



UNIVERZITET CRNE GORE  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

GORAN ČEVRIZ

**ANALIZA UTICAJA KONFIGURACIJE I POGONA VISOKONAPONSKIH  
RAZVODNIH POSTROJENJA NA KARAKTERISTIKE SKLOPNIH PRENAPONA I  
OPSEG PRIMJENE REPREZENTATIVNIH SKLOPNIH PRENAPONA**

MAGISTARSKI RAD

Podgorica, 2021.

---

## **PODACI O MAGISTRANDU**

**Ime i prezime:** Goran Čevriz

**Datum i mjesto rođenja:** 25.10.1988, Podgorica, Crna Gora

**Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina završetka studija:**  
Elektrotehnički fakultet u Podgorici, Odsjek za Energetiku i Automatiku, 2012.

## **INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU**

**Naziv postdiplomskih studija:** Elektroenergetski sistemi

**Naslov rada:** Analiza uticaja konfiguracije i pogona visokonaponskih razvodnih postrojenja na karakteristike sklopnih prenapona i opseg primjene reprezentativnih sklopnih prenapona

**Fakultet na kojem je rad odbranjen:** Elektrotehnički fakultet Podgorica

## **UDK, OCJENA I ODBRANA MAGISTARSKOG RADA**

**Datum prijave magistarskog rada:** 11.02.2021.

**Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema:** 03.02.2022.

**Komisija za ocjenu teme i podobnosti magistranda:**

Prof. dr Vladan Radulović, ETF Podgorica

Prof. dr Saša Mujović, ETF Podgorica

Prof. dr Zoran Miljanić, ETF Podgorica

**Mentor:** Prof. dr Vladan Radulović, ETF Podgorica

**Komisija za ocjenu rada:**

Prof. dr Saša Mujović, predsjednik,

Prof. dr Vladan Radulović, mentor,

Prof. dr Zoran Miljanić, član.

**Komisija za odbranu rada:**

Prof. dr Saša Mujović, predsjednik,

Prof. dr Vladan Radulović, mentor,

Prof. dr Zoran Miljanić, član.

**Datum odbrane:** 14.02.2022.

**Datum promocije:**

## **Zahvalnica**

Svaka osoba u toku obrazovanja nailazi na nejasnoće i pitanja na koja se teško može odgovoriti bez nečije pomoći. Isto pravilo je važno u mom slučaju, u toku pisanja naučno – istraživačkog rada za potrebe sticanja novih znanja i završetka magistarskih studija. Iz tog razloga koristim ovu priliku da se zahvalim mentoru prof.dr. Vladanu Raduloviću za uspješno i korektno vođenje kroz naučno – istraživački rad, za interesantne i korisne savjete i sugestije tokom osmišljavanja, istraživanja, pisanja i interpretiranja rada iz područja pojave sklopnih prenapona u elektroenergetskom sistemu.

Isto tako, želim se zahvaliti svojim najbližima na bezuslovnoj podršci i strpljenju tokom životnog perioda pisanja magistarskog rada.

Ćevriz Goran,

Podgorica, Crna Gora, oktobar 2021.

## **Životni moto**

*”Ako nešto stvarno želiš, pronaći ćeš način da to ostvariš. Ako ne želiš, naći ćeš izgovor. ”*

*” Trud se isplati, ulažem napore, prihvatam izazove, razvijam se!”*

## Izvod rada

Stalni porast potreba za električnom energijom, kao i izraženi zahtjevi za visokim stepenom sigurnosti i pouzdanosti napajanja doveli su do značajnih promjena u razvoju savremenih elektroenergetskih mreža. Ove promjene su zastupljene kako na nivou konfiguracije mreža, tako i na nivou operativnog upravljanja i primjene savremenih rješenja u eksploataciji. Sa druge strane, one su se neminovno odrazile i na karakteristike prelaznih režima koji se odvijaju u elektroenergetskim mrežama. Stoga je neophodno provjeriti i analizirati uticaj prelaznih procesa, posebno sa aspekta konfiguracije i pogona, na elemente sistema i posebno opreme u visokonaponskim razvodnim postrojenjima. Najčešći uzrok prelaznih procesa sa značajnim promjenama parametara radnog režima su sklopni prenaponi, koji svojim djelovanjem mogu da ugroze izolaciju opreme. Postojeći standardi i propisi definišu reprezentativne talasne oblike kojima se ispituje sposobnost izolacije opreme da podnese ove prenapone. S obzirom na navedene promjene u pogledu konfiguracije i pogona mreža i postrojenja, potrebno je provjeriti da li karakteristike postojećih ispitnih talasa vjerodostojno predstavljaju realne uslove pri sklopnim prenaponima.

Ispitivanja trofaznim komutacijama prekidača izvode se za dobijanje talasnih oblika validacije tranzijentnog modela i za pružanje statističkih podataka o stvarnim prenaponima koji bi se mogli očekivati tokom eksploatacije VN postrojenja. Modelovanje elemenata VN postrojenja vrši se u skladu sa potrebama posmatranih prelaznih procesa. Simulacije procesa u sistemu vršene su u programskom jeziku MATLAB Simulink.

Analizom i poređenjem dobijenih karakteristika talasnih oblika sklopnih prenapona sa karakteristikama reprezentativnih sklopnih prenapona utvrđuje se primjenljivost ispitnih talasa. U cilju dobijanja željenih rezultata, analiza je vršena na TS 110/20 kV "Autoput 1 (Mrke)", za koju je podatke i informacije ustupila kompanija „China Road and Bridge Corporation”.

**Ključne riječi:** visokonaponska razvodna postrojenja, sklopni prenaponi, modelovanje, simulacija.

## Abstract

The constant increase in electricity needs, as well as the pronounced demands for a high degree of security and reliability of power supply have led to significant changes in the development of modern electricity networks. These changes are represented both at the level of network configuration and at the level of operational management and application of modern solutions in exploitation. On the other hand, they inevitably affected the characteristics of the transitional regimes that take place in the electricity networks. Therefore, it is necessary to check and analyze the impact of transient processes, especially from the aspect of configuration and operation, on the elements of the system and especially the equipment in high-voltage substations. The most common cause of transient processes with significant changes in the parameters of the operating mode are switching overvoltages, which by their action can endanger the insulation of the equipment. Existing standards and regulations define representative waveforms with which is tested the insulation ability of equipment to withstand these overvoltages. Given the above changes in terms of configuration and operation of networks and substations, it is necessary to check whether the characteristics of the existing test waves credibly represent the real conditions at switching overvoltages.

Three-phase switching tests are performed to obtain waveforms of validation of the transient model and to provide statistics on the actual overvoltages that could be expected during the operation of the HV substations. Modeling of HV substation elements is performed in accordance with the needs of the observed transition processes. Simulations of process in the system were performed in the MATLAB Simulink programming language.

The applicability of the test waves is determined by the analysis and comparison of the obtained characteristics of the waveforms of switching overvoltages with the characteristics of representative switching overvoltages. In order to obtain the desired results, the analysis was performed on SS 110/20 kV "Autoput 1 (Mrke)", for which data and information were provided by the company "China Road and Bridge Corporation".

**Key words:** High Voltage substation, switching overvoltages, modeling, simulation.

# Sadržaj

1. Uvod .....	1
2. Analiza sklopnih prenapona i uticajnih faktora .....	4
2.1 Uvod.....	4
2.2 Unutrašnji prenaponi.....	5
2.3 Sklopni prenaponi .....	6
2.3.1 Električni luk .....	6
2.3.2 Tehnike uklapanja i prekidanja struje .....	8
2.3.2.1 Prekidanje struje u omskom strujnom krugu .....	10
2.3.2.2 Prekidanje struje u induktivnom strujnom krugu .....	11
2.3.2.3 Prekidanje struje u kapacitivnom strujnom krugu.....	13
2.3.2.4 Prekidanje struje u jednosmjernom strujnom krugu.....	14
2.4 Primjeri nastajanja sklopnih prenapona .....	15
2.4.1 Uključenje voda u praznom hodu.....	17
2.4.2 Isključenje malih kapacitivnih struja .....	20
2.4.2.1 Isključenje neopterećenog dalekovoda.....	23
2.4.2.2 Isključenje neopterećenih kablova.....	25
2.4.2.3 Uključenje i isključenje kondenzatorskih baterija.....	30
2.4.3 Isključenje malih induktivnih struja.....	31
2.4.3.1 Isključenje primarne strane energetskog transformatora u praznom hodu.....	34
2.4.3.2 Isključenje sekundarne strane energetskog transformatora opterećenog radno – induktivnim potrošačem .....	37
2.4.4 Isključenje kvarova .....	39
2.4.4.1 Bliski kratki spoj.....	42
2.4.4.2 Automatsko ponovno uključenje (APU) .....	46
3. Analiza karakterističnih veličina reprezentativnih sklopnih prenapona.....	48
3.1 Uvod.....	48
3.2 Podjela prenapona prema obliku i trajanju – IEC 71-1 .....	48
3.3 Ispitivanje i koordinacija izolacije pri sklopnim prenaponima.....	50
3.4 Karakteristike reprezentativnih sklopnih prenapona .....	53
3.4.1 Koeficijent prenapona .....	55
3.5 Procedura za testiranje sklopnim prenaponima .....	56
4. Modelovanje elemenata sistema za potrebe proračuna sklopnih prenapona.....	57
4.1 Uvod.....	57

4.2 Uvod u Matlab - Simulink .....	57
4.3 Modelovanje u Simulink – u.....	57
4.3.1 Osnovne biblioteke za modelovanje električnih sistema u Simscape – u .....	59
4.4 Simulaciono modelovanje komponenta visokonaponskog razvodnog postrojenja u Matlab Simulink – u.....	62
4.4.1 Naponski izvor .....	63
4.4.2 Trofazni prekidač .....	65
4.4.3 Distributivni SN/NN vod .....	68
4.4.4 Dvonamotajni trofazni transformator.....	72
4.4.5 Simulacioni model opterećenja sabirnice.....	80
4.4.6 Simulacioni model kratkog spoja.....	84
5. Analiza sklopnih prenapona na TS 110 / 20 kV "Autoput 1 - Mrke".....	86
5.1 Uvod.....	86
5.2 Konfiguracija elemenata VN postrojenja Autoput 1 „Mrke” u programskom jeziku Matlab – Simulink.....	90
5.3 Simulacije VN postrojenja Autoput 1 „Mrke” .....	93
5.3.1 Analiza uticaja manipulacije trofaznim prekidačem izvoda „TS Vjeternik” na visinu i trajanje sklopnog prenapona pri otvorenom prekidaču izvoda „TS Smokovac” .....	94
5.3.1.1 Slučaj neopterećenog izvoda „TS Vjeternik” .....	94
5.3.1.2 Slučaj opterećenog izvoda „TS Vjeternik” .....	96
5.3.2 Analiza uticaja manipulacije trofaznim prekidačem izvoda „TS Vjeternik” na visinu i trajanje sklopnog prenapona pri zatvorenom prekidaču izvoda „TS Smokovac” .....	98
5.3.2.1 Slučaj rada VNRP – a u praznom hodu.....	99
5.3.2.2 Slučaj rada VNRP – a pod opterećenjem .....	101
5.3.2.3 Slučaj rada VNRP – a pri neopterećenom izvodu „TS Smokovac” .....	104
5.3.2.4 Slučaj rada VNRP – a pri neopterećenom izvodu „TS Vjeternik” .....	106
5.3.3 Analiza uticaja manipulacije trofaznim prekidačem izvoda „TS Vjeternik” na visinu i trajanje sklopnog prenapona pri zatvaranju prekidača izvoda „TS Smokovac” .....	109
5.3.3.1 Slučaj rada VNRP – a u praznom hodu i zatvaranju prekidača oba izvoda .....	109
5.3.3.2 Slučaj rada VNRP – a pod opterećenjem i zatvaranju prekidača oba izvoda.....	111
5.3.3.3 Slučaj rada VNRP – a pri opterećenom izvodu „TS Vjeternik” u trenutku uklapanja prekidača oba izvoda .....	113
5.3.3.4 Slučaj rada VNRP – a pri opterećenom izvodu „TS Smokovac” u trenutku uklapanja prekidača oba izvoda.....	115
5.4 Simulacije VN postrojenja „Autoput 1 - Mrke” pri zaostalom naponu.....	117



5.4.1 Slučaj rada VNRP – a pod opterećenjem pri neprolaznom i prolaznom kvaru na izvodu „TS Vjeternik" i otvorenom prekidaču izvoda „TS Smokovac" .....	119
5.4.2 Slučaj rada VNRP – a pod opterećenjem pri neprolaznom i prolaznom kvaru na izvodu „TS Vjeternik" i zatvorenom prekidaču izvoda „TS Smokovac" .....	121
5.4.3 Slučaj rada VNRP – a u praznom hodu pri neprolaznom i prolaznom kvaru na izvodu „TS Vjeternik" i otvorenom prekidaču izvoda „TS Smokovac" .....	123
5.4.4 Slučaj rada VNRP – a u praznom hodu pri neprolaznom i prolaznom kvaru na izvodu „TS Vjeternik" i zatvorenom prekidaču izvoda „TS Smokovac" .....	124
5.4.5 Slučaj rada VNRP – a pri neprolaznom i prolaznom kvaru na opterećenom izvodu „TS Vjeternik" i pri zatvorenom prekidaču neopterećenog izvoda „TS Smokovac" .....	126
5.4.6 Slučaj rada VNRP – a pri neprolaznom i prolaznom kvaru na neopterećenom izvodu „TS Vjeternik" i pri zatvorenom prekidaču opterećenog izvoda „TS Smokovac" .....	128
5.5 Analiza rezultata i grafički prikaz simulacija VN postrojenja „Autoput 1 - Mrke" .....	131
6. Zaključak .....	137
7. Literatura .....	139

