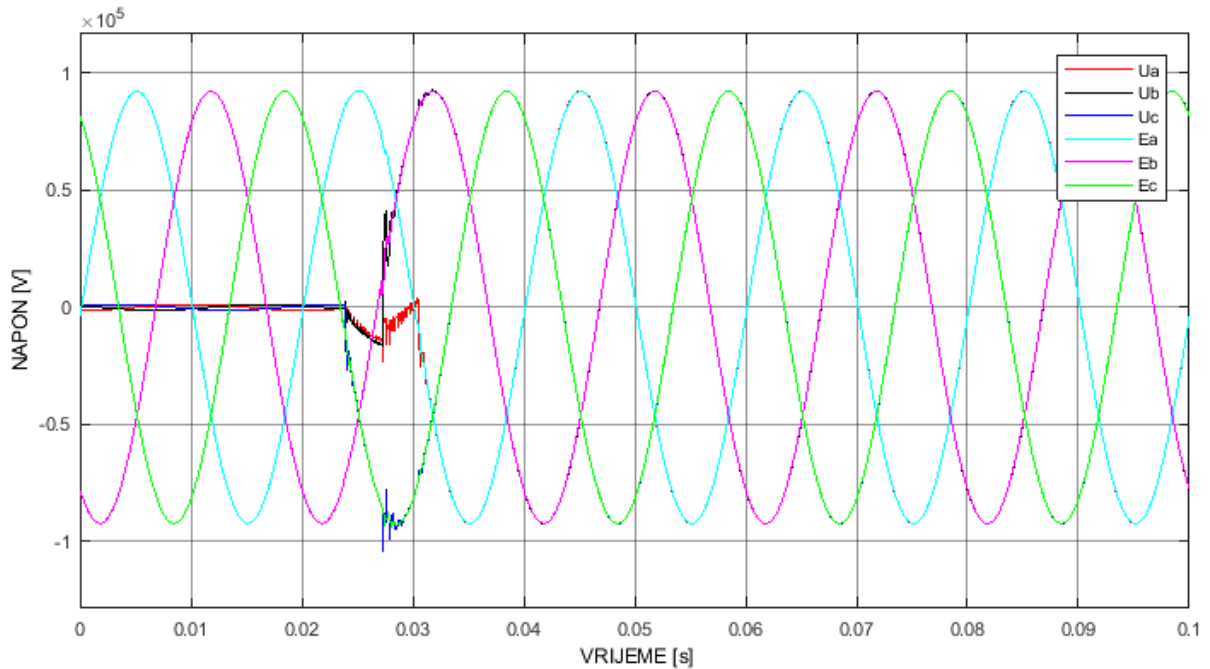
Kako bi se moglo izvršiti poređenje dobijenih rezultata sklopnih prenapona, uzrokovanih uključjenjem dalekovoda, za različite vrijednosti vremena kašnjenja, vremenski trenuci uključjenja prekidača su identični u svim analiziranim slučajevima. Naime, operater u trafostanici je poslao komandu za uključenje prekidača u 21ms nakon pokretanja simulacije.



Slika 102. Talasni oblik napona napajanja, tj. jake mreže i napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog uključjenja dalekovoda u praznom hodu, pri efektu kašnjenja referentnih naponskih signala od jednog semplinga.



Slika 103. Talasni oblik napona napajanja, tj. jake mreže i napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog uključivanja dalekovoda u praznom hodu, pri efektu kašnjenja referentnih naponskih signala od dva semplinga.



Slika 104. Talasni oblik napona napajanja, tj. jake mreže i napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog uključivanja dalekovoda u praznom hodu, pri efektu kašnjenja referentnih naponskih signala od tri semplinga.

Analizom dobijenih rezultata sklopnih prenapona na kraju 110kV DV Podgorica 2 – Budva za slučaj kašnjenja referentnih naponskih signala od jednog, dva i tri semplinga, predstavljenih na prethodno prikazanim graficima, može se donijeti zaključak da je vrijednost amplitude dobijenih sklopnih prenapona najveća u slučaju vremenskog kašnjenja referentnih naponskih signala u iznosu od tri semplinga (slika 104.), a najmanja u slučaju vremenskog kašnjenja u iznosu od jednog semplinga (slika 102.).

Vrijednosti koeficijenta sklopnih prenapona na kraju 110kV DV Podgorica 2 – Budva za svaku fazu, za slučaj kontrolisanog uključivanja dalekovoda u praznom hodu u dalekovodnom polju Budva u TS 400/110kV „Podgorica 2“, pri efektu kašnjenja referentnih naponskih signala od jednog, dva i tri semplinga su prikazane u tabeli 24.

Tabela 24. Vrijednosti koeficijenta sklopnih prenapona na kraju 110kV DV Podgorica 2 – Budva, za slučaj kontrolisanog uključivanja dalekovoda u praznom hodu u DV polju Budva, pri efektu kašnjenja referentnih naponskih signala od jednog, dva i tri semplinga.

Faza	Kašnjenje od jednog semplinga	Kašnjenje od dva semplinga	Kašnjenje od tri sempliga
	K <sub>p</sub>		
A	1,0273	1,0274	1,0274
B	1,0272	1,0273	1,0346
C	1,0718	1,1153	1,1572

Kao što se može vidjeti iz tabele 24. koeficijent sklopnog prenapona je dostigao svoju maksimalnu vrijednost od 1,1572 u fazi C, pri efektu kašnjenja referentnih naponskih signala od tri semplinga. Dakle, sa porastom vrijednosti vremenskog kašnjenja referentnih naponskih signala, usled tehničkih razloga, raste i vrijednost amplitude dobijenih sklopnih prenapona, istina, to je povećanje malo, neznatno, ali svakako uočljivo.