## Sadržaj slika

Slika 2.1: Sklopni prenapon dobijen simulacijom SN voda izražen u relativnim jedinicama .....	6
Slika 2.2: U - I karakteristika pražnjenja u gasovima.....	7
Slika 2.3: Temperatura električnog luka u zavisnosti od udaljenosti od jezgra .....	8
Slika 2.4: Promjena struje luka, napona luka i napona mreže prije konačnog gašenja luka za strujni krug sa radnom otpornosti ( $\cos\varphi = 1$ ) .....	10
Slika 2.5: Promjena struje luka, napona luka i napona mreže prije konačnog gašenja luka za strujni krug sa induktivnim otporom ( $\cos\varphi = 0$ ).....	11
Slika 2.6: Promjena napona između kontakata nakon gašenja električnog luka .....	12
Slika 2.7: Kriterijum nestabilnosti električnog luka za jednosmjerni strujni krug.....	14
Slika 2.8: Ekvivalentna šema za proračun sklopnih prenapona pri uključenju voda u praznom hodu .....	17
Slika 2.9: Maksimalni prenapon pri uključenju voda u praznom hodu.....	19
Slika 2.10: Ekvivalentna šema za proračun sklopnih prenapona pri isključivanju .....	21
Slika 2.11: Grafički prikaz napona i struja u kolu pri isključenju.....	21
Slika 2.12: Grafički prikaz oblika napona za najkritičniji slučaj isključenja .....	23
Slika 2.13: Grafički prikaz prenapona izazvanih ponovnim paljenjem električnog luka.....	24
Slika 2.14: Ekvivalentna šema strujnog kruga neopterećenog kabla .....	25
Slika 2.15: Jednopolna šema strujnog kruga sa uređajem za uključenje kondenzatora .....	30
Slika 2.16: Grafički prikaz isključenja malih induktivnih struja.....	32
Slika 2.17: Ekvivalentna šema za proračun sklopnih prenapona pri isključenju .....	32
Slika 2.18: Ekvivalentna šema isključenja neopterećenog transformatora .....	34
Slika 2.19: Ekvivalentna šema transformatora sa odabranim smjerovima struja.....	36
Slika 2.20: Ekvivalentna šema energetskog transformatora opterećenog prigušnicom .....	37
Slika 2.21: Ekvivalentna šema za proračun prenapona pri isključenju kratkog spoja .....	40
Slika 2.22: Grafički prikaz prenapona koji se javlja pri isključenju kratkog spoja.....	41
Slika 2.23: Šematski prikaz bliskog kratkog spoja.....	43
Slika 2.24: Ekvivalentna šema strujnog kruga .....	44
Slika 2.25: Povratni napon pri bliskom kratkom spoju .....	45
Slika 3.1: Karakteristika čvrstoće izolacije za samoobnovljivu izolaciju .....	51
Slika 3.2: Karakteristika čvrstoće izolacije za nesamoobnovljivu izolaciju .....	52
Slika 3.3: Grafički prikaz vremenskih karakteristika talasnog oblika sklopnih prenapona .....	54
Slika 3.4: Standardni talasni oblik reprezentativnog sklopnog prenapona.....	55
Slika 4.1: Elementi Simulink - ove biblioteke Sources.....	58
Slika 4.2: Elementi Simulink - ove biblioteke Sinks .....	58
Slika 4.3: Izlazni signal na osciloskopu .....	59
Slika 4.4: Simscape/Electrical/Specialized Power Systems biblioteka.....	60
Slika 4.5: Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Fundamental Blocks/Elements biblioteka .....	61

Slika 4.6: Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Fundamental Blocks/Measurement biblioteka .....	62
Slika 4. 7: Blok simulacionog modela naponskog izvora .....	63
Slika 4.8: Parametrizacija naponskog izvora.....	64
Slika 4.9: Visokonaponski SF6 (3API – FG 145 kV) prekidač.....	65
Slika 4.10: Vakuumski (SN) prekidač.....	66
Slika 4.11: Blok simulacionog modela trofaznog prekidača.....	67
Slika 4.12: Parametrizacija trofaznog prekidača .....	67
Slika 4.13: Simulacioni modeli voda sa distribuiranim parametrima .....	68
Slika 4.14: Parametrizacija simulacionog bloka voda sa distribuiranim parametrima.....	69
Slika 4.15: Simulacioni modeli voda sa distribuiranim parametrima .....	71
Slika 4.16: Parametrizacija simulacionog bloka voda sa distribuiranim parametrima.....	71
Slika 4.17: Trofazni transformator VNRP – a.....	73
Slika 4.18: Ekvivalentna šema trofaznog transformatora.....	74
Slika 4.19: Simulacioni blok trofaznog dvonamotajnog transformatora.....	77
Slika 4.20: Parametrizacija simulacionog bloka trofaznog dvonamotajnog transformatora.....	78
Slika 4.21: Konfiguracija uzemljenja transformatora .....	79
Slika 4.22: Simulacioni RLC blok trofaznog opterećenja sa .....	80
Slika 4.23: Parametrizacija RLC simulacionog bloka trofaznog opterećenja .....	81
Slika 4.24: Konfiguracija uzemljenja simulacionog modela trofaznog opterećenja .....	82
Slika 4.25: Konfiguracija tokova snaga simulacionog modela trofaznog opterećenja.....	83
Slika 4.26: Simulacioni blok trofaznog kvara .....	84
Slika 4.27: Parametrizacija simulacionog bloka trofaznog kvara .....	85
Slika 5.1: Visokonaponsko razvodno postrojenje 110/20 kV „Autoput 1 - Mrke".....	88
Slika 5.2: Građevinski objekat TS 20/0,4 kV .....	88
Slika 5.3: Ekvivalentna šema VN postrojenja 110/20 kV „Autoput 1 - Mrke" .....	89
Slika 5.4: Model VN postrojenja „Autoput 1 – Mrke" – Simulink; prazan hod .....	93
Slika 5.5: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik" (simulacije broj 1.1, 1.2 i 1.3).....	95
Slika 5.6: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac" (simulacije broj 1.1, 1.2 i 1.3) .....	95
Slika 5.7: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacije broj 1.1, 1.2 i 1.3).....	96
Slika 5. 8: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik" (simulacije broj 3.1, 3.2, 3.3) .....	97
Slika 5. 9: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac" (simulacije broj 3.1, 3.2, 3.3).....	97
Slika 5.10: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacije broj 3.1, 3.2, 3.3).....	98
Slika 5. 11: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik" (simulacije broj 2.1, 2.2 i 2.3) .....	100
Slika 5.12: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac" (simulacije broj 2.1, 2.2 i 2.3) .....	100
Slika 5.13: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacije broj 2.1, 2.2 i 2.3).....	101
Slika 5. 14: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik" (simulacije broj 4.1, 4.2 i 4.3) .....	102
Slika 5. 15: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac" (simulacije broj 4.1, 4.2 i 4.3) .....	103
Slika 5. 16: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacije broj 4.1, 4.2 i 4.3).....	103
Slika 5. 17: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik" (simulacije broj 5.2 i 5.3) .....	105

Slika 5. 18: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac" (simulacije broj 5.2 i 5.3) .....	105
Slika 5. 19: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacije broj 5.2 i 5.3).....	106
Slika 5. 20: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik" (simulacije broj 6.2 i 6.3) .....	107
Slika 5. 21: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac" (simulacije broj 6.2 i 6.3) .....	108
Slika 5. 22: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacije broj 6.2 i 6.3).....	108
Slika 5. 23: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik" (simulacija broj 1.4) .....	110
Slika 5. 24: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac" (simulacija broj 1.4).....	110
Slika 5. 25: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacija broj 1.4).....	111
Slika 5.26: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik" (simulacija broj 3.4) .....	112
Slika 5. 27: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac" (simulacija broj 3.4).....	112
Slika 5.28: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacija broj 3.4).....	113
Slika 5. 29: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik" (simulacija broj 5.1) .....	114
Slika 5.30: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac" (simulacija broj 5.1).....	114
Slika 5.31: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacija broj 5.1).....	115
Slika 5. 32: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik" (simulacija broj 6.1) .....	116
Slika 5. 33: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac" (simulacija broj 6.1).....	116
Slika 5.34: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacija broj 6.1).....	117
Slika 5.35: Model VN postrojenja „Autoput 1 – Mrke" – Simulink; zaostali napon.....	119
Slika 5.36: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik" (simulacije broj 7.1 i 7.2) .....	120
Slika 5. 37: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacije 7.1 i 7.2) .....	120
Slika 5.38: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik" (simulacija broj 7.4) .....	121
Slika 5. 39: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac" (simulacija broj 7.4).....	122
Slika 5.40: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacija broj 7.4).....	122
Slika 5. 41: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik" (simulacija broj 8.1) .....	123
Slika 5. 42: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacija broj 8.1).....	124
Slika 5. 43: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik" (simulacija broj 8.4) .....	125
Slika 5. 44: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac" (simulacija broj 8.4).....	125
Slika 5. 45: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacija broj 8.4).....	126
Slika 5. 46: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik" (simulacija broj 9.2) .....	127
Slika 5. 47: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac" (simulacija broj 9.2).....	127
Slika 5.48: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacija broj 9.2).....	128
Slika 5. 49: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik" (simulacija broj 10.1) .....	129
Slika 5. 50: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac" (simulacija broj 10.1).....	129

Slika 5. 51: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacija broj 10.1).....	130
Slika 5. 52: Grafički prikaz maksimalnih amplituda prenapona .....	136

## Sadržaj tabela

Tabela 3.1: Prenaponi i ispitivanja .....	49
Tabela 4.1: Ulazni parametri naponskog izvora .....	63
Tabela 4.2: Ulazni parametri trofaznog prekidača .....	68
Tabela 4.3: Ulazni parametri SN/NN voda .....	69
Tabela 4.4: Izračunati koncentrisani parametri SN/NN voda .....	72
Tabela 4.5: Ulazni i koncentrisani parametri trofaznog dvonamotajnog transformatora.....	80
Tabela 4.6: Ulazni parametri trofaznog opterećenja SN/NN sabirnice .....	83
Tabela 5.1: Tehničke informacije visokonaponskog postrojenja .....	87
Tabela 5.2: Parametrizacija naponskog izvora .....	90
Tabela 5.3: Parametrizacija 110 kV – nog trofaznog prekidača .....	90
Tabela 5.4: Parametrizacija 20 kV – nog trofaznog prekidača.....	91
Tabela 5.5: Ulazni parametri SN voda .....	91
Tabela 5.6: Parametrizacija trofaznog dvonamotajnog transformatora.....	92
Tabela 5.7: Parametrizacija trofaznog opterećenja.....	92
Tabela 5.8: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik“ – simulacije 1.1, 1.2 i 1.3 .....	96
Tabela 5. 9: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik“ – simulacije 3.1, 3.2 i 3.3 .....	98
Tabela 5. 10: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik“ – simulacije 2.1, 2.2 i 2.3 .....	101
Tabela 5. 11: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik“ – simulacije 4.1, 4.2 i 4.3 .....	104
Tabela 5. 12.: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik“ – simulacije 5.2 i 5.3 .	106
Tabela 5. 13.: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik“ – simulacije 6.2 i 6.3 .	109
Tabela 5. 14: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik“ – simulacija 1.4 .....	111
Tabela 5. 15: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik“ – simulacija 3.4 .....	113
Tabela 5. 16: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik“ – simulacija 5.1 .....	115
Tabela 5. 17: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik“ – simulacija 6.1 .....	117
Tabela 5. 18: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik“ – simulacije 7.1 i 7.2 ..	121
Tabela 5. 19: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik“ – simulacije 7.3 i 7.4 ..	123
Tabela 5. 20: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik“ – simulacije 8.1 i 8.2 ..	124
Tabela 5. 21: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik“ – simulacije 8.3 i 8.4 .	126
Tabela 5. 22: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik“ – simulacije 9.1 i 9.2 ..	128
Tabela 5. 23: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik“ – simulacije 10.1 i 10.2 .....	130
Tabela 5. 24: Simulacije VN postrojenja „Autoput 1 – Mrke“ .....	131
Tabela 5. 25: Maksimalne vrijednosti amplitude prenapona simulacija VN postrojenja „Autoput 1 – Mrke“ .....	135

## **Lista skraćenica**

VNRP – Visokonaponsko razvodno postrojenje

EES – Elektroenergetski sistem

IEC – International Electrotechincal Commission

VVN – vrlo visoki napon

VN – visoki napon

SN – srednji napon

NN – niski napon

NF – niskofrekventni

VF – visokofrekventni

APU – automatsko ponovno uključenje

ems – elektromotorna sila

SF6 – sumporni heksafluorid

VFT – Very Fast Transient

BSL – Basic Switching Insulation Level

CFO – Critical Flashover voltage

## **1. Uvod**

Visokonaponska razvodna postrojenja (VNRP) su postrojenja koja omogućavaju transformaciju i/ili distribuciju električne energije u elektroenergetskim sistemima. Svaki VNRP ima definisan nazivni napon mreže, koji predstavlja konvencionalnu vrijednost napona po kome je nazvana mreža. Pored nazivnog, definiše se i najviši napon mreže koji predstavlja najvišu vrijednost napona koja se u normalnim pogonskim uslovima javlja u bilo kom trenutku i u bilo kojoj tački mreže. Nazivni i najviši napon utvrđeni su standardima. Postoje tri standardizovana niza nazivnih napona, dok po preporukama Internacionalne elektrotehničke komisije (IEC) preporučuje se samo jedan niz najviših napona. U Crnoj Gori prenos električne energije se vrši na naponskim nivoima 400, 220 i 110 kV, uključujući i niženaponske strane transformatora 110/35, 110/20 i 110/10 kV. Najviši naponi za pomenute naponske nivoe su 420 kV, 242 kV, 121 kV, dok su za SN nivo 38 kV, 24 kV i 12 kV. [1]

Sva oprema u visokonaponskim razvodnim postrojenjima treba da bude odabrana tako da sigurno i bez kvara ispunjava svoju ulogu ne samo u normalnim pogonskim stanjima, nego i tokom havarijskih stanja u određenom vremenskom trajanju, kako ne bi nastanak takvih stanja (koja su najčešće slučajnog karaktera) izazivala prekid rada u postrojenju i posljedično u ostalom dijelu elektroenergetskog sistema. Iz tog razloga se u toku projektovanja treba obratiti posebna pažnja na negativne uticaje i konfigurirati oprema VNRP-a koja zadovoljava propisane kriterijume.

Podatak o najvišem naponu mreže služi za utvrđivanje nivoa izolacije. Međutim, nije dovoljno definisati samo najviši napon mreže, jer se nerijetko pojavljuju znatno viši naponi zbog prelaznih pojava (pri uklapanju, isklapanju, atmosferskim pražnjenjima i sl.), pa izolacija mora biti sposobna da izdrži i znatno više napone. U suprotnom, svaka pojava izazivala bi kvar u postrojenju. Koordinacija izolacije predstavlja izbor izolacione čvrstoće opreme u odnosu na napone koji se mogu javiti u mreži, pri čemu se sagledavaju kako tehnički, tako i ekonomski aspekti. Stepen izolacije odgovara najvišem naponu mreže.

Svako povećanje napona iznad najvišeg napona opreme naziva se prenaponom. Pojava prenapona u EES – u je vrlo česta i može ozbiljno ugroziti njegovu eksploataciju. Prema uzroku nastanka prenapona se dijele na spoljašnje (atmosferske) i unutrašnje prenapone. Spoljašnji prenaponi nastaju usljed atmosferskog pražnjenja, dok su uzrok nastanka unutrašnjih prenapona poremećaji koji se javljaju u samom sistemu. Unutrašnji prenaponi se prema svom nastanku mogu podijeliti na komutacione, rezonantne, ferorezonantne i prenapone izazvane intermitentnim gorenjem luka. Sklopni prenaponi uzrokovani su uklapanjem ili isklapanjem djelova sistema ili opterećenja, gubitkom opterećenja, nastankom ili uklanjanjem kvara. Oni mogu imati značajan uticaj na oštećenje opreme. Sklopni prenaponi zavise od velikog broja uticajnih faktora kao što su konfiguracija i parametri elemenata sistema, karakteristika sklopne opreme, itd. Razvojem elektroenergetskih sistema u pogledu sigurnosti, stabilnosti, pouzdanosti i ekonomičnosti napajanja doveo je do značajnih promjena izvedbi VNRP – a.

U cilju sprečavanja opasnih radnih stanja i kvarova tokom eksploatacije elektroenergetskih sistema, propisi i standardi definišu proceduru naponskog ispitivanja izolacije visokonaponske



opreme. Ispitivanje sposobnosti izolacije elemenata EES – a da izdrži određene vrijednosti i karakteristike prenapona vrši se definisanim standardnim (reprezentativnim) prenaponskim talasima. U okviru ovih procedura predviđeno je ispitivanje i standardnim ispitnim sklopnim prenaponima koji predstavljaju najvažniji kriterijum pri projektovanju izolacije opreme. Karakteristike reprezentativnih sklopnih prenapona (amplituda, strmina, vrijeme čela/začelja, itd.) definisane su preko standardizovanih talasnih prenapona.