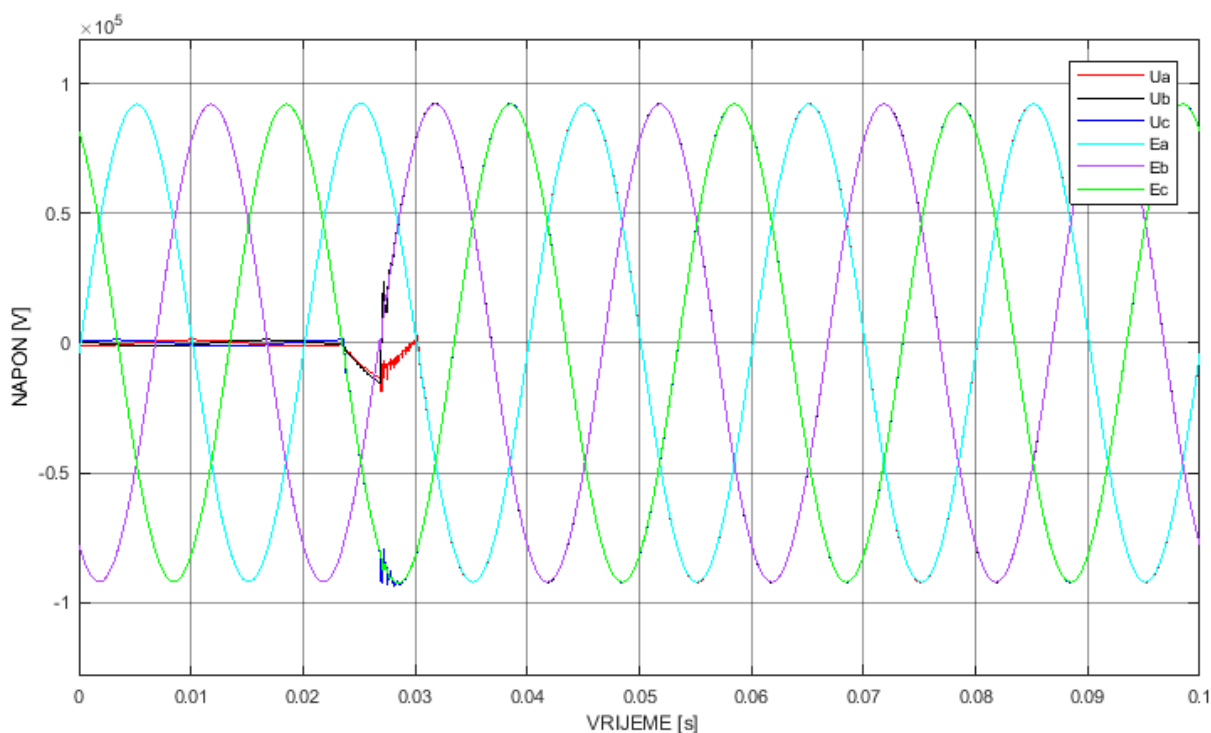
### 7.2.5.3. Uticaj efekta pred-iskrenja na vrijednost amplitude dobijenih sklopnih prenapona

Drugo ograničenje koje se može javiti u praksi, prilikom primjene tehnike kontrolisanih operacija prekidača u stvarnim elektroenergetskim sistemima, jeste statistička pojava električnog luka prilikom uključivanja prekidača, tzv. efekat pred-iskrenja. I pored toga što će kontroler na osnovu razvijenog optimalnog algoritma za kontrolisano uključivanje dalekovoda ispravno odrediti optimalne vremenske trenutke uključivanja i proslijediti ih prekidačima, oni se neće uključiti u tim optimalnim vremenskim trenucima, već nešto ranije. Razlog tome je pojava rasipanja polova prekidača, tj. statistička pojava električnog luka koji se formira prije samog uključivanja prekidača, kao posledica približavanja kontakata prekidača. Stoga će u praksi biti dobijene nešto veće vrijednosti amplitude sklopnih prenapona, u poređenju sa onim dobijenim u sprovedenim istraživanjima, za iste ispitivane slučajeve.

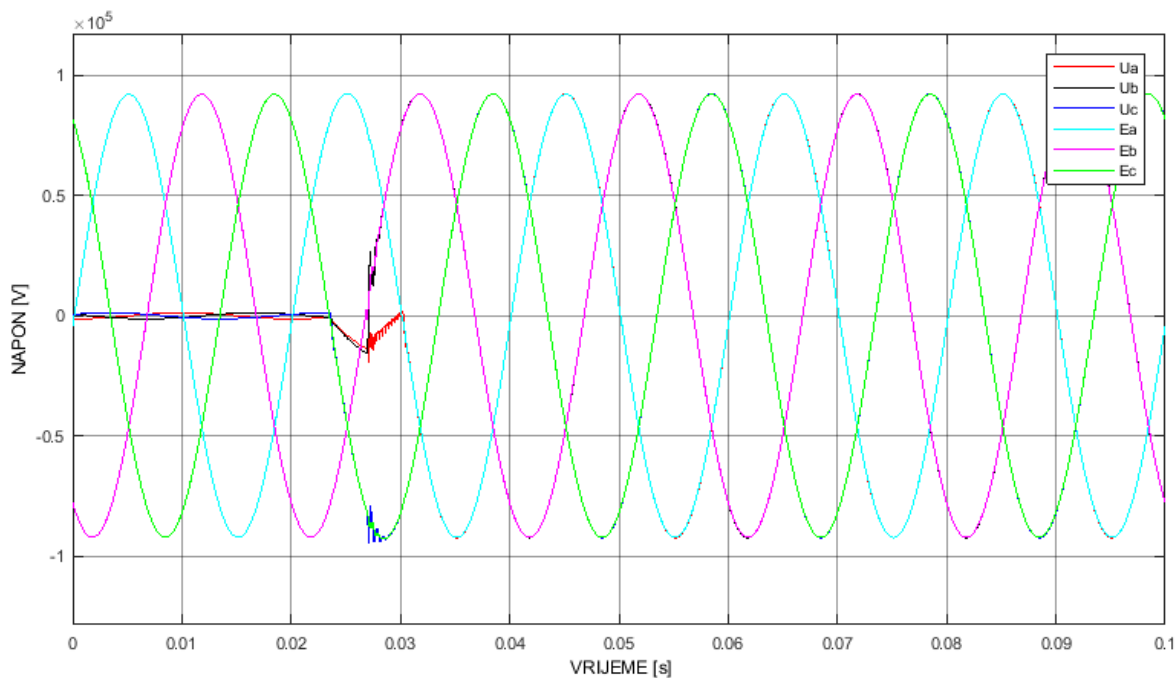
Koliko će ta vrijednost amplitude biti veća u praksi zavisi od vremena trajanja pred-iskrenja, tj. vremenskog trenutka u kojem će doći do pojave efekta rasipanja polova prekidača.

Da bi se ispitao uticaj efekta pred-iskrenja na vrijednost amplitude dobijenih sklopnih prenapona, sprovedeno je istraživanje na primjeru kontrolisanog uključanja 110kV DV Podgorica 2 – Budva u TS 400/110kV „Podgorica 2“. Na graficima koji su prikazani u nastavku predstavljeni su dobijeni talasni oblici napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 – Budva, kao i talasni oblik napona napajanja, tj. jake mreže, za slučaj pojave efekta rasipanja polova prekidača u vremenskim trenucima koji prednjače odgovarajućim optimalnim vremenskim trenucima uključanja prekidača, tj. za slučajeve pred-iskrenja od 0,1ms (slika 105.), 0,2ms (slika 106.) i 0,3ms (slika 107.).

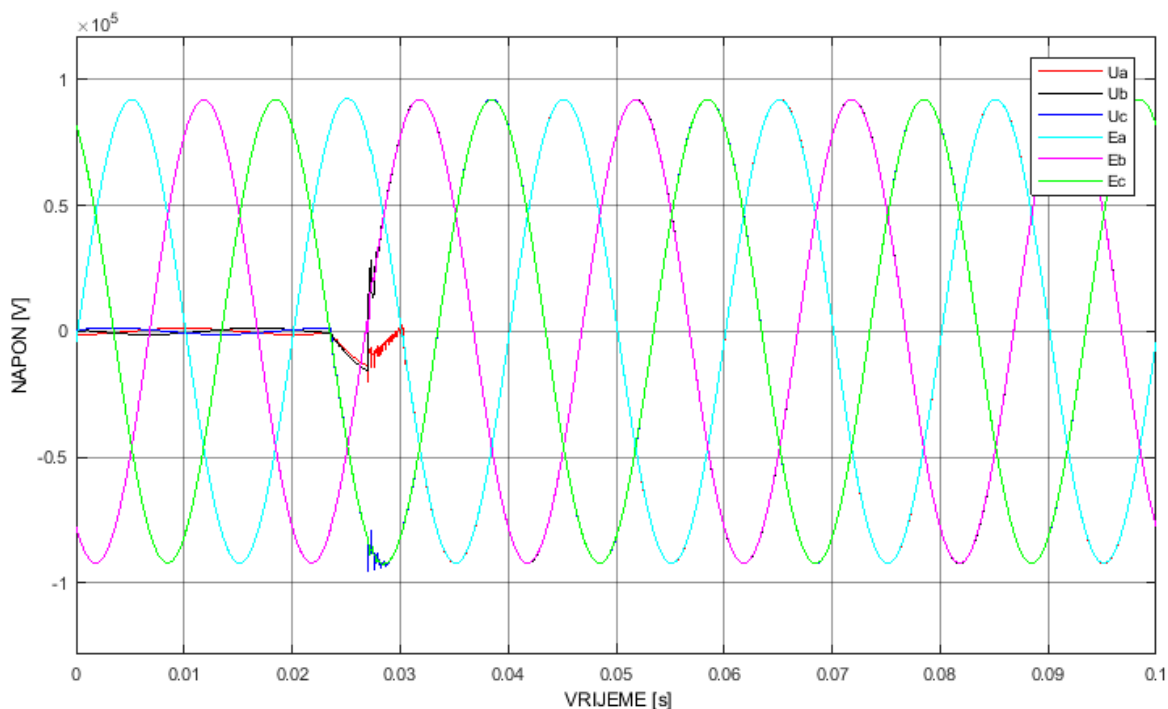
Da bi se moglo izvršiti poređenje dobijenih rezultata sklopnih prenapona za različite vremenske trenutke u kojima dolazi do pojave rasipanja polova prekidača, koji prednjače odgovarajućim optimalnim vremenskim trenucima uključanja prekidača, vremenski trenuci uključanja prekidača su identični u svim analiziranim slučajevima. Naime, operater u trafostanici je poslao komandu za uključanje prekidača u 21ms nakon pokretanja simulacije.



Slika 105. Talasni oblik napona napajanja, tj. jake mreže i napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog uključanja dalekovoda u praznom hodu, pri čemu do pojave rasipanja polova prekidača dolazi 0,1ms ranije od optimalnih vremenskih trenutaka uključanja prekidača.



Slika 106. Talasni oblik napona napajanja, tj. jake mreže i napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 - Budva za slučaj kontrolisanog uključivanja dalekovoda u praznom hodu, pri čemu do pojave rasipanja polova prekidača dolazi 0,2ms ranije od optimalnih vremenskih trenutaka uključivanja prekidača.



Slika 107. Talasni oblik napona napajanja, tj. jake mreže i napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 – Budva za slučaj kontrolisanog uključivanja dalekovoda u praznom hodu, pri čemu do pojave rasipanja polova prekidača dolazi 0,3ms ranije od optimalnih vremenskih trenutaka uključivanja prekidača.



Poređenjem dobijenih rezultata sklopnih prenapona na kraju 110kV DV Podgorica 2 – Budva za slučaj pojave efekta rasipanja polova prekidača u vremenskim trenucima koji prednjače odgovarajućim optimalnim vremenskim trenucima uključenja prekidača, tj. za slučajeve pred-iskrenja od 0,1ms, 0,2ms i 0,3ms, može se donijeti zaključak da je vrijednost amplitude sklopnih prenapona najveća u slučaju kada do pojave efekta rasipanja polova prekidača dođe u vremenskim trenucima koji prednjače odgovarajućim optimalnim vremenskim trenucima uključenja prekidača u iznosu od 0,3ms (slika 107.), a najmanja u slučaju kada do pojave efekta rasipanja polova prekidača dođe u vremenskim trenucima koji prednjače optimalnim vremenskim trenucima uključenja prekidača u iznosu od 0,1ms (slika 105.).