Problemi sa pojavom sklopnih prenapona doveli su do tehničkih i ekonomskih problema zbog uvođenja dodatne prenaponske zaštite, boljih elektroničkih uređaja koji su otporniji na veće elektromagnetske smetnje, kao i dodatne zaštite kablova i senzora. [2] Stvoreni su preduslovi za kontinuirani nadzor prekidača u realnom vremenu, rastavljača, naponskih i strujnih mjernih transformatora, zemljospojnika i odvodnika prenapona. U svrhu ispitivanja izdržljivosti energetske primarne i sekundarne opreme koriste se generatori sklopnih visokonaponskih impulsa.

Predmet istraživanja ovog magistarskog rada su sklopni prenaponi koji nastaju u visokonaponskim razvodnim postrojenjima. S obzirom na to da se sklopne operacije veoma često sprovode u EES-u kako u normalnom, tako i u havarijskim režimima rada, to je pojava sklopnih prenapona jedan od najčešćih uzroka koji napreže izolaciju opreme i posljedično može da dovede do njenog oštećenja, pojave kvarova i prekida u napajanju potrošača električnom energijom. Iz toga razloga potrebno je da oprema u postrojenjima ima sposobnost da izdrži određene vrijednosti i karakteristike sklopnih prenapona. Ova se sposobnost utvrđuje prijemnim ispitivanjem opreme primjenom reprezentativnih sklopnih prenapona. Cilj istraživanja je analiza dobijenih karakteristika talasnih oblika sklopnih prenapona, pri čemu je moguće vršiti poređenje i utvrditi primjenljivost ispitnih talasa. Ispitivanja trofaznim komutacijama prekidača izvode se za dobijanje talasnih oblika validacije tranzijentnog modela i za pružanje statističkih podataka o stvarnim prenaponima koji bi se mogli očekivati tokom eksploatacije VNRP - a. Time je omogućena provjera zavisnosti parametara sklopnih sistema, kao i provjera konfiguracije VNRP-a.

Magistarski rad se sastoji iz sedam poglavlja. Nakon opšteg uvoda u temu, koji predstavlja prvo poglavlje, u drugom poglavlju je izvršena analiza i nastanak prenapona, sa koncentracijom na pojavu sklopnih prenapona i uticajnih faktora. S tim u vezi, poglavlje obuhvata podjelu prenapona, detaljnu analizu prekidanja struja u različitim tipovima strujnih krugova, kao i primjere nastajanja sklopnih prenapona. U trećem poglavlju je izvršena analiza karakterističnih veličina i podjela prenapona prema standardu IEC 71 – 1. Naponi i prenaponi su klasifikovani prema obliku i trajanju, i svrstani u posebne klase. Osim toga, u ovom poglavlju je opisana procedura ispitivanja koordinacije izolacije sklopnim prenaponima. U četvrtom poglavlju je dat detaljan opis za simulaciono modelovanje elemenata visokonaponskog razvodnog postrojenja uz pomoć programskog jezika Matlab – Simulink. Svaki element postrojenja ima specifičnu konfiguraciju koju je potrebno podesiti shodno definisanoj opremi koja je sastavni dio postrojenja. Iz tog razloga su svi blokovi ilustrovani, a parametri koje je potrebno konfigurirati prikazani tabelarno. U petom poglavlju je prikazan način modelovanja i parametrizacija karakterističnih elemenata za realni sistem TS 110/20 kV "Autoput 1 – Mrke" u pomenutom programskom jeziku. Osim toga, izvršena je analiza rezultata koji se odnose na visinu amplitude i ostale karakteristike sklopnih prenapona

dobijenih simuliranjem mogućih situacija realnog sistema. Na kraju su dati odgovarajući zaključci i spisak korištene literature.

## **2. Analiza sklopnih prenapona i uticajnih faktora**

### **2.1 Uvod**

Elektroenergetske mreže naizmjeničnog napona označavaju se prema naponskom nivou tkzv. nazivnim naponom. Nazivni napon trofazne elektroenergetske mreže predstavlja međufaznu efektivnu vrijednost napona. Za svaku mrežu se definiše najviši napon mreže, koji predstavlja dozvoljenu vrijednost radnog napona koji smije da se pojavi u normalnom pogonu u mreži.[3]

Najviši napon opreme predstavlja efektivnu vrijednost međufaznog napona za koji je oprema konstruisana i može normalno da funkcioniše. Svako povećanje napona iznad najvišeg napona opreme naziva se prenaponom. Prenapon predstavlja napon između faznog provodnika i zemlje ili između faza, čija tjemena vrijednost prelazi odgovarajuću tjemenu vrijednost najvišeg napona opreme. Svaka vrsta prenapona napreže izolaciju na poseban način.

Klasifikacija napona i prenapona se vrši prema njihovom obliku i trajanju, koju je međunarodna elektrotehnička komisija definisala standardom IEC 60071 – 1. Shodno tome, ima se trajni napon pogonske frekvencije, privremeni prenapon, prelazni (komutacioni) prenapon i kombinovani prenapon. Detaljna analiza pomenutih prenapona je prikazana u sljedećem poglavlju magistarskog rada.

U prelazne prenapone spadaju sklopni, atmosferski i vrlo brzi (eng. VFT - Very Fast Transient) prenaponi. Ova vrsta prenapona može imati značajan uticaj na oštećenje mjerne opreme i pogonskih uređaja visokonaponskih postrojenja, ili na onemogućavanje sklopnih operacija.

Prenaponi se prema uzroku nastanka dijele na spoljašnje (atmosferske) i unutrašnje prenapone. Unutrašnji prenaponi nastaju usljed poremećaja u samom sistemu. [4]

Za odvajanje opreme pod naponom, ili opreme koja radi pod različitim naponima koristi se izolacija. Ona se projektuje da može trajno da radi pri najvišem naponu opreme. Pri pojavi prenapona dolazi do tkzv. naprezanja izolacije. Naprezanje izolacije zavisi od amplitude prenapona, njegovog talasnog oblika i trajanja.

Da bi se izolacija opreme zaštitila od prenapona primjenjuje se koordinacija izolacije. Ona predstavlja izbor izolacione čvrstoće opreme u odnosu na napone koji se mogu javiti u mreži u kojoj je oprema ugrađena, odnosno koordinacija izolacije predstavlja složeni postupak usklađivanja izolacionih karakteristika pojedina opreme sa zaštitnim karakteristikama zaštitnih uređaja (npr odvonika prenapona), pri čemu se vodi računa kako o tehničkim tako i o ekonomskim aspektima.

## **2.2 Unutrašnji prenaponi**

Unutrašnji prenaponi se javljaju u električnim mrežama usljed prelaznih procesa čiji je uzrok u samoj mreži. Unutrašnji prenaponi zavise od elektrostatičke i elektromagnetne energije koja se nalazi u samom sistemu, što daje mogućnost ( za razliku od atmosferskih prenapona) da se njegova visina unaprijed procijeni.

Unutrašnji prenaponi se prema svom nastanku mogu podijeliti na komutacione, rezonantne, ferorezonantne i prenapone izazvane intermimentnim gorenjem luka.

Komutacioni prenaponi su prenaponi koji nastaju pri naglim promjenama režima u kolu, odnosno pri komutacijama prekidača. S obzirom na to da su induktivnost i kapacitivnost inercioni elementi, tj. elementi koji ne dozvoljavaju trenutnu promjenu režima, svaka brža promjena režima rada na njima izaziva prelazni proces.

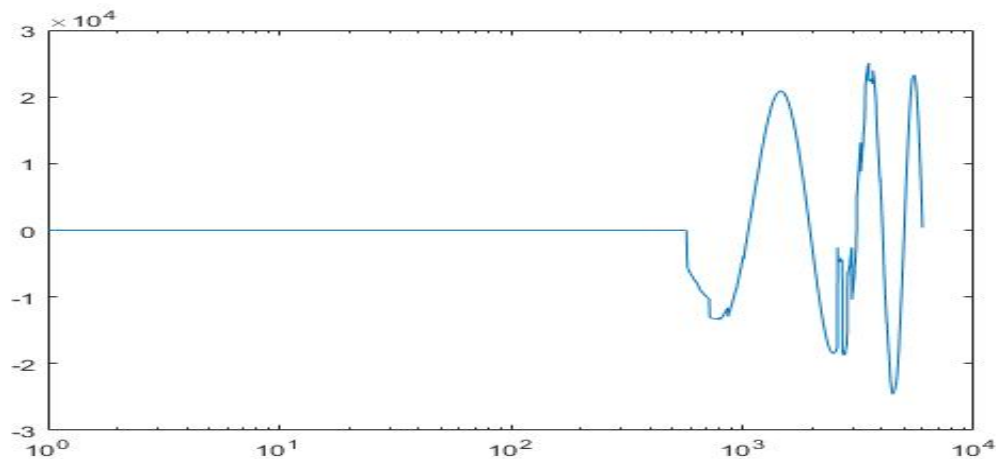
Rezonantni prenaponi su prenaponi koji nastaju u mreži čija je sopstvena frekvencija približna prinudnoj frekvenciji izvora.[5] Pri pojavi električne rezonanse, pod određenom frekvencijom u električnom krugu, dolazi do oscilovanja s ekstremno velikom ili ekstremno malom strujnom amplitudom. Pojam rezonanse je povezan sa porastom intenziteta oscilacija kada se frekvencija spoljašnje sile, koja prouzrukuje oscilovanje, podudara sa rezonantnom frekvencijom sistema. Kombinacijom visokih induktivnosti (relativno oslabljen energetski sistem) i visokih kapacitivnosti (dugi vodovi i kablovi) dovodi do niže rezonantne frekvencije, čime se povećava mogućnost za pojavom prenapona. U stanju normalnog pogona, rezonantna frekvencija može biti znatno manja od pogonske frekvencije.

Ferorezonantni prenaponi su prenaponi koji nastaju u mrežama koje sadrže nelinearna oscilatorna kola sastavljena od nelinearnih induktivnosti magnećenja transformatora i kapacitivnosti. Ferorezonansa predstavlja naglu promjenu stanja koja izaziva prelazne pojave s oscilovanjem energije u strujnom krugu, pri čemu nastaju prenaponi. Mogu je izazvati kapacitivnosti voda i nelinearne induktivnosti.[6] Promjena napona nelinearne induktivnosti s povećanjem struje određena je krivom magnetizacije željeza, dok je napon na kapacitivnosti linearno proporcionalan struji. Pri velikim strujama napon na kapacitivnosti je veći od napona na induktivnosti, dok je kod malih struja situacija obrnuta.

Pod prenaponima nastalim intermimentnim gorenjem luka podrazumijevaju se pojave koje najčešće nastaju pri zemljospoju preko električnog luka na mjestu kvara, a pri svakom povećanju napona na mjestu kvara dolazi do ponovnog paljenja luka. Ove vrste prelaznih procesa izazivaju najopasnije prenapone koji mogu relativno dugo da traju.

## 2.3 Sklopni prenaponi

Sklopni prenaponi uzrokovani su uklapanjem ili isklapanjem djelova sistema ili opterećenja, gubitkom opterećenja, nastankom ili uklanjanjem kvara. Vjerovatnoća njihovog nastanka zavisi od broja kvarova i sklopnih operacija u sistemu. Oni mogu imati značajan uticaj na oštećenje opreme i pogonskih uređaja, ili na samo onemogućavanje vršenja sklopne operacije. Sklopni prenaponi spadaju u prelazne prenapone koji nakon dvije ili tri periode oscilovanja prelaze u stabilno stanje (napon pogonske frekvencije 50 Hz). Sklopni prenaponi predstavljaju najvažniji kriterijum na kojima se temelji projektovanje izolacije visokonaponskih postrojenja. Sama sklopna operacija ima za posljedicu promjenu u konfiguraciji određenog strujnog kruga i sa tim krugom povezana je promjena pripadajućeg prenapona. Primjer tipičnog sklopnog prenapona prikazan je na slici 2.1. Amplituda i talasni oblik sklopnog prenapona zavisi od preciznosti zatvaranja prekidača tokom sinusoidalnog napona pogonske frekvencije.

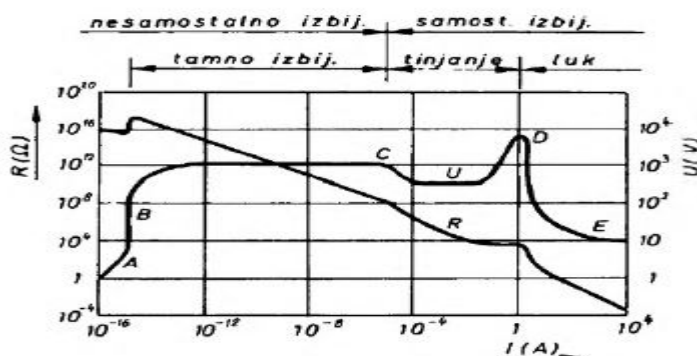


Slika 2.1: Sklopni prenapon dobijen simulacijom SN voda izražen u relativnim jedinicama

### 2.3.1 Električni luk

Sklopnim prenaponima prethodi električni luk. Električni luk je kratkotrajna pojava uzrokovana samostalnim pražnjenjem elektriciteta između dvije elektrode. Do njegovih prvih otkrića došlo se početkom 19. vijeka, ali zbog složenosti eksperimentalnih istraživanja, još mnoga pitanja iz teorije električnog luka nisu ni do današnjeg dana razjašnjena.[7]

Električni luk karakteriše visoka temperatura i velika gustina struje, pojava usijane katodne mrlje sa jakom termoelektronskom i fotoelektronskom emisijom, kao i opadajućom U-I karakteristikom (slika 2.2). Poznavanje njegovih svojstava je od velike važnosti kako bi se u svrsi djelovanja sklopnih aparata iskoristile prednosti, a ograničile mane.

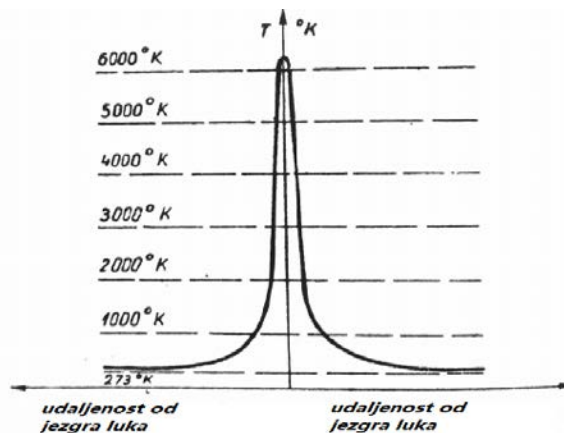


Slika 2.2: U - I karakteristika pražnjenja u gasovima

Vazduh i drugi gasovi smatraju se odličnim izolatorima. Izloženost djelovanju spoljašnjih jonizatora kao što su kosmički zraci, ultravioletna svjetlost i slično, u gasu među elektrodama stvaraju određenu količinu nosilaca elektriciteta u jedinici vremena. Dok je električno polje slabo, ne dopijevaju svi nosioci elektriciteta do elektroda, ali njegovim jačanjem sve veći broj se usmjerava ka elektrodama, prilikom čega dolazi do proporcionalnog povećanja struje sa naponom, što na slici 2.2 predstavlja početni dio karakteristike do tačke A.[8] Približno konstantan iznos struje zasićenja se zadržava u dijelu između tački A i B, jer spoljašnji jonizator ne stvara dovoljno nosilaca za dalji rast struje. Povećanjem napona u području BC dolazi do ubrzanja dijela slobodnih elektrona i jona u električnom polju, pri čemu se usljed jonizacije počinju stvarati novi nosioci elektriciteta. Posljedica toga je pojava sopstvenog mehanizma udarne jonizacije koji se pridružuje djelovanju spoljašnjeg jonizatora. Ovaj dio krive, tj do tačke C predstavlja nesamostalno pražnjenje naelektrisanja koje se može prekinuti otklanjanjem spoljašnjeg jonizatora.