Vrijednosti koeficijenata sklopnih prenapona na kraju 110kV DV Podgorica 2 – Budva za svaku fazu, za slučaj kontrolisanog uključenja dalekovoda u praznom hodu u dalekovodnom polju Budva u TS 400/110kV „Podgorica 2“, pri čemu do pojave rasipanja polova prekidača dolazi 0,1ms, 0,2ms i 0,3ms ranije od optimalnih vremenskih trenutaka uključenja prekidača, su prikazane u tabeli 25.

Tabela 25. Vrijednosti koeficijenata sklopnih prenapona na kraju 110kV DV Podgorica 2 – Budva, za slučaj kontrolisanog uključenja dalekovoda u praznom hodu u DV polju Budva, pri čemu do pojave rasipanja polova prekidača dolazi 0,1ms, 0,2ms i 0,3ms ranije od optimalnih vremenskih trenutaka uključenja prekidača.

Faza	0,1ms	0,2ms	0,3ms
	K <sub>p</sub>		
A	1,0273	1,0274	1,0275
B	1,0273	1,0274	1,0274
C	1,0409	1,0522	1,0630

Kao što se može vidjeti iz tabele 25. koeficijent sklopnog prenapona je dostigao svoju maksimalnu vrijednost od 1,0630 u fazi C, za slučaj pred-iskrenja od 0,3ms. Dakle, što vremenski trenuci u kojima dolazi do pojave efekta rasipanje polova prekidača više prednjače odgovarajućim optimalnim vremenskim trenucima uključenja prekidača, to će vrijednost amplitude dobijenih sklopnih prenapona biti veća.

## 8. ZAKLJUČAK

Prenaponi koji se javljaju unutar elektroenergetskih sistema narušavaju, a mogu i ozbiljno da ugroze normalnu eksploataciju elektroenergetskog sistema. Bez obzira na uzrok njihovog nastanka, prenaponi mogu uzrokovati niz negativnih efekata kao što su: kratak spoj, električni luk, proboj izolacije itd. Stoga je neophodno odrediti karakteristike prenapona u pogledu njihove amplitude i dužine trajanja, kako bi se elementi i druga oprema mogli zaštititi od njihovog uticaja.

Dok se većina kvarova i otkaza opreme ne može spriječiti, već sva oprema mora izdržati brojna uzrokovana naponska i strujna naprezanja, naponska i strujna naprezanja u prelaznom procesu uzrokovana manipulacijama prekidačem su nešto što se može spriječiti i preventivno djelovati, pa samim tim omogućiti i pouzdano, neprekidno i kvalitetno napajanje električnom energijom krajnjih korisnika elektroenergetskog sistema. Iako se ograničenje sklopnih prenapona može postići na konvencionalan način korišćenjem prekidača koji su opremljeni pred-umetnutim otpornicima, kao i korišćenjem metal-oksidnih odvodnika prenapona, ove tehnike su sve manje zastupljene u savremenim elektroenergetskim sistemima. Razlog tome su njihova dva velika nedostatka, koja se ogledaju u sledećem: proizvoljno odabran vremenski trenutak uključenja/isključenja prekidača, kao i ograničenje sklopnih prenapona nakon njihovog pojavljivanja. Prethodno pomenuti nedostaci karakterišu konvencionalne tehnike kao neefikasne, nepouzdana i skupe, pa se stoga u svrhu ograničenje sklopnih prenapona, danas sve više primjenjuje savremena tehnika kontrolisanih operacija prekidača. Upravo je tehnika kontrolisanih operacija prekidača, koja pruža brzo poboljšanje, postaje sve ekonomičnija i postaje zvanični i pouzdani metod za smanjivanje poremećaja, jedna od najboljih metoda ograničenje naprezanja u prelaznom procesu koja je dostupna inženjerima elektroenergetskog sistema i pomoću koje mogu da poboljšaju rad njihovog sistema i njihov kvalitet usluge.

Jedna od ključnih prednosti tehnike kontrolisanih operacija prekidača u poređenju sa konvencionalnim tehnikama, je ta što je njenom primjenom moguće gotovo u potpunosti eliminisati naponska i strujna naprezanja u EES-u, uzrokovana manipulacijama prekidačem. Kontrolisanim vremenskim operacijama prekidača, komande za uključenje/isključenje svakog nezavisnog pola prekidača se odlažu tako da do spajanja ili razdvajanja kontakata dolazi u optimalnom vremenskom trenutku, koji zavisi od faznog ugla referentnog naponskog ili strujnog signala.

Primjenom tehnike kontrolisanih operacija prekidača se postižu prednosti u oba slučaja kontrolisanih operacija, kako u slučaju kontrolisane operacije uključanja prekidača, tako i u slučaju kontrolisane operacije isključenja prekidača. Kontrolisanim uključanjem prekidača značajno se smanjuju uzrokovana naponska naprezanja, čime se produžava radni

vijek prekidača. Sa druge strane, kontrolisanim isključenjem prekidača poboljšavaju se uslovi tokom prekidanja struje, pa se time značajno poboljšavaju performanse prekidača.

Brojne studije pokazuju da primjena tehnike kontrolisanih operacija prekidača daje neuporedivo bolje rezultate u cilju ograničenja sklopnih prenapona uzrokovanih uključenjem dalekovoda, u poređenju sa konvencionalnim metodama. Uprkos tome, kao najbolje rješenje za ograničenje sklopnih prenapona, uzrokovanih uključenjem dalekovoda, predlaže se primjena tehnike kontrolisanih operacija prekidača u kombinaciji sa odvodnicima prenapona postavljenim na krajevima dalekovoda. Primjena odvodnika prenapona bi obezbjedila bolje rezultate, kao i pouzdanost i sigurnost u radu elektroenergetskog sistema u slučaju neispravnosti sistema kontrolisanih operacija prekidača. Takođe, primjenom odvodnika prenapona štiti se elektroenergetski sistem od prenapona uzrokovanih atmosferskim pražnjenjem.