Daljim povećanjem provodnosti, u tački C započinje samostalno pražnjenje naelektrisanja koje je praćeno svjetlosnim efektima. Kod samostalnog pražnjenja prvo dolazi do pojave tinjavog pražnjenja. Ono predstavlja stanje u kojem se provođenje struje može odvijati bez prisustva nove energije iz okoline. Za tinjavo pražnjenje je karakteristična pojava plave svjetlosti uz površinu elektroda i tiho zujanje uz miris ozona. Daljim povećanjem napona dolazi do pramenastog pražnjenja, koje predstavlja pojavu vlaknastih pramenova oko površine elektroda koji ne dostižu do susjedne elektrode. U tački D nastaje preskok između elektroda, u obliku iskre, koje pri dovoljno jakom izvoru struje prelazi u električni luk, praćen praskom. Iskra je završni stepen pražnjenja, pri čemu se između dva preskoka dielektrik brzo obnavlja. Električni luk predstavlja trajni proboj dielektrika, prilikom čega dolazi do znatnog zagrijavanja površine elektroda, velikog povećanja gustine struje i znatnog pada napona na katodi (na desetak volti).

Snaga i energija koja se gorenjem luka pretvara u toplotu, zavisi od pada napona u luku, njegove struje i trajanja luka. Razvijena toplota može uzrokovati velika mehanička i termička naprezanja: zavarivanje kontakata, oštećenje izolacije, zagrijavanje gasova, itd. Najviše temperature su prisutne u jezgru električnog luka, dok se udaljavanjem od jezgra naglo smanjuju (slika 2.3).



Slika 2.3: Temperatura električnog luka u zavisnosti od udaljenosti od jezgra

Električni luk je neizostavna pojava. On omogućava da se magnetna energija koja se akumulira u induktivnostima strujnog kruga jednim dijelom potroši u toplotnu energiju luka. Teoretski posmatrano, ako dođe do trenutnog prekida struje, to znači da luk nije ni nastao, što dovodi do beskonačno velike vrijednosti prenapona. Kako bi se energija luka svela na najmanju moguću mjeru potrebno je u fazi projektovanja odabrati odgovarajuću konstrukciju sklopnog aparata.

### 2.3.2 Tehnike uklapanja i prekidanja struje

Sve savremene konstrukcije aparata za prekidanje struje svode se na takozvane lučne aparate čija se funkcija zasniva na činjenici da se razdvajanjem kontakata u strujnom krugu ne može postići trenutni prekid struje. Uklapanje energetskih prekidača unutar energetskog sistema može proizvesti sklopne prenapone čije maksimalne tjemene vrijednosti zavise od nekoliko faktora kao što su konfiguracija mreže odnosno stanja energetskog prekidača na strani izvora i kratkotrajnog povećanja energije na strani potrošača. Iz navedenih razloga javila se potreba za primjenom uklapanja strujnih krugova bez pojave električnog luka, ali se još uvijek nisu postignuta za praksu prihvatljiva rješenja.

Kao prvi pokušaj za omogućavanje bezlučnog uklapanja korišteni su otpornički prekidači koji teoretski omogućavaju kontrolisano prekidanje strujnih krugova jednosmjerne struje bez pojave visokih prenapona. Međutim, tehnička izvedba takvih prekidača vrlo je složena i neekonomična. Drugo pokušaj su tzv. sinhroni prekidači kojima se kontakti otvaraju u prvoj prirodnoj nuli struje nakon isklonke komande, i to sa takvom brzinom da im probojni napon bude konstantno veći od prekidnog. Izrada ove vrste prekidača je takođe naišla na poteškoće, naročito zbog postojanja nesimetričnih struja kratkog spoja, kojima je potrebno unaprijed odrediti nulte tačke i postići veliku mehaničku preciznost uz postizanje velike brzine otvaranja, što takođe zahtijeva vrlo složene i skupe konstrukcije. Pored pomenutih, razmatrana je i primjena poluprovodničkih sklopki, transduktora, gasom punjenih trioda (tiratrona), ali sva rješenja imaju složenu tehničku izvedbu i

smatraju se neekonomičnim. S toga, današnja tehnička praksa se gotovo isključivo zasniva na lučnim aparatima.

Na gašenje luka zajedno utiču povratni napon i prekidna struja. Povratni napon nastoji da ponovo uspostavi kontakt između djelimično dejonizujućih otvorenih kontakata. Od iznosa prekidne struje zavisi stepen jonizacije između otvorenih kontakata. Metoda gašenja električnog luka značajno se razlikuje kod naizmjenične i jednosmjerne struje. Kod naizmjenične struje situacija je jednostavnija jer struja luka i napon mreže imaju sinusoidalni oblik, tako da struja nakon svake poluperiode imaju vrijednost nula. U tom trenutku se luk sam gasi, pa je jedino potrebno obezbijediti da se ponovo ne upali. Ako je napon mreže veći od probojnog napona, luk će se ponovo uspostaviti. U slučaju jednosmjerne struje je komplikovanija situacija, jer struja nikada nema vrijednost nula. Zbog toga je potrebno konstantno povećavati vrijednost otpornosti luka, kako bi se smanjila vrijednost struje luka do minimalne vrijednosti kod koje je luk stabilan.

Lučni aparat spriječava diskontinuirani prekid struje koji može da izazove neizdrživo visoke prenapone. Osim toga, omogućava prekidanje naizmjenične struje u prirodnoj nultoj tački bez korištenja uređaja za sinhronizaciju. Pored svih pomenutih prednosti, vrlo je važno ograničiti trajanje luka na najmanju moguću mjeru kako ne bi došlo do pregrijavanja aparata i kako bi se skratio proces isklapanja. Gašenje električnog luka ujedno predstavlja i osnovni problem za izradu električnih aparata.

Postoje dvije grupe po kojima se može izvršiti podjela sklopnih aparata:

1. aparati sa dugim lukom ili posebnim medijumom za gašenje luka
2. aparati sa kratkim lukom ili bez posebnog medijuma za gašenje luka

Medijumi za gašenje luka su gas (sumporni heksafluorid), tečnost (ulje, voda) i čvrsti materijal (organsko staklo, keramičke materije). U prvu grupu spadaju prekidači sa SF<sub>6</sub>, uljni, malouljni, hidromatski, pneumatski, itd, dok su za drugu grupu karakteristični vakuumski prekidači.

Dodatna podjela aparata sa dugim lukom ili posebnim medijumom za gašenje luka je na:

- a) aparate sa zavisnom karakteristikom gašenja,
- b) aparate sa nezavisnom karakteristikom gašenja.

Kod aparata sa zavisnom karakteristikom gašenja luka, čiji se medijum za gašenje električnog luka razlaže usljed visokih temperatura, razvija se smjesa gasova usljed termičkog dejstva električnog luka. Ukoliko se prekida veća struja, termičko dejstvo luka je izraženije, te su i procesi razlaganja medijuma intenzivniji, što dovodi i do jačeg strujanja gasova preko električnog luka. U ovu grupu spadaju aparati kod kojih se medijum za gašenje električnog luka razlaže pri termičkom dejstvu električnog luka, kao i aparati sa magnetnim djelovanjem na električni luk.

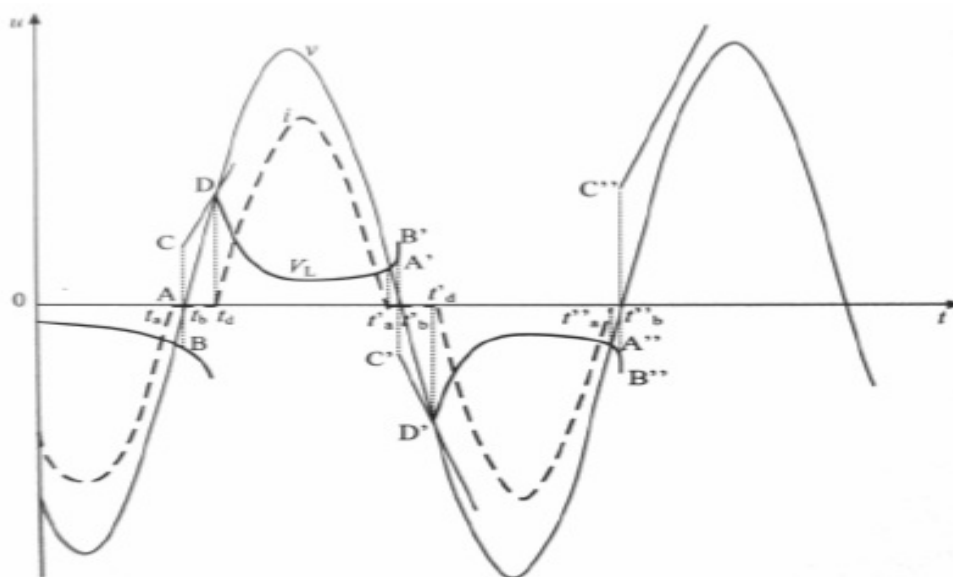
Kada su u pitanju aparati sa nezavisnom karakteristikom, intenzitet strujanja medijuma za gašenje električnog luka ne zavisi od struje koja se prekida. Kod ovih aparata poseban mehanizam izaziva strujanje medijuma za vrijeme dok električni luk gori. Energija koja je potrebna za strujanje



medijuma za gašenje luka se dovodi iz posebnog izvora, za razliku od aparata sa zavisnom karakteristikom, gdje je to toplotna ili magnetna energija električnog luka.

### 2.3.2.1 Prekidanje struje u omskom strujnom krugu

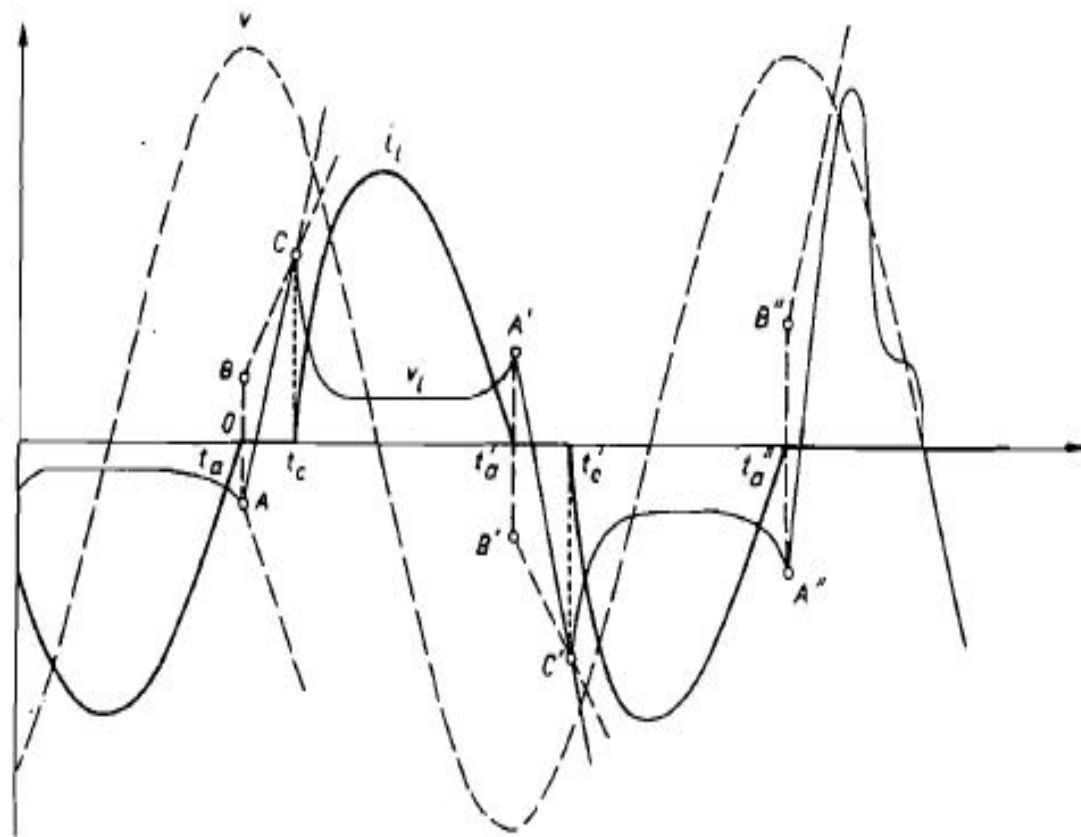
U čisto omskom strujnom krugu (za koji važi da je  $\cos\varphi = 1$ ), prisutna je samo radna otpornost. Napon mreže i napon električnog luka su u fazi sa strujom koja protiče kroz električni luk. Dok je napon mreže veći od napona električnog luka, struja će teći strujnim krugom. Smanjenjem struje dolazi do povećanja napona luka i u jednom momentu do izjednačenja sa naponom mreže. Trenutak izjednačenja napona predstavlja tačka A na grafiku sa slike 2.4. To je ujedno vrijeme  $t_a$ , odnosno trenutak kada se gasi električni luk i prestaje da teče struja. Povećanjem razmaka između kontakata odvodi se toplota i povećava električna čvrstoća. Električna čvrstoća (probojna čvrstoća) je karakteristika elektroizolacionog materijala koja predstavlja najnižu vrijednost jačine električnog polja pri kojoj dolazi do proboja dielektrika. Električna čvrstoća osim što zavisi od razmaka između kontakata, zavisi i od pritiska koji se smanjuje sa smanjenjem temperature. Povećanjem električne čvrstoće povećava se i napon električnog luka, što je prikazano pravom kroz tačke A i B. U trenutku  $t_a$  dolazi do izjednačenja električne čvrstoće i napona mreže, te time i ponovnog paljenja električnog luka. Paljenjem električnog luka ponovo počinje da teče struja. Povećanjem struje opada i napon luka. Opadanjem mrežnog napona opada i struja, a raste napon električnog luka. U trenutku  $t'_a$  ponovo se gasi električni luk i ponavlja gore opisani proces. Odvođenjem toplote i daljem povećavanju razmaka između kontakata električna čvrstoća poraste toliko da mrežni napon nije dovoljan za uspostavljanje električnog luka ( $t''_a$ ).



Slika 2.4: Promjena struje luka, napona luka i napona mreže prije konačnog gašenja luka za strujni krug sa radnom otpornosti ( $\cos\varphi = 1$ )

### 2.3.2.2 Prekidanje struje u induktivnom strujnom krugu

Prekidanje struje, odnosno gašenje luka u čisto induktivnom strujnom krugu se razlikuje od prekidanja u omskom strujnom krugu, jer je  $\cos\varphi = 0$  tj. struja kasni za naponom za 90 stepeni ( $\varphi = 90^\circ$ ). Električna čvrstoća između kontakata, nakon gašenja električnog luka, mijenja se po pravcu kroz tačku A, odnosno pravcu kroz tačke B i C. Električni luk se gasi kada struja zauzme nultu vrijednost, što je na slici 2.5 predstavljeno tačkom  $t_a$ . U tom trenutku napon mreže je maksimalan, a napon među kontaktima je jednak dužini OA. Zbog kapacitivnosti mreže, napon električnog luka ne može trenutno dostići vrijednost napona mreže. Rast napona između kontakata predstavljen je pravcem između tačaka A i C. U trenutku  $t_c$  napon između kontakata je jednak električnoj čvrstoći, što dovodi do paljenja električnog luka.[8] Električni luk gori sve dok struja ponovo ne zauzme nultu vrijednost. Proces se ponavlja dok električna čvrstoća ne dostigne dovoljno veliku vrijednost koja će spriječiti ponovno paljenje električnog luka. Nakon konačnog gašenja električnog luka, napon između kontakata postaje jednak naponu mreže, ali tek nakon prelazne pojave. Prelazna pojava zavisi od induktivnosti i kapacitivnosti mreže.



Slika 2.5: Promjena struje luka, napona luka i napona mreže prije konačnog gašenja luka za strujni krug sa induktivnim otporom ( $\cos\varphi = 0$ )

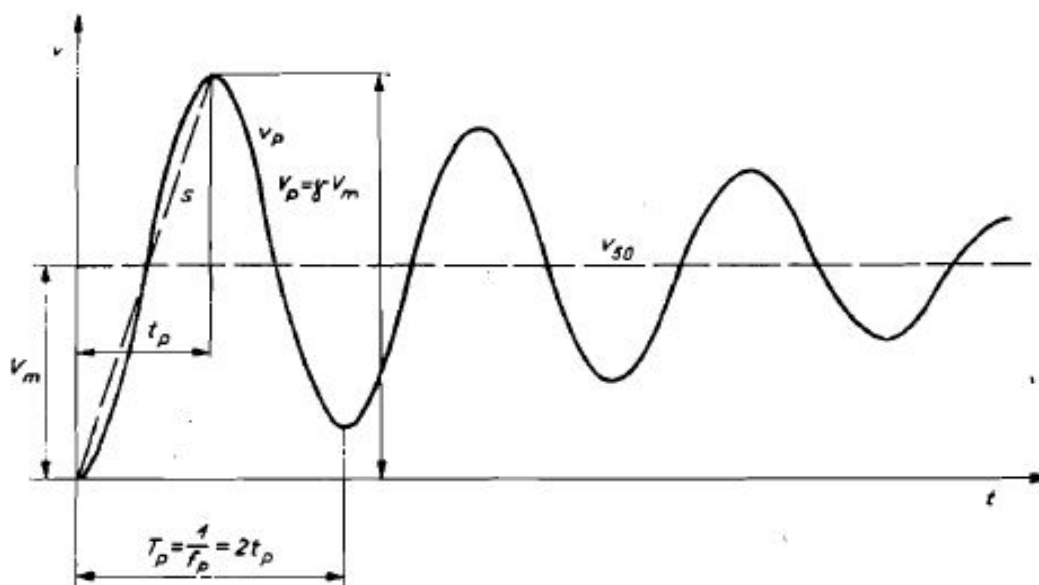
### Prelazne pojave nakon gašenja električnog luka

S obzirom na to da je električna mreža pretežno induktivnog karaktera, ali da su takođe prisutne kapacitivnosti, nakon konačnog gašenja električnog luka dolazi do oscilovanja napona između kontakata sklopnog aparata. Napon između kontakata sklopke naziva se prekidnim naponom. Na slici 2.6 prikazana je promjena napona između kontakata sklopke. Vrijednost prekidnog napona nakon gašenja luka data je izrazom:

$$v_p = v_m(1 - e^{-\delta t} \cos \omega_p t), \quad (2-1)$$

pri čemu je  $\delta = \frac{R}{2L}$ , dok je kružna frekvencija prekidnog napona ( $\omega_p$ )

$$\omega_p = 2\pi f_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2-2)$$



Slika 2.6: Promjena napona između kontakata nakon gašenja električnog luka

Faktor amplitude  $\gamma$  definiše se odnosom između maksimalne vrijednosti prekidnog napona ( $v_p$ ) između kontakata i tjemene vrijednosti mrežnog napona ( $v_m$ ).

$$\gamma = \frac{v_p}{v_m} = \frac{v_p}{\sqrt{2} V} \quad (2-3)$$

pri čemu je  $V$  efektivna vrijednost mrežnog napona.

Vrijeme  $t_p$  predstavlja period od konačnog gašenja električnog luka do pojave maksimalnog prekidnog napona. Ono je dato relacijom:

$$t_p = \frac{1}{2f_p}, \quad (2-4)$$

pri čemu je  $f_p$  frekvencija prekidnog napona.

Visina prekidnog napona i njegova frekvencija značajno utiču na konačno gašenje električnog luka. Što je veći prekidni napon i što je viša njegova frekvencija, to je teže postići konačno gašenje električnog luka. Frekvencija prekidnog napona određena je karakteristikama mreže. Što je nazivni napon veći, to je frekvencija prekidnog napona sve manja, jer sa povećanjem napona raste induktivnost i kapacitivnost, zbog veće dužine vodova. Kablovski vod u odnosu na vazdušni vod ima manju frekvenciju prekidnog napona.

### 2.3.2.3 Prekidanje struje u kapacitivnom strujnom krugu

U čisto kapacitivnom strujnom krugu napon kasni za strujom za 90 stepeni ( $\varphi = 90^\circ$ ). Kada struja dostigne nultu vrijednost dolazi do gašenja električnog luka. Ukoliko povratni napon koji se javlja između otvorenih kontakata nije dovoljno visok da probije kontakti razmak, kondenzator ostaje napojen sa naponom izvora.

Do momenta prekidanja ( $t < 0$ ), slijedi da je:

$$u = u_c = U \cos(\omega t); \quad (2-5)$$

$$i = I \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right); \quad (2-6)$$

gdje je  $u_c$  napon na kondenzatoru.

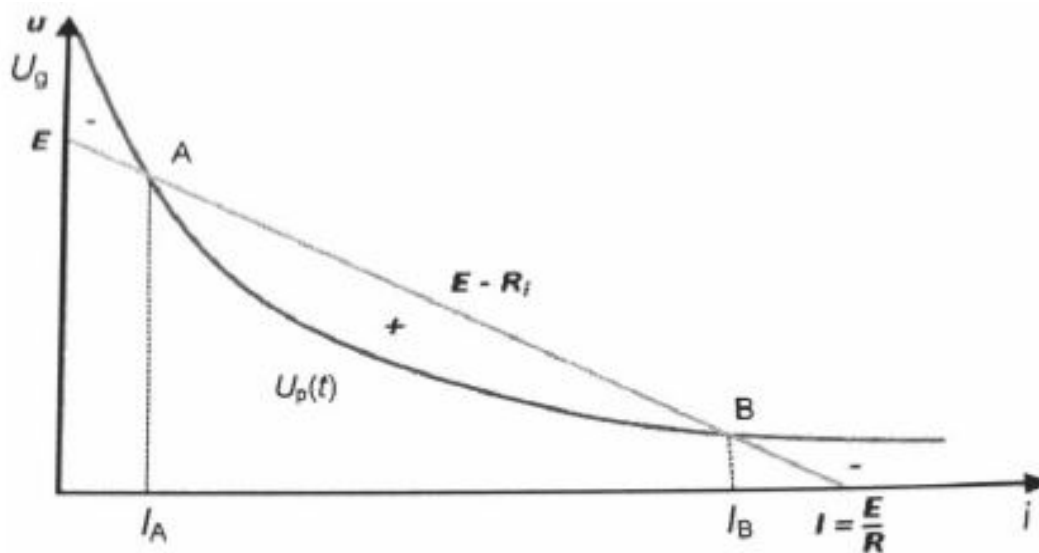
U trenutku prekidanja struje povratni napon je jednak nuli. Proboj nastaje tek nakon jedne poluperiode, kada povratni napon približno dostigne tjemenu vrijednost napona  $2U$ . Električna čvrstoća raste sa povećanjem razmaka između kontakata. Dok se ne postigne dovoljna električna čvrstoća, može doći do ponovnog paljenja električnog luka.[7]

### 2.3.2.4 Prekidanje struje u jednosmjernom strujnom krugu

Za jednosmjerni strujni krug je karakteristično da struja nikada sama ne dostigne nultu vrijednost. Da bi došlo do uspješnog prekidanja i gašenja električnog luka, jednosmjernu struju je potrebno neprestano smanjivati. Njenim smanjivanjem dolazi do povećanja otpornosti kontakata.

Za potrebe gašenja električnog luka definisan je kriterijum nestabilnosti luka za aparate jednosmjerne struje koji je prikazan na slici 2.7. Ukoliko dođe do otvaranja sklopnog aparata u induktivnom strujnom krugu, kriterijum nestabilnosti luka definiše da rast struje mora biti negativan, kao i pad napona na induktivnosti.

Kriva predstavlja karakteristiku sklopnog aparata, odnosno napon između kontakata, dok je pravom predstavljen napon koji daje mreža. Da bi došlo do gašenja električnog luka potrebno je da karakteristika aparata bude iznad karakteristike mrežnog napona ( $E - Ri$ ). Sa opadanjem struje, u toku gašenja luka, mijenjaju se i padovi napona. Do gašenja luka dolazi zbog njegove nestabilnosti.



Slika 2.7: Kriterijum nestabilnosti električnog luka za jednosmjerni strujni krug

Za strujni krug sa slike 2.7 slijedi da je:

$$E = Ri + L \frac{di}{dt} + u_p(t) \quad (2-7)$$

odnosno

$$L \frac{di}{dt} = E - Ri - u_p(t). \quad (2-8)$$

Uslov kriterijuma nestabilnosti luka je da je:

$$u_p(t) > E - Ri, \quad (2-9)$$

$$L \frac{di}{dt} < 0. \quad (2-10)$$

$I = E/R$  predstavlja stacionarnu vrijednost struje do početka prekidanja. Tačke A i B predstavljaju mjesta presjeka krive i prave tj. situacije u kojima je napon na induktivnosti jednak nuli. Simbolom "+" označen je opseg u kojem je pad napona na induktivnosti pozitivan. Opseg lijevo od tačke A i desno od tačke B je negativan i označen simbolom "-". U tački A teče struja  $I_A$ , dok u tački B teče struja  $I_B$ . Ukoliko dođe do smanjenja struje  $I_A$  dolazi do negativnog pada napona na induktivnosti, a time i smanjenja struje do postizanja gašenja električnog luka. U slučaju da dođe do proticanja struje koja je manja od struje  $I_B$ , doći će do pozitivnog pada napona na induktivnosti. Tačka A predstavlja tačku labilnog gorenja električnog luka, a tačka B tačku stabilnog gorenja luka. Smanjenje jačine struje postiže se povećanjem otpornosti R ili smanjenjem induktivnosti L. Povećanjem otpornosti R (uz  $L = \text{const.}$ ) podiže se kriva povratnog napona, a time i napon na induktivnosti. Smanjenjem induktivnosti L (uz  $R = \text{const.}$ ), ne mijenja se induktivni napon. To uslovljava povećanje promjene struje u vremenu ( $\frac{di}{dt}$ ).[7]

Na trajanje električnog luka utiče i vremenska konstanta  $\frac{L}{R}$ . Da bi vremenska konstanta bila što manja, brzina opadanja struje ( $\frac{di}{dt}$ ) mora biti što veća. To znači da će trajanje električnog luka biti manje što je vremenska konstanta manja, odnosno da će se smanjiti mogućnost oštećenja kontakata sklopnog aparata.

## 2.4 Primjeri nastajanja sklopnih prenapona

Sklopni prenaponi spadaju u grupu unutrašnjih prenapona čiji je uzrok nastajanja nagla promjena uslova u strujnom krugu tj. promjena uklopnog stanja. Amplituda sklopnih prenapona je ograničena i zavisna od nazivnog napona mreže.

Kako je jedan od ciljeva provjera uticaja prelaznih procesa na elemente sistema i posebno opreme u visokonaponskim razvodnim postrojenjima, u ovom podpoglavlju će biti detaljnije opisana teorijska saznanja i metode proračuna sklopnih prenapona. Postoji značajan broj istraživanih slučajeva koji mogu generisati sklopne prenapone. Uklapanje različitih energetske prekidača unutar elektroenergetskog sistema može proizvesti sklopne prenapone čije maksimalne tjemene vrijednosti zavise od nekoliko faktora kao što su konfiguracija energetske mreže, odnosno stanja energetske prekidača na strani izvora i kratkotrajnog povećanja elektriciteta i energije tokom sklopnih operacija na strani potrošača. Istraživanja različitih uzroka pojave sklopnih prenapona služe da se ustanovi maksimalna tjemena vrijednost sklopnog prenapona.

Uzrok nastajanja sklopnih prenapona javlja se u sljedećim situacijama:

- uključenje voda u praznom hodu
- isključenje neopterećenih dalekovoda i kablova
- monofazno i trofazno isklapanje opterećenog voda
- isključenje malih kapacitivnih struja
- isklapanje malih induktivnih struja
- isklapanje kvarova
- sklopni prenaponi izazvani manipulacijom prekidačem.

Shodno gore navedenim uzrocima, postoji vrlo značajan broj istraživanih slučajeva koji mogu generisati sklopni prenapon, bilo da se radi o prenosnim ili distributivnim mrežama. Na ovaj način se ističe praktična primjena dosadašnjih istraživanja na unapređenju ispitnih uslova za provjeru sposobnosti opreme da izdrži sklopne prenapone.

Tako su za električne mreže veoma visokog napona (VVN) u [9], [10] i [11] izvršene simulacije za 500 kV – nog i 400 kV – nih dalekovoda. Detekcija i klasifikacija prelaznih pojava u sistemu prenosa je veoma važna kako bi se mogla projektovati šema zaštite, izbor i nivo koordinacije izolacije i omogućio normalan rad sistema. Sklopni prenaponi izazvani ponovnim uklapanjem mogu ugroziti spoljašnju izolaciju, jer ima najmanju probojnu čvrstoću pod prenaponima sa vremenom čela od 50 – 500  $\mu$ s, što predstavlja tipično vrijeme za sklopne prenapone. Iz tog razloga se sva oprema koja se projektuje za napone iznad 300 kV treba ispitati u laboratorijskim uslovima tj. sa simuliranim sklopnim prenaponima. U slučaju 500 kV – nog dalekovoda prilikom ispitivanja prenaponskim talasima dostignuta je vrijednost od 1.5 r.j, odnosno 1.8 r.j. u slučaju kratkog spoja. U [10] su obrađene prelazne pojave koje su izazvane uklapanjem 400 kV dalekovoda, pri čemu je najveća vrijednost dobijena za vrijeme nekontrolisanog automatskog ponovnog zatvaranja 2,5 r.j. Na dalekovodu se javljaju najviši prenaponi pri zaostalom naponu. Najgore prikazani slučaj je kada je zaostali napon na -1 r.j, a napon dalekovoda u tom trenutku na +1 r.j. U toj situaciji sklopni prenaponi dostižu vrijednost od 3 r.j. Ukoliko u identičnom slučaju imamo sinhrono uklapanje, prenapon će dostići vrijednost od 1.5 r.j. [11]

Sklopni prenaponi koji se javljaju prilikom brzog ponovnog zatvaranja takođe dostižu visoke vrijednosti. Pri analizi 230 kV – nog dalekovoda najviši sklopni prenaponi koji su se javili na kraju voda, tokom brzog ponovnog zatvaranja iznosili su 3.3 r.j. Za slučaj kada se dalekovod napaja sa strane jačeg izvora izmjerene su maksimalne vrijednosti u iznosu od 2,97 r.j., dok je u drugom slučaju izmjerena vrijednost od 3,45 r.j. [12]

Za postrojenje 110/6 kV predstavljenog u [13], sa kojeg se napaja rudnik uglja čiji su glavni potrošači električni pogoni, pumpe, ventilatori i mašine za obradu uglja, u slučaju nesimultanog uklapanja vakuumskih prekidača vrijednost prenapona je dva puta veća od nominalnog napona. Pri nekontrolisanom faznom uklapanju, vrijednost prenapona je šest puta veća od nominalnog napona.