Napredne tehnike za upravljanje visokonaponskim prekidačima sa ciljem ograničenja sklopnih prenapona, uzrokovanih uključenjem dalekovoda, su predmet istraživanja ovog magistarskog rada. Na primjeru jednog jednostavnog elektroenergetskog sistema sprovedena su istraživanja koja su obuhvatila analizu različitih slučajeva uključenja dalekovoda, pri kojima nastaju sklopni prenaponi čije su karakteristike opasne po izolaciju mreže i opreme u EES-u. Cilj sprovedenih istraživanja je bio određivanje optimalnog algoritma koji bi na osnovu stanja u dijelu sistema, tj. naponskih i strujnih prilika u vremenu neposredno prije sklopne operacije i drugih analiziranih uticajnih parametara, definisao optimalne parametre za napredno upravljanje prekidačem u visokonaponskim razvodnim postrojenjima, tj. odredio optimalni vremenski trenutak uključenja prekidača, kako bi generisani sklopni prenaponi uzrokovani uključenjem dalekovoda imali minimalnu amplitudu.

Rezultati dobijeni primjenom razvijenog optimalnog algoritma za kontrolisano uključenje i kontrolisano automatsko ponovno uključenje dalekovoda u praznom hodu na primjeru jednostavnog elektroenergetskog sistema potvrdili su značajno ograničenje sklopnih prenapona, u oba analizirana slučaja. Takođe je i ispitan uticaj parametara sistema kao i drugih faktora od kojih zavisi vrijednost amplitude sklopnih prenapona uzrokovanih uključenjem dalekovoda. Zaključeno je da dominantan uticaj na vrijednost amplitude sklopnih prenapona uzrokovanih uključenjem dalekovoda imaju vremenski trenutak uključenja prekidača, kao i vrijeme trajanja beznaponske pauze. U slučaju kontrolisanog uključenje dalekovoda postižu se sklopni prenaponi značajno manjih vrijednosti amplituda, u poređenju sa nekontrolisanim uključenjem dalekovoda. Dalje, poređenjem rezultata kontrolisanog uključenja dalekovoda u praznom hodu nakon duge i kratke beznaponske pauze zaključeno je da se u slučaju kratke beznaponske pauze dobija sklopni prenapon značajno veće vrijednosti amplitude. Pored toga, zaključeno je da se sa povećanjem dužine dalekovoda, kao jednog od parametara sistema, pri istim optimalnim vremenskim trenucima uključenja prekidača, povećava i vrijednost amplitude dobijenih sklopnih prenapona.

Nakon što je razvijen optimalni algoritam i dokazano da njegova primjena daje uspješne rezultate u cilju ograničenja sklopnih prenapona, uzrokovanih uključenjem dalekovoda, na primjeru jednostavnog elektroenergetskog sistema, da bi u potpunosti bio ispunjen cilj ovog magistarskog rada, tj. izvedeni određeni zaključci kojima će biti dokazane prednosti i opravdana primjena tehnike kontrolisanih operacija prekidača, bilo je neophodno sprovesti istraživanje i simulaciju implementacije razvijenog optimalnog algoritma na

primjeru dijela realnog elektroenergetskog sistema. Stoga je razvijen optimalni algoritam, tj. kontroler, implementiran u okviru jedne trafostanice crnogorskog elektroprenosnog sistema.

U sprovedenoj simulaciji na prethodno navedenom primjeru, implementiran je razvijen optimalni algoritam i izvršena analiza dobijenih rezultata u slučaju kontrolisanog uključenja i kontrolisanog automatskog ponovnog uključenja 110kV DV Podgorica 2 – Budva u TS 400/110kV „Podgorica 2“. Nakon sprovedenog istraživanja i analize dobijenih rezultata, zaključeno je da je simulacija rada kontrolera na primjeru dijela realnog sistema uspješno realizovana, što je potvrđeno primjenom optimalnog algoritma za oba analizirana slučaja kontrolisanog uključenja 110kV DV Podgorica 2 – Budva u TS 400/110kV „Podgorica 2“, u kojima je postignuto značajno ograničenje, tj. spriječena pojava sklopnih prenapona uzrokovanih uključenjem dalekovoda. Samim tim, dokazane su sve prednosti primjene tehnike kontrolisanih operacija u cilju ograničenja sklopnih prenapona uzrokovanih operacijama uključenja dalekovoda, i takođe opravdana primjena ove tehnike i u crnogorskom elektroprenosnom sistemu, kako je to i praksa u brojnim savremenim elektroenergetskim sistemima.

Takođe, i u slučaju simulacije implementacije razvijenog optimalnog algoritma na primjeru dijela crnogorskog elektroprenosnog sistema analizirani su uticaji brojnih faktora od kojih zavisi vrijednost amplitude sklopnih prenapona uzrokovanih uključenjem dalekovoda. Prvi faktor koji je analiziran je jedan od parametara sistema koji utiče na vrijednost amplitude sklopnih prenapona uzrokovanih uključenjem i automatskim ponovnim uključenjem dalekovoda u sprovedenom istraživanju, a to je vrijednost opterećenja 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“.

Da bi se ispitaio uticaj vrijednosti opterećenja 110kV dalekovoda iz TS 400/110kV „Podgorica 2“ na vrijednost amplitude sklopnih prenapona, sprovedeno je istraživanje sklopnih prenapona dobijenih kontrolisanim uključenjem 110kV DV Podgorica 2 – Budva za slučaj različitih vrijednosti aktivnih i reaktivnih opterećenja 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“. Analizom dobijenih rezultata, tj. talasnih oblika napona na kraju 110kV DV Podgorica 2 – Budva za slučaj srednjih, maksimalnih i minimalnih vrijednosti opterećenja 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“, zaključeno je da je vrijednost amplitude dobijenih sklopnih prenapona najveća u slučaju minimalnih vrijednosti opterećenja 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“, a najmanja u slučaju maksimalnih vrijednosti opterećenja 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“. Dakle, sa porastom vrijednosti opterećenja 110kV dalekovoda u TS 400/110kV „Podgorica 2“ smanjuje se vrijednost amplitude dobijenih sklopnih prenapona na kraju 110kV DV Podgorica 2 – Budva.