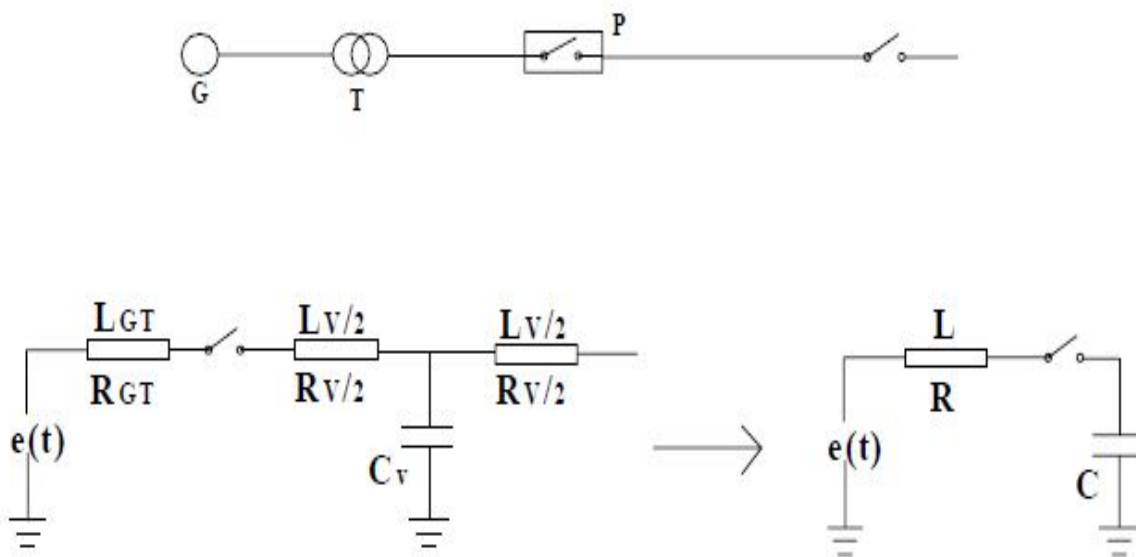
Uklapanje kondenzatorskih banki je jedna od najzahtjevnijih operacija u srednjenaponskim mrežama, zbog prisustva prelaznih pojava. Prilikom isklapanja, kroz prekidač se iniciraju uzastopni udari, usljed kojih se mogu generisati veoma visoki prenaponi. Pri pretpostavci da

prekidač nije u stanju izdržati naponsko naprezanje od 2 r.j. i dok se javlja dvofazni ponovni udar na vršnoj vrijednosti napona oporavka u dvijema fazama, napon na kondenzatoru dostiže vrijednost od 3 r.j. U slučaju ponovnih udara, prenaponi će preko kondenzatora porasti i do 4,15 r.j. pri sljedećem ponovnom udaru. [14] Ovakva situacija može dovesti do oštećenja kondenzatora i prekidačke jedinice.

Velike ofšor vjetroelektrane sastoje se od obimnih kablovskih sistema sa velikim brojem fidera i srednjenaponskih transformatora vjetrogeneratora, kod kojih je karakteristična impedansa voda niža nego kod vazdušnih vodova, tako da isti sklopni prenaponi mogu dovesti do viših tranzijentnih prenapona. S tim u vezi, vjerovatnoća pojave sklopnih prenapona je izuzetno velika, i može premašiti dozvoljeni nivo napona elemenata sistema, te time doprinijeti velikim oštećenjima izolacije. Za potrebe istraživanja sklopnih prenapona u [15] je vršena analiza pojave prenapona na fideru pri različitim dužinama kabla, praznom hodu, induktivnom i omskom opterećenju, kao i pojava prenapona pri različitom broju spojenih fidera pod induktivnim opterećenjem. U slučaju kada je konektovan samo jedan fider, a dužina kabla varira od 1 – 10 km javljaju se maksimalni prenaponi u iznosu od 49,8 kV tj 1,86 r.j, dok sa povećanjem broja fidera njegova vrijednost opada.

#### 2.4.1 Uključenje voda u praznom hodu

Na slici 2.8 prikazana je ekvivalentna šema za proračun sklopnih prenapona pri uključenju voda u praznom hodu. Kao što se može vidjeti, neopterećeni vod je prikazan kapacitivnošću C.[16]



Slika 2.8: Ekvivalentna šema za proračun sklopnih prenapona pri uključenju voda u praznom hodu



Na kondenzatoru C u trenutku uključenja prekidača ( $t=0$ ) napon ima vrijednost nula:

$$U_{c0} = 0$$

$$e(t) = E_m \cos(\omega t + \varphi), \quad (2-11)$$

pri čemu je  $E_m$  tjemena fazna vrijednost, za koju važi:

$$E_m = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} E \quad (2-12)$$

gdje E predstavlja efektivnu linijsku vrijednost.

Napon na kondenzatoru je jednak:

$$u_c(t) = E_m k_f \cos(\omega t + \varphi) - E_m k_f \cos \varphi \cos \omega_1 t * e^{-\delta t} + E_m k_f \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right) \sin \varphi \sin \omega_1 t * e^{-\delta t} \quad (2-13)$$

Sa  $k_f$  je označen koeficijent Ferantijevog efekta, čija je vrijednost uvijek veća od 1. Ferantijev efekat predstavlja povećanje napona na kraju voda u odnosu na napon na njegovom početku, kada je vod u praznom hodu ili vrlo malo opterećen.

$$k_f = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2} \quad (2-14)$$

Koeficijent prigušenja  $\delta$  izračunava se:  $\delta = \frac{R}{2L}, \quad (2-15)$

dok je učestanost prigušenja jednaka:  $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (2-16)$

U slučaju kada je  $\omega = \omega_1$ , tada vod pada u rezonantnu učestanost.

Kada je  $\omega_1 \gg \omega$  zanemaruje se treći član jednačine za izračunavanje napona na kondenzatoru.

Prvi član jednačine se mijenja sa industrijskom učestanošću  $\omega$ , dok se drugi član mijenja sa visokom učestanošću  $\omega_1$  i vremenom se prigušuje. Izraz će u tom slučaju imati sljedeći oblik:

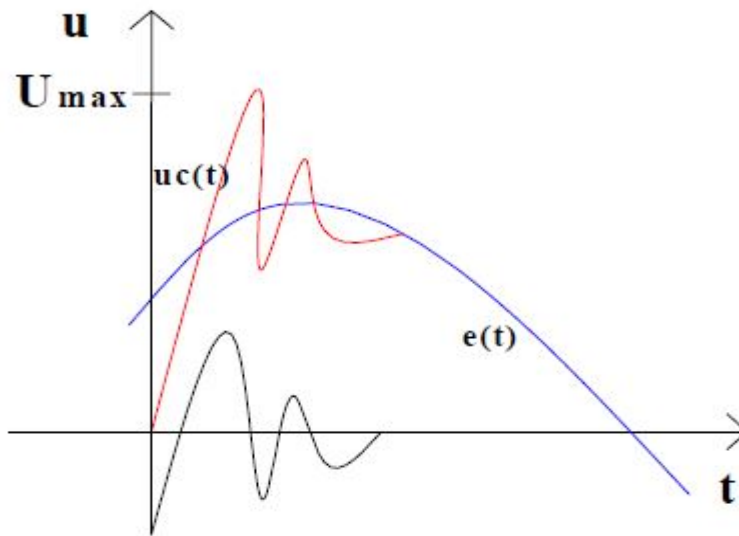
$$u_c(t) = E_m k_f \cos(\omega t + \varphi) - E_m k_f \cos \varphi \cos \omega_1 t * e^{-\delta t} \quad (2-17)$$

Prvi član je ustaljeni član, dok je drugi član izraza promjenljiv. Za vrijednost  $\cos\omega_1 t = -1$  napon  $u_c(t)$  dostiže maksimalnu vrijednost tj. kada je  $\omega_1 t = \pi$ . Ako se pri ovome pretpostavi i da je  $\omega \frac{\pi}{\omega_1} \approx 0$  ( $t_{max} = \frac{\pi}{\omega_1}$ ), tada prvi član izraza ima oblik:  $E_m k_f \cos \varphi$ .

Za uključenje u trenutku  $\varphi = 0$  i  $\omega_1 t = \pi$  dobija se izraz za maksimalni prenapon koji se može javiti navodu:

$$U_{max} = E_m k_f (1 + e^{-\delta t_{max}}) \quad (2-18)$$

Na slici 2.9 dat je grafički prikaz maksimalnog prenapona pri uključanju voda u praznom hodu.



Slika 2.9: Maksimalni prenapon pri uključanju voda u praznom hodu

Koeficijent prenapona  $k$  je uveden radi lakšeg sagledavanja visine prenapona koji se javlja u sistemu. Njegova vrijednost je  $1 < k < 2$ , a jednak je:

$$k = \frac{U_{max}}{E_m k_f} \quad (2-19)$$

Za najkritičniji slučaj, kada je  $\varphi = 0$ ,  $\omega_1 t = \pi$  i  $\delta = 0$ , slijedi da je  $k = 2$ , odnosno:

$$U_{max} = 2E_m k_f \quad (2-20)$$

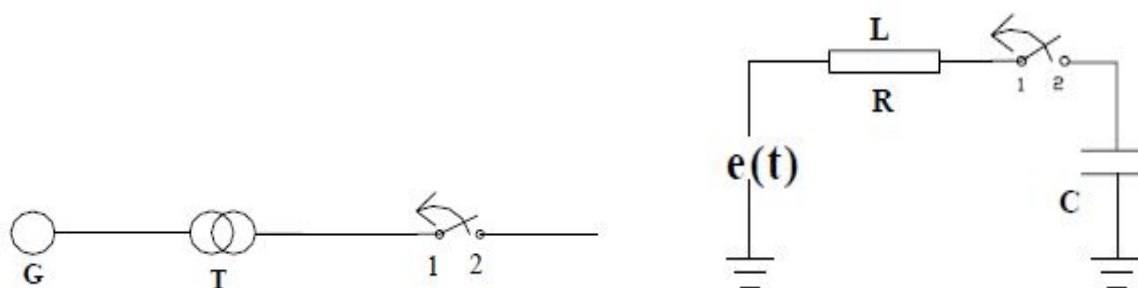
To znači da u slučaju uklapanja kod maksimalne vrijednosti pogonskog napona, sklopni prenapon može dostići dvostruku vrijednost pogonskog napona. Za kraće vodove, dužine 20 – 30 km, koeficijent prenapona ima vrijednost  $k = 1,5 \sim 1,8$ . Ukoliko se radi o trofaznom vodu, visoki prenaponi se javljaju u barem jednoj od faza.

U situaciji kada se neopterećeni vod priključuje na sistem preko sabirnice na koju je vezano više nadzemnih vodova ili kablova, priključeni vod ima veću talasnu impedansu od ukupne impedanse spojene na sabirnicu. U većini slučajeva dužina priključenog voda je manja od ukupne dužine već priključenih vodova. U tom slučaju će napon na kraju priključenog voda imati dvostruku vrijednost u odnosu na napon na početku voda, dok vrijednost napona pogonske frekvencije gotovo da se neće promijeniti.

Za razvijene elektroenergetske sisteme je karakteristično uklapanje vodova preko kompleksnog izvora. Na prelaznu pojavu, osim induktivnosti transformatora utiču i talasne impedanse ostalih vodova, koju karakteriše više različitih frekvencija. Za razvijene sisteme faktor prenapona je manji od dva, jer se oscilacije različitih frekvencija superponiraju.

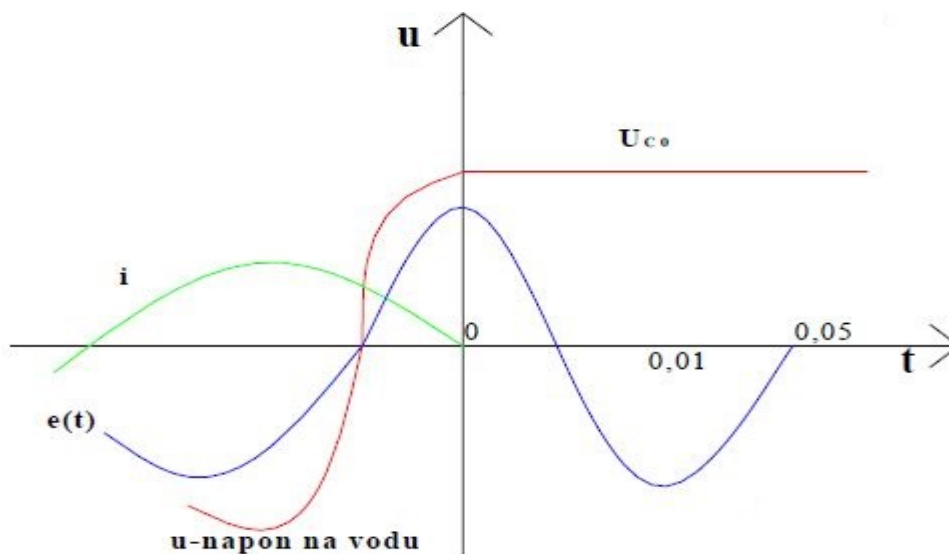
#### **2.4.2 Isključenje malih kapacitivnih struja**

Prilikom isključenja nadzemnih vodova u praznom hodu, odnosno neopterećenih kablova ili baterija kondenzatora, prekidač prekida kapacitivnu struju pri vrijednosti nula. U tom trenutku napon ima maksimalnu vrijednost. Na slici 2.10 prikazana je ekvivalentna šema za proračun sklopnih prenapona pri isključivanju voda u praznom hodu. U monofaznim sistemima napon dostiže vrijednost 1 r.j., dok u trofaznim sistemima faza koja prva isključuje može imati vrijednost 1.5 r.j. Na grafičkom prikazu (slika 2.11) možemo uočiti da napon izvora nakon 10 milisekundi (jedna poluperioda) dostiže maksimalnu vrijednost suprotnog polariteta. U trofaznim sistemima povratni napon može dostići vrijednost 3 r.j. pogonskog faznog napona. U slučaju da ovaj napon izazove proboj za vrijeme kraće od 5 milisekundi nakon isključenja, dolazi do ponovnog paljenja električnog luka. Proboj koji se dešava u vremenu nakon 5 milisekundi predstavlja povratni preskok koji se javlja na kontaktima prekidača.[7] Povratni preskok može da prouzrokuje vrlo visoke prenapone i obično se dešava prije nego li povratni napon dostigne maksimalnu vrijednost. Povratni preskok izaziva visokofrekventnu oscilatornu struju, koja prestaje teći najprije nakon druge poluperiode.



Slika 2.10: Ekvivalentna šema za proračun sklopnih prenapona pri isključivanju voda u praznom hodu

Kako je ranije pomenuto, postoje prekidači sa zavisnom i nezavisnom karakteristikom gašenja električnog luka. Isključenje malih kapacitivnih struja je problematično za prekidače sa zavisnom karakteristikom gašenja luka, jer može doći do ponovnog paljenja luka, što se kod prekidača sa nezavisnom karakteristikom ne može desiti.



Slika 2.11: Grafički prikaz napona i struja u kolu pri isključenju malih kapacitivnih struja

U momentu gašenja električnog luka zaostali napon na kondenzatoru  $U_{c0}$ :

$$U_{c0} = E_m k_f e^{-\delta t} \quad (2-21)$$

Napon između kontakata prekidača se dobija iz izraza:

$$u_{12}(t) = U_{c0} - E_m \cos \omega t \quad (2-22)$$

Period gašenja električnog luka zavisi od brzine uspostavljanja dielektrične izdržljivosti. Ako se dielektrična izdržljivost sporo uspostavlja može doći do ponovnog paljenja električnog luka između kontakata prekidača.[16] Ponovno paljenje luka predstavlja isto što i zatvaranje prekidača, te napon na kondenzatoru (na kome je već prisutan zaostali napon) ima vrijednost:

$$u_c(t) = E_m k_f \cos(\omega t + \varphi) - E_m k_f \cos \varphi \cos \omega_1 t * e^{-\delta t} + E_m k_f \frac{\omega}{\omega_1} \sin \varphi \sin \omega_1 t * e^{-\delta t} + U_{c0} \cos \omega_1 t * e^{-\delta t} \quad (2-23)$$

Treći član jednačine je približno jednak nuli, jer je  $\frac{\omega}{\omega_1} \approx 0$ , pa prethodni izraz dobija oblik:

$$u_c(t) = E_m k_f \cos(\omega t + \varphi) - (E_m k_f \cos \varphi - U_{c0}) \cos \omega_1 t * e^{-\delta t} \quad (2-24)$$

Drugi član izraza predstavlja prelaznu komponentu koja, kao što se može vidjeti, zavisi od razlike trenutne vrijednosti elektromotorne sile i zaostalog napona  $U_{c0}$ .

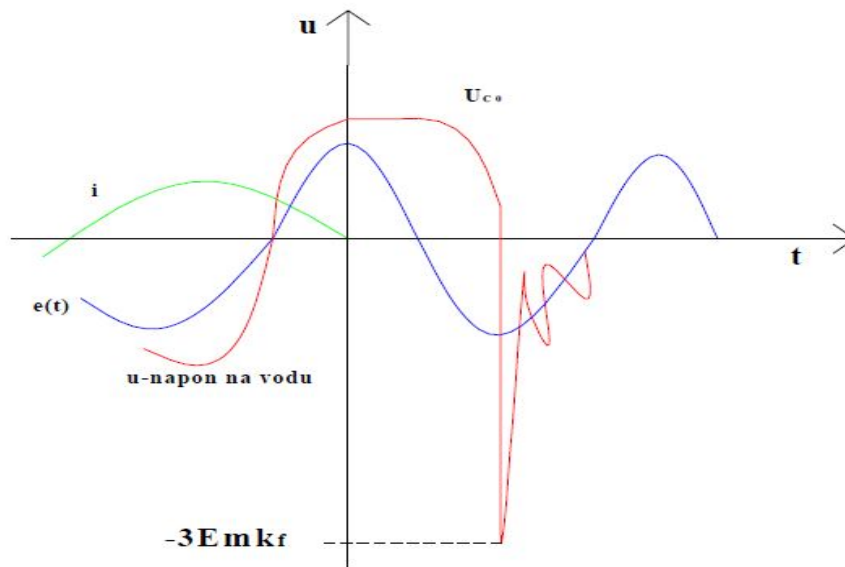
Ukoliko do ponovnog paljenja luka dođe u trenutku  $\varphi = \pi$ , dobiće se najviša amplituda prelaznog napona tj. za  $t_{max} = \frac{\pi}{\omega_1}$ , dobija se:

$$U_{max} = E_m k_f \cos\left(\frac{\omega}{\omega_1} \pi + \pi\right) - (E_m k_f \cos \pi - U_{c0}) \cos \omega_1 t e^{-\delta t_{max}} \quad (2-25)$$

Pri pretpostavci da je  $\omega_1 \gg \omega$  i da je  $U_{c0} \approx E_m k_f$ , dobija se:

$$U_{max} = -E_m k_f - 2E_m k_f e^{-\delta t_{max}} \approx -3E_m k_f \quad (2-26)$$

Iz prethodne relacije slijedi zaključak da koeficijent prenapona može dostići vrijednost  $k = 3$ . Na slici 2.12 prikazan je oblik napona za najkritičniji slučaj isključenja malih kapacitivnih struja.



Slika 2.12: Grafički prikaz oblika napona za najkritičniji slučaj isključenja malih kapacitivnih struja

#### 2.4.2.1 Isključenje neopterećenog dalekovoda

Dugi neopterećeni vodovi su pretežno kapacitivni, kod kojih struja prethodi naponu za  $\frac{\pi}{2}$ . Ako se u trenutku  $t = 0$  kontakti prekidača otvore, a povratni napon  $u_p$  između njih nije dovoljno visok da probije dielektričnu čvrstoću kontataka, kapacitivnost voda ostaje napojena naponom izvora  $U$ . Pri zanemarivanju omskog i induktivnog otpora u odnosu na kapacitivni, dobija se sljedeća jednačina ravnoteže napona:

$$u = u_p + u_c \quad (2-27)$$

Do trenutka prekidanja struje ( $t < 0$ ):

$$u = u_c = U \cos \omega t \quad (2-28)$$

$$i = I \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (2-29)$$

$$u_p = 0$$

Nakon prekidanja struje ( $t \geq 0$ ), slijedi da je:

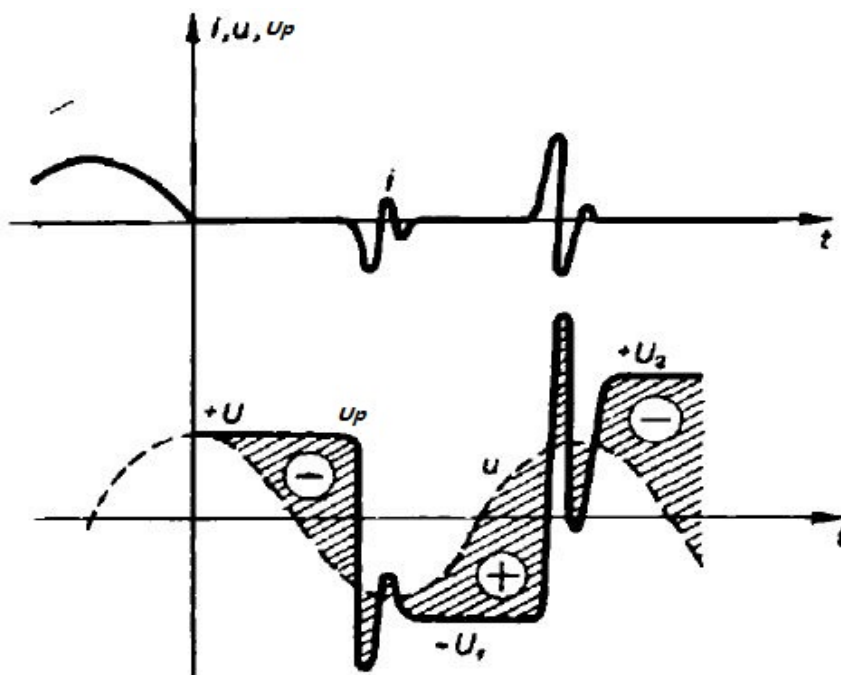
$$u = u_c = U \cos(\omega t);$$

$$i = 0;$$

$$u_c = U = \text{const};$$

dok je povratni napon  $u_p = U(\cos \omega t - 1)$ . (2-30)

S obzirom na to da povratni napon dostiže dvostruku amplitudu napona  $U$ , lako može doći do ponovnog paljenja električnog luka. U trenutku prekidanja struje napon između kontakata ima nultu vrijednost, a nakon jedne poluperiode dostiže vrijednost  $2U$ , što dovodi do proboja. Usljed proboja dolazi do pražnjenja kondenzatora koji kroz nekoliko oscilacija sopstvene frekvencije zauzima vrijednost  $-U_1$  suprotnog predznaka. Do ponovnog proboja dolazi u blizini sljedećeg maksimuma napona  $u$ , kada je povratni napon  $u_p \approx U + U_1 > 2U$ . [17] Nakon svakog sljedećeg proboja, napon neopterećenog voda  $u_c$  ima sve veću vrijednost, tj. dostiže vrijednost  $+U_2$ , zbog povećanja razmaka između kontakata, a time i probojne čvrstoće. Povratni napon na slici 2.13 prikazan je osjenčenim dijelom. Kao što se može uočiti, ima dva polariteta. Iznos napona se svakim ponovnim paljenjem električnog luka povećava.

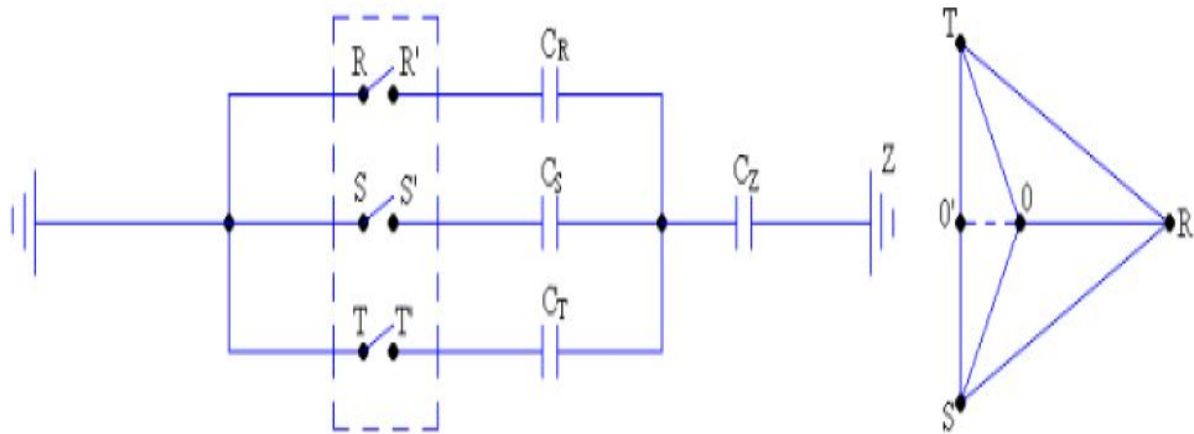


Slika 2.13: Grafički prikaz prenapona izazvanih ponovnim paljenjem električnog luka

### 2.4.2.2 Isključenje neopterećenih kablova

Isključenje neopterećenih kablova karakterišu dva slučaja, a to su trolno isklapanje i uzastopno jednopolno isklapanje. U ekvivalentnoj šemi na slici 2.14 zanemareni su odvodne otpornosti i radi simetrije smatra se da su kapacitivnosti kondenzatora u sve tri faze jednake.

Na sredjenaponskom nivou primjenjuju se sklopni aparati sa oba načina isklapanja. Analiza trolnog i uzastopnog jednopolnog isklapanja vršiće se na osnovu pretpostavke da ne dolazi do ponovnog paljenja električnog luka.



Slika 2.14: Ekvivalentna šema strujnog kruga neopterećenog kabla

#### a) Trolno isklapanje

U trenutku  $t_1$ , pri prolazu struje  $i_R$  kroz nulu, prvo se prekida pol faze R. Napon na kondenzatoru  $C_R$  je maksimalan i jednak tjemenoj vrijednosti  $U_m$  faznog napona. U trolnim sklopnim aparatima struja se ne može istovremeno prekinuti u sve tri faze, pa se na mjestu prvog prekida javlja povratni napon. Ako se pol faze R prvi prekida, dobićemo napon koji ima vrijednost  $1.5U_m$ .

Kroz preostala dva kondenzatora  $C_S$  i  $C_T$  serijski vezana protiče struja  $i_{ST}$ . U trenutku  $t_1$ , linijski napon na kondenzatorima  $u_{ST} = \sqrt{3}u_f$  ima vrijednost nula. U trenutku  $t_2 = t_1 + \frac{\pi}{2\omega}$ , napon  $u_{ST}$  dostiže maksimalnu vrijednost  $\sqrt{3}U_m$ . Zbog čisto kapacitivnog opterećenja struja  $i_{ST}$  prolazi kroz nulu i tom prilikom se prekida njen dalji tok u fazama S i T.



U trenutku  $t_1$  na strani izvora napon  $U_{RZ} = U_m$ , pa moraju biti i naponi:

$$U_{SZ} = U_{TZ} = -\frac{1}{2}U_m. \quad (2-31)$$

To znači da na kondenzatorima  $C_S$  i  $C_T$ , u trenutku  $t_1$  naponi imaju vrijednost  $-\frac{1}{2}U_m$ .

Linijski napon  $u_{ST}$  jednak je:

$$u_{ST} = u_{SZ} - u_{TZ}. \quad (2-32)$$

U trenutku  $t = t_2$  napon  $u_{ST}$  dobija tjemenu vrijednost  $\sqrt{3}U_m$ , pa slijedi da je:

$$u_{SZ} = \frac{\sqrt{3}}{2}U_m = 0,87U_m \quad (2-33)$$

$$u_{TZ} = -\frac{\sqrt{3}}{2}U_m = -0,87U_m. \quad (2-34)$$

S obzirom na to da za vrijeme  $t \geq t_2$  ne protiče nikakva struja, povratni napon na otvorenom kontaktu  $RR'$  iznosiće:

$$u_{RR'} = u_{RZ} - 1,5U_m = U_m \cos \omega t - 1,5U_m. \quad (2-35)$$

Na sličan način se izračunavaju naponi na kontaktima preostalih faza:

$$u_{SS'} = u_{SZ} - 0,87U_m = U_m \cos \left( \omega t - \frac{2}{3}\pi \right) - 0,87U_m \quad (2-36)$$

$$u_{TT'} = u_{TZ} + 0,87U_m = U_m \cos \left( \omega t - \frac{4}{3}\pi \right) + 0,87U_m. \quad (2-37)$$

Iz prethodno navedenih relacije slijedi zaključak da najveći povratni napon na kontaktu  $RR'$  dostiže apsolutnu vrijednost  $2,5U_m$ , dok je na preostala dva kontakta najveći napon  $1,87U_m$ .

#### b) Uzastopno jednopolno isklapanje

Uzastopno jednopolno isklapanje podrazumijeva isklapanje jednog pola za drugim. Ovaj tip prekidanja je karakterističan za sklopke srednjenaponskog nivoa.