Nesumnjivo je da primjena tehnike kontrolisanih operacija prekidača ima veliki značaj sa aspekta ograničenja sklopnih prenapona uzrokovanih uključenjem dalekovoda. Dobijeni rezultati u sprovedenim istraživanjima to i dokazuju. Međutim, tokom istraživanja zaključeno je da se prilikom primjene razvijenog optimalnog algoritma u praksi, tj. u stvarnim elektroenergetskim sistemima može naići na određena ograničenja, koja će uticati na dobijene rezultate sklopnih prenapona uzrokovanih uključenjem dalekovoda.

Osnovni zadatak razvijenog optimalnog algoritma je određivanje optimalnog vremenskog trenutka kontrolisanog uključenja prekidača u visokonaponskim razvodnim postrojenjima, kojim se postiže minimum sklopnih prenapona. Međutim, u praksi se

pokazuje, da se iz nekih razloga prekidač neće baš tačno uključiti u optimalnom vremenskom trenutku koji je proračunat optimalnim algoritmom, već će se uključiti nešto ranije ili kasnije.

Prvi razlog za to, a ujedno i prvo ograničenje koje se javlja u praksi tiče se efekta kašnjenja referentnih naponskih signala od jednog ili više semplinga u odnosu na procjenjene optimalne vremenske trenutke uključivanja prekidača. Naime, kao posljedica kašnjenja referentnih naponskih signala usled tehničkih razloga, koje kontroler dobija od naponskih mjernih transformatora doći će do pojave određene greške u određivanju optimalnih vremenskih trenutaka uključivanja prekidača. Samim tim, do uključivanja prekidača neće doći u procjenjenim optimalnim vremenskim trenucima, sa aspekta generisanih sklopnih prenapona, već će se prekidači uključiti nešto kasnije, pri čemu će to zakašnjenje biti u iznosu jednog ili više semplinga zavisno od kašnjenja referentnih naponskih signala.

Da bi se ispitaio uticaj efekta kašnjenja referentnih naponskih signala, za jedan ili više semplinga, na vrijednost amplitude dobijenih sklopnih prenapona, uzrokovanih uključivanjem dalekovoda, sprovedeno je istraživanje na primjeru kontrolisanog uključivanja 110kV DV Podgorica 2 – Budva u TS 400/110kV „Podgorica 2“. Analizom dobijenih rezultata sklopnih prenapona na kraju 110kV DV Podgorica 2 – Budva za slučaj kašnjenja referentnih naponskih signala od jednog, dva i tri semplinga, zaključeno je da je vrijednost amplitude dobijenih sklopnih prenapona uzrokovanih uključivanjem dalekovoda najveća u slučaju vremenskog kašnjenja referentnih naponskih signala u iznosu od tri semplinga, a najmanja u slučaju vremenskog kašnjenja u iznosu od jednog semplinga. Dakle, sa porastom vrijednosti vremenskog kašnjenja referentnih naponskih signala, usled tehničkih razloga, raste i vrijednost amplitude dobijenih sklopnih prenapona, istina, to je povećanje malo, neznatno, ali svakako uočljivo.

Drugo ograničenje koje se može javiti u praksi, prilikom primjene tehnike kontrolisanih operacija prekidača u stvarnim elektroenergetskim sistemima, jeste statistička pojava električnog luka prilikom uključivanja prekidača, tzv. efekat pred-iskrenja. I pored toga što će kontroler na osnovu razvijenog optimalnog algoritma za kontrolisano uključivanje prekidača ispravno odrediti optimalne vremenske trenutke uključivanja i proslijediti ih prekidačima, oni se neće uključiti u tim procjenjenim optimalnim vremenskim trenucima, već nešto ranije. Razlog tome je pojava rasipanja polova prekidača, tj. statistička pojava električnog luka koji se formira prije samog uključivanja prekidača, kao posljedica približavanja kontakata prekidača. Stoga će u praksi biti dobijene nešto veće vrijednosti amplitude sklopnih prenapona uzrokovanih uključivanjem dalekovoda, u poređenju sa onim dobijenim u sprovedenim istraživanjima, za iste ispitivane slučajeve. Koliko će ta vrijednost amplitude biti veća u praksi zavisi od vremena trajanja pred-iskrenja, tj. vremenskog trenutka u kojem će doći do pojave efekta rasipanja polova prekidača.

Da bi se ispitaio uticaj efekta pred-iskrenja na vrijednost amplitude dobijenih sklopnih prenapona uzrokovanih uključivanjem dalekovoda, sprovedeno je istraživanje na primjeru kontrolisanog uključivanja 110kV DV Podgorica 2 – Budva u TS 400/110kV „Podgorica 2“. Poređenjem dobijenih rezultata sklopnih prenapona na kraju 110kV DV Podgorica 2 – Budva za slučaj pojave efekta rasipanja polova prekidača u vremenskim trenucima koji prednjače odgovarajućim optimalnim vremenskim trenucima uključivanja prekidača, tj. za slučajeve pred-iskrenja 0,1ms, 0,2ms i 0,3ms, može se donijeti zaključak da je vrijednost amplitude sklopnih prenapona, uzrokovanih uključivanjem dalekovoda, najveća u slučaju kada do pojave

efekta rasipanja polova prekidača dođe u vremenskim trenucima koji prednjače odgovarajućim optimalnim vremenskim trenucima uključanja prekidača u iznosu od 0,3ms, a najmanja u slučaju kada do pojave efekta rasipanja polova prekidača dođe u vremenskim trenucima koji prednjače optimalnim vremenskim trenucima uključanja prekidača u iznosu od 0,1ms. Dakle, što vremenski trenuci u kojem dolazi do pojave efekta rasipanje polova prekidača više prednjače odgovarajućim optimalnim vremenskim trenucima uključanja prekidača, to će vrijednost amplitude dobijenih sklopnih prenapona uzrokovanih uključanjem dalekovoda biti veća.

Rezultati, koji se odnose na vrijednosti amplituda sklopnih prenapona uzrokovanih uključanjem dalekovoda, dobijeni u svim sprovedenim istraživanjima u okviru ovog rada, kako na primjeru opšteg slučaja, tj. jednog jednostavnog elektroenergetskog sistema, tako i na primjeru simulacije implementacije razvijenog optimalnog algoritma za kontrolisano uključanje dalekovoda u dijelu crnogorskog elektroprenosnog sistema, dokazaju sve, ranije pomenute, prednosti koje se postižu primjenom tehnike kontrolisanih operacija prekidača u cilju ograničenja sklopnih prenapona uzrokovanih uključanjem dalekovoda. Stoga, se može donijeti zaključak da je primjena tehnike kontrolisanih operacija prekidača i više nego poželjna u svim savremenim elektroenergetskim sistemima.

Nakon sprovedenih istraživanja i analize svih dobijenih rezultata u ovom magistarskom radu, mogu se sagledati i definisati pravci mogućih budućih istraživanja. Na osnovu dobijenih rezultata i izvedenih zaključaka jedan od mogućih pravaca budućih istraživanja je uzimanje u obzir složenih pojava i karakteristika električnog luka koji se najčešće javlja u određenim stanjima koja uslovljavaju pojavu sklopnih prenapona uzrokovanih uključanjem dalekovoda. Takođe, kako se razvijeni optimalni algoritam odnosi na slučaj kontrolisanog uključanja i ponovnog uključanja dalekovoda, još jedan od mogućih pravaca budućih istraživanja je određivanje optimalnog algoritma za kontrolisano uključanje transformatora, kondenzatorskih baterija itd., u cilju ograničenja generisanih sklopnih prenapona i u tim slučajevima.

## 9. LITERATURA

- [1] Marija Ćinćur, Vladan Radulović, "Tehnike ograničenja sklopnih prenapona primjenom kontrolisanog uključivanja visokonaponskih prekidača", R C4-08, VI Savjetovanje CG KO CIGRE, maj 2019. Budva
  
- [2] Ljubiša Milanković, "Tehnika visokog napona", Beograd: Elektrotehnički fakultet, 1981.
  
- [3] S. Vujošević, S. Mujović, "Analiza komutacionih prenapona nastalih pri uključivanju jednog ili više vodova pod opterećenjem", Elektrotehnički fakultet Podgorica, Univerzitet Crne Gore, Crna Gora
  
- [4] Ebrahim Babaei, Smko Golabi, Jafar Jafarzadeh, Zaniyar Golabi, "Comprehensive analysis of insertion elements in circuit breaker to reduce switching overvoltages", 24<sup>th</sup> Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering(CCECE), Niagara Falls, Canada, pp.000239 – 000242, 2011.
  
- [5] Davor Preradović, "Zaštita elemenata elektroenergetskih sistema od atmosferskog pražnjenja", Banja Luka: Elektrotehnički fakultet, oktobar 2004.
  
- [6] Petar Vukelja, Jovan Mrvić, Dejan Hrvić, "Istraživanje prenetih prenapona sa višenaponske na niženaponsku stranu blok transformatora 420kV/15,75kV/15,75kV proizvodnje ASEA u HE "Đerdap 1" ", Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd, pp.161-173, 2007.
  
- [7] Vladan Radulović, Sreten Škuletić, "Doprinos proračunu sklopnih prenapona pri uključivanju voda u praznom hodu u mrežama sa skoncentrisanim parametrima", Elektrotehnički fakultet Podgorica, Univerzitet Crne Gore, Crna Gora
  
- [8] A. M. Mahdy, A. El-Morshedy, H. I. Anis, "Insulation failure assessment under random energization overvoltages", Conference record of the 1992 IEEE Industry applications society annual meeting, Vol. 2, pp.1647-1652, 1992.

- [9] S. D. Skuletic, P. Mijajlovic, "Experimental investigations of switching overvoltages in 110kV network of power system of Montenegro", 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, Vol. 2, 2003.
- [10] Vladan Radulović, "Primjena Matlab Simulinka za simuliranje prelaznih procesa pri prenaponima u elektroenergetskim sistemima", R C4-11, V Savjetovanje CG KO CIGRE, maj 2017. Budva
- [11] Sreten Škuletić, "Visokonaponska razvodna postrojenja - predavanja", Podgorica, 2010.
- [12] Milan Savić, Zlatan Stojković, "Tehnika visokog napona", Beograd: Elektrotehnički fakultet, 2001.
- [13] Vjera Popović, "Analiza sklopnih prenapona nastalih isključenjem struja kratkih spojeva sa automatskim ponovnim uključenjem", R C4-03, V Savjetovanje CG KO CIGRE, maj 2017. Budva
- [14] "Prekidači snage", verzija dostupna na [https://sr.wikipedia.org/sr-ec/Прекидачи\\_снаге](https://sr.wikipedia.org/sr-ec/Прекидачи_снаге), datum pristupa: 10./10/2020 godine.
- [15] Krešimir Meštrović, "Stanje i trendovi razvoja visokonaponskih sklopnih aparata u svijetu", R 13-05, Hrvatski komitet međunarodnog vijeća za velike električne sisteme, V Savjetovanje, novembar 2001. Cavtat, Hrvatska
- [16] Stevan Čanović, Luka Kaljević, Miloš Rašković, "Prilog održavanju prekidača snage u okviru crnogorskog elektroprenosnog sistema", R A3-02, V Savjetovanje CG KO CIGRE, maj 2017. Budva
- [17] Hrvoje Požar, "Visokonaponska rasklopna postrojenja", Treće izdanje, Zagreb: Elektrotehnički fakultet, april 1978.
- [18] Vladan Radulović, "Visokonaponska razvodna postrojenja - predavanja", Podgorica, 2019.



- [19] B. Đordan, Z. Ostojić, M. Kilibarda, "Tendencije u razvoju visokonaponskih prekidača", Elektrotehnički fakultet Podgorica, Univerzitet Crne Gore, Crna Gora
- [20] Dan Goldsworthy, Tom Roseburg, Demetrios Tziouvaras, Jeff Pope, "Controlled switching of HVAC circuit breakers: application examples and benefits", 61st Annual Conference for Protective Reley Engineers, pp.520-535, 2008.
- [21] H. Tsutada, T. Hirai, H. Kohyama, H. Ito, K. Sasaki, "Development of synchronous switching controller for gas circuit breakers", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Vol. 2, pp.807-812, 2002.
- [22] Michael Stanek, "Analysis of circuit breaker controlled switching operations – from manual to automatic ", 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), pp.1-6, 2015.
- [23] Yasin I. Musa, Albert J. F. Keri, James A. Halladay, Arjan S. Jagtiani, John D. Mandeville, Bengt Johnnerfelt, Lennart Stenström, Aftab H. Khan, Willie B. Freeman, "Application of 800-kV SF<sub>6</sub> dead tank circuit breaker with transmission line surge arrester to control switching transient overvoltages", IEEE Transactions on power delivery, Vol. 17, No. 4, October 2002.
- [24] Lars Liljestrang, Elisabeth Lindell, "Efficiency of surge arresters as protective devices against circuit breaker induced overvoltages", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 31, pp.1562-1570, 2016.
- [25] Jinliang He, Chen Li, Jun Hu, Rong Zeng, "Deep suppression of switching overvoltages in AC UHV systems using low residual arresters", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, No. 4, pp.2718-2725, October 2011.
- [26] H. B. Thorén, "Reduction of switching overvoltages in EHV and UHV systems", IEEE Summer Power Meeting and EHV Conference, Los Angeles, Calif., July 12-17, 1970.
- [27] S. Zondi, P. Bokoro, B. Paul, "EMTP-based analysis of pre-insertion resistor and point on wave switching methodology", AFRICON 2015, pp.1-5, 2015.
- [28] Jinliang He, Chen Li, Jun Hu, Rong Zeng, Jun Yuan, "Elimination of closing resistors for breakers in 1000-kV UHV system by surge arresters", IEEE

Transactions on Power Delivery, Vol. 27, pp. 2168-2175, 2012.

- [29] Božidar Filipović-Grčić, Ivo Uglešić, Ivica Pavić, Frano Tomašević, Srećko Bojić, Alan Župan, "Smanjenje razina sklopnih prijelaznih elektromagnetskih pojava u 400kV mreži primjenom tehnike kontroliranog sklapanja", Hrvatski ogranak međunarodnog vijeća za velike elektroenergetske sustave - CIGRÉ, 13. savjetovanje HRO CIGRÉ, novembar 2017. Šibenik, Hrvatska
- [30] Constantinos D. Tsirekis, Nikos D. Hatziargyriou, Basil C. Papadias, "Control of shunt reactor inrush currents in the Hellenic-Interconnected power system", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 757-764, april 2005.
- [31] Reza Rohani, Babak Porkar, "Improved EHV line switching surge control via controlled switching technique", Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India, pp. 1-4, 2010.
- [32] Shahram Javadi, Heshmatolah Jamshidi, "Analysis and simulation of switching phenomenon in electrical networks and reduction of its undesirable effects by using close resistance and switch synch controller", Universities' Power Engineering Conference (UPEC), Proceedings of 2011 46th International, pp.1-4, 5-8th September 2011, Soest, Germany
- [33] Paul Stroica, "Modern methods for synchronous switching of circuit-breakers in 400kV substations of the Romanian Power System", 10th Mediterranean Electrotechnical Conference, MEleCon 2000, Vol. 3, pp.949-953, 2000.
- [34] P. Mestas, M.C. Tavares, "A comparison of overvoltage control methods during three-phase reclosing varying the length of shunt compensated transmission lines", IEEE Electrical Power and Energy Conference, pp.352-356, 2011.
- [35] P. Thararak, P. Jirapong, P. Jan-ngoan, "Analysis of switching transient overvoltages and protection techniques for the energization of the connected 115 kV underground and submarine cables ", International Conference and Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development (ICUE), pp.1-6, Jomtien Palm Beach Hotel and Resort, Pattaya City, Thailand, March 2014.
- [36] K. Horinouchi, M. Tsukima, N. Tohya, T. Inoue, H. Sasao, "Synchronous controlled switching by vacuum circuit breaker (VCB) with electromagnetic operation mechanism", IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies (DRFT2004), Vol. 2,

pp.529-534, April 2004. Hong Kong

- [37] Karcus M. C. Dantas, Damsio Fernandes, L. A. Neves, Benemar A. Souza, Luiz C. A. Fonseca, "Mitigation of switching overvoltages in transmission line via controlled switching", IEEE Power and energy society general meeting – conversion and delivery of electrical energy in the 21st century, pp.1-8, 2008.
- [38] MATLAB Simulink, The MathWorks, Inc. , 1994-2010.
- [39] "Objekti CGES-a – Crnogorski elektroprenosni sistem AD", verzija dostupna na <https://www.cges.me/o-nama/karta-prenosnog-sistema/objekti-cges-a>, datum pristupa: 20./11/2020 godine.
- [40] "Facebook – Crnogorski elektroprenosni sistem AD", verzija dostupna na <https://www.facebook.com/CGESofficial/photos/1046439739161447>, datum pristupa: 20./11/2020 godine.
- [41] "Dalekovodna mreža – Crnogorski elektroprenosni sistem AD", verzija dostupna na <https://www.cges.me/o-nama/karta-prenosnog-sistema/dalekovodna-mreza>, datum pristupa: 20./11/2020 godine.
- [42] Elektroenergetski koordinacioni centar d.o.o. – Beograd, Crnogorski elektroprenosni sistem a.d. – Podgorica, "Proračun struja kratkih spojeva u prenosnoj mreži Crne Gore za period 2020. – 2029. godina i mjere za njihovo sniženje", avgust 2019. Beograd
- [43] Novkabel, "Kablovi i provodnici", Novi Sad, Republika Srbija
- [44] Institut "Sigurnost" d.o.o. – Podgorica, "Elaborat procjene uticaja na životnu sredinu br. 13/XII-13", decembar 2013. Podgorica
- [45] Siemens, "SIPROTEC 5, Distance and Line Differential Protection, Breaker Management for 1-Pole and 3-Pole Tripping", Manual C53000-G5040-C011-D, pp.97-107, Edition 08. 2020.