Posmatramo tri karakteristična vremenska intervala:

1.  $t = t_1 \dots t_2$  – od trenutka prekidanja struje u fazi R ( $t_1$ ), pa do trenutka prekidanja struje ( $t_2$ ) u preostalim fazama S i T. Tada je pol faze S već otvoren, a pol faze T ostaje zatvoren;
2.  $t = t_2 \dots t_3$  – od trenutka  $t_2$  pa do trenutka otvaranja pola faze T;
3.  $t > t_3$  – vrijeme nakon otvaranja pola faze T.

Za određivanje povratnih napona potrebno je odrediti napone na kondenzatorima pojedinih faza i napon nulte tačke prema zemlji  $u_{0Z}$ . Napone na kondenzatorima označava se sa  $u_{R'0}$ ,  $u_{S'0}$ ,  $u_{T'0}$ . Promjene napona posmatraće se prema navedenim intervalima.

1. Pri prolasku struje  $i_R$  kroz nulu, što odgovara trenutku  $t_1$ , gasi se električni luk. Na kondenzatoru faze R napon ostaje konstantan, i jednak trenutnoj vrijednosti napona izvora u trenutku prekida struje, tj:

$$u_{R'0} = U_m. \quad (2-39)$$

Kroz zatvorene kontakte  $SS'$  i  $TT'$  prolazi struja  $i_{ST}$  tjemene vrijednosti, tj:

$$I_{STm} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_m = 0,87 I_m, \quad (2-40)$$

pri čemu je  $I_m$  tjemena vrijednost struje prije otvaranja prvog pola.

Na kondenzatore faze S i T dolazi polovina linijskog napona istih faza  $u_{ST}$ . U trenutku  $t_1$  napon na kondenzatorima  $C_S$  i  $C_T$  je  $-\frac{U_m}{2}$ . Nakon superponiranja naizmjeničnog napona slijede relacije:

$$u_{S'0} = \frac{1}{2} u_{ST} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_m \sin \omega t - \frac{U_m}{2} \quad (2-41)$$

$$u_{T'0} = -\frac{1}{2} u_{ST} = -\frac{\sqrt{3}}{2} U_m \sin \omega t - \frac{U_m}{2} \quad (2-42)$$

Za napon nulte tačke važi da je:

$$u_{0Z} = u_{SZ} - u_{S'0} = U_m \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) - \frac{\sqrt{3}}{2} U_m \sin \omega t + \frac{U_m}{2} = -\frac{1}{2} U_m \cos \omega t + \frac{3U_m}{2} \quad (2-43)$$

Za napon između tačke  $R'$  i zemlje važi da je:

$$u_{R'Z} = u_{R'0} + u_{0Z} = 1,5U_m - \frac{1}{2} U_m \cos \omega t \quad (2-44)$$

Napon na kontaktu faze R iznosiće:

$$u_{RR'} = u_{RZ} - u_{R'Z} = 1,5U_m \cos \omega t - 1,5U_m. \quad (2-45)$$

Iz prethodnih relacija slijeda da maksimalni napon na kontaktu  $RR'$ , u vremenskom intervalu  $t = t_1 \dots t_2$ , može dostići apsolutnu vrijednost koja iznosi  $3U_m$ .

2. Za drugi vremenski interval, odnosno za trenutak  $t = t_2$  struja prolazi kroz nulu u fazama S i T i definitivno se prekida. U tom trenutku napon na kondenzatoru faze S i napon  $u_{S'0}$  su jednaki i iznose:

$$u_{S'0} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_m \sin \frac{\pi}{2} - \frac{U_m}{2} = 0,37 U_m. \quad (2-46)$$

Uz pretpostavku idealnog slučaja bez odvoda, ova vrijednost napona na kondenzatoru  $C_S$  ostaje konstantna.

Napon na kondenzatoru  $C_T$  iznosi:

$$u_{T'0} = -\frac{\sqrt{3}}{2} U_m \sin \frac{\pi}{2} - \frac{U_m}{2} = -1,37 U_m. \quad (2-47)$$

Kako je kontakt  $TT'$  na pomenutom intervalu još uvijek zatvoren, slijedi:

$$u_{0Z} = u_{TZ} - u_{T'0} = U_m \cos \left( \omega t - \frac{4}{3}\pi \right) + 1,37U_m. \quad (3-48)$$

$$u_{S'Z} = u_{S'0} + u_{0Z} = U_m \cos \left( \omega t - \frac{4}{3}\pi \right) + \sqrt{3}U_m \quad (3-49)$$

Dakle, maksimalni napon tačke 0 prema zemlji i napona  $u_{S'Z}$ , u ovoj situaciji dostiže vrijednost  $2,37U_m$ .

Napon na kontaktu  $SS'$ , odnosno faze S, u trenutku  $t_2$  je:

$$u_{SS'} = u_{SZ} - u_{S'Z} = U_m \cos \left( \omega t - \frac{2}{3}\pi \right) - U_m \cos \left( \omega t - \frac{4}{3}\pi \right) - \sqrt{3}U_m. \quad (2-50)$$

Za fazni pomjeraj  $\frac{2}{3}\pi$  dobija se:

$$u_{SS'} = \sqrt{3}U_m \sin \omega t - \sqrt{3}U_m. \quad (2-51)$$

Maksimalna vrijednost napona na kontaktima  $SS'$  dostiže vrijednost  $-2\sqrt{3}U_m \approx -3,47U_m$ .

Za kontakte  $RR'$ , odnosno fazu R, u ovom intervalu slijedi da je:

$$u_{R'Z} = u_{R'0} + u_{0Z} = U_m + U_m \cos(\omega t - \frac{4}{3}\pi) + 1,37U_m = U_m \cos(\omega t - \frac{4}{3}\pi) + 2,37U_m \quad (2-52)$$

$$u_{RR'} = u_{RZ} - u_{R'Z} = U_m \cos \omega t - U_m \cos(\omega t - \frac{4}{3}\pi) - 2,37U_m \quad (2-53)$$

$$u_{RR'} = \sqrt{3}U_m \cos(\omega t - \frac{\pi}{6}) - 2,37U_m.$$

Dakle, maksimalna amplituda napona na kontaktu  $RR'$  u pomenutom intervalu može dostići vrijednost:

$$-\sqrt{3}U_m - 2,37U_m \approx -4,1U_m.$$

**3.** Najnepovoljniji slučaj je isklapanje kontakta  $TT'$  u trenutku kada je vrijednost napona  $u_{TZ} = U_m$ . U tom slučaju napon  $u_{0Z} = 2,37U_m$  i dalje ostaje konstantan. Isto važi i za  $\omega t = \frac{4\pi}{3} + n\pi$ , pri čemu je  $n$  cijeli parni broj.

Napon  $u_{T'Z}$  će biti:

$$u_{T'Z} = u_{T'0} + u_{0Z} = -1,37U_m + 2,37U_m = U_m. \quad (2-54)$$

Napon na kontaktu  $TT'$ , odnosno faze T je:

$$u_{TT'} = u_{TZ} - u_{T'Z} = U_m \cos(\omega t - \frac{4}{3}\pi) - U_m. \quad (2-55)$$

Maksimalna amplituda na kontaktu  $TT'$  dostiže vrijednost  $2U_m$ .

Za napon na kontaktu  $RR'$  tj. fazi R, imamo napon:

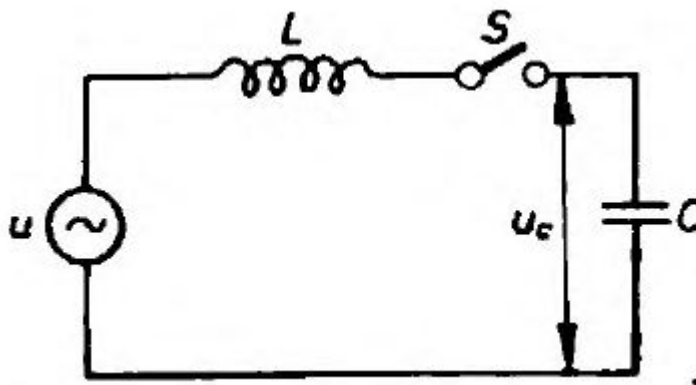
$$u_{RR'} = u_{RZ} - u_{R'Z} = U_m \cos \omega t - 3,37U_m, \quad (2-56)$$

odnosno maksimalnu amplitudu  $-4,37U_m$ .

Izvodi se zaključak da su u svim intervalima najveća naponska naprezanja na kontaktu koji prvi prekida. Naponi dostižu jako velike vrijednosti, čime jako naprežu izolaciju sklopnih aparata. Međutim, dobijene vrijednosti nisu adekvatne realnom primjeru, jer su se zanemarili odvodne otpornosti koji značajno smanjuju vrijednost sklopnih prenapona.

### 2.4.2.3 Uključenje i isključenje kondenzatorskih baterija

Za razmatranje pojave prenapona pri uključivanju kondenzatorskih baterija na mrežu koristi se pojednostavljena jednopolna šema prikazana na slici 2.15.



Slika 2.15: Jednopolna šema strujnog kruga sa uređajem za uključenje kondenzatora

Na slici se može uočiti da je izostavljena omska otpornost strujnog kruga, čime se zanemaruju prigušenja oscilacija. Ako se pretpostavi da je napon na kondenzatoru  $u_c$  prije uključjenja jednak nuli, tada je napon na kontaktu sklopnog aparata  $u_s$  jednak naponu izvora  $u$ , tj:

$$u = U_m \cos \omega t. \quad (2-57)$$

Nakon uklapanja sklopnog aparata S, počinje da teče struja  $i$ , odakle slijedi:

$$U_m \cos \omega t = L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt. \quad (2-58)$$

Derivacijom gornje funkcije  $i$  korištenjem početnih uslova ( $t = 0$ ;  $u_c = 0$ ;  $i = 0$ ), pri čemu je sopstvena frekvencija strujnog kruga  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ , dobija se relacija za struju nakon uključjenja kondenzatora:

$$i = \frac{U_m}{L} \frac{\omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2} \sin \omega_0 t - \frac{U_m}{L} \frac{\omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2} \sin \omega t, \quad (2-59)$$

pri čemu je koeficijent  $A = \frac{U_m}{L} \frac{\omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2}$ .

Ako izraz za struju uvrstimo u proračun napona na kondenzatoru,

$$u_c = \frac{1}{C} \int i dt,$$

dobija se relacija:

$$u_c = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} U_m (\cos \omega t - \cos \omega_0 t). \quad (2-60)$$

Kako je  $\omega_0^2 \gg \omega^2$ , uzima se da je  $(\frac{\omega}{\omega_0})^2 \approx 0$ , slijedi da je:

$$u_c \approx U_m (\cos \omega t - \cos \omega_0 t).$$

Odavde se zaključuje da maksimalna vrijednost amplitude napona može dostići vrijednost  $2U_m$ . U realnoj situaciji uvijek će biti prisutna omska otpornost, pa će umjesto neprigušenih oscilacija biti prigušene. Za slučaj kada je priključeno više kondenzatorskih baterija dobijaju se drugačije relacije od gore navedenih, jer se uzima u obzir međusobni odnos kapacitivnosti kondenzatorskih baterija.

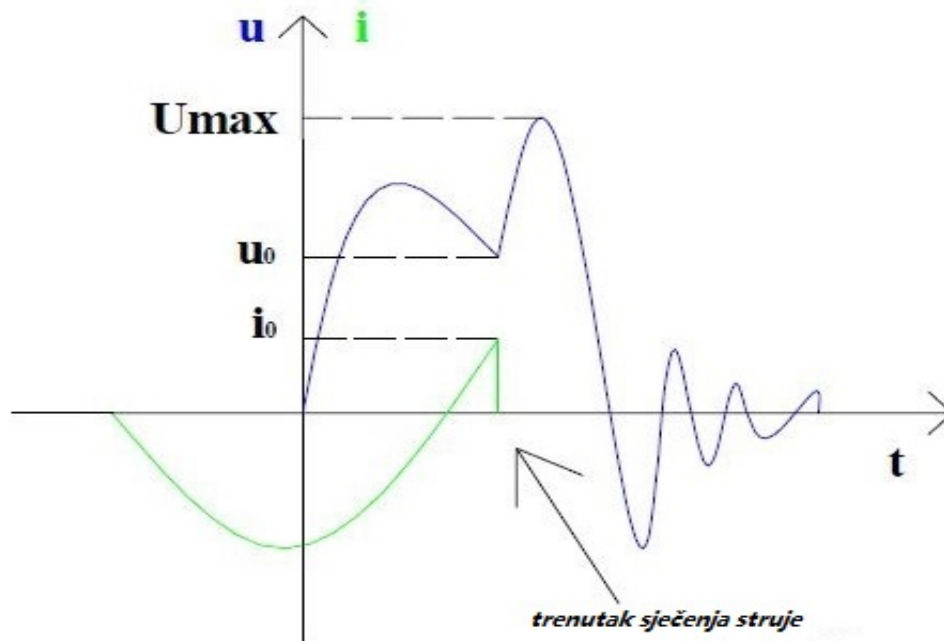
Slučaj isključenja kondenzatorskih baterija isti je kao za isklapanje neopterećenih dalekovoda, s tim što se zanemaruju omski i induktivni otpor. Zaključak je da se na kontaktima prekidača mogu pojaviti dvostruke vrijednosti pogonskog napona, što može dovesti do ponovnog paljenja električnog luka, te samim tim i daljeg povećanja prenapona.

### 2.4.3 Isključenje malih induktivnih struja

Ovaj tip isključenja karakterističan je za isključenje transformatora u praznom hodu, isključenje transformatora opterećenog prigušnicom, isključenje motora u praznom hodu i u fazi zalijetanja. Iako su struje male, ovaj tip prekidanja značajno napreže električne aparate, jer se u tim situacijama mogu pojaviti visoki povratni naponi. Kada se prekidaju male struje koriste se prekidači sa nezavisnom karakteristikom, koji imaju mogućnost da prekinu električni luk prije nego struja prođe kroz nulu. Ta pojava intenzivne dejonizacije prostora između kontakata sklopnog aparata, koja izaziva gašenje luka prije prolaska struje kroz nulu i pojavu visokih prenapona zove se "sječenje struje". Na slici 2.16 može se vidjeti grafički prikaz isključenja malih induktivnih struja.

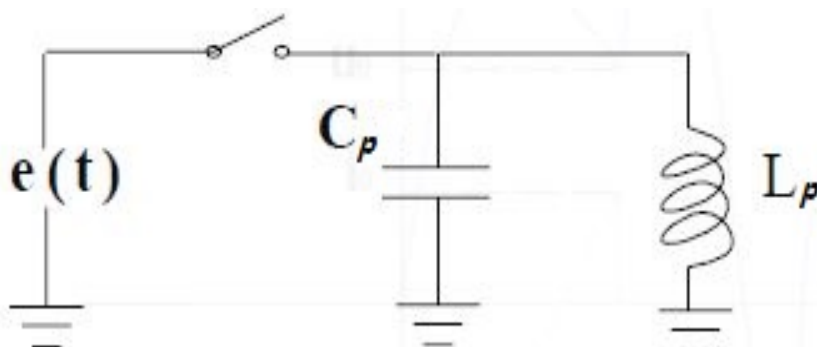
Kod sklopnih aparata sa nezavisnom karakteristikom intenzitet strujanja medijuma za gašenje luka ne zavisi od veličine struje koja se prekida. Strujanje medijuma za gašenje luka izaziva poseban mehanizam za vrijeme dok je prisutan električni luk. Energija koja je potrebna za strujanje medijuma za gašenje luka se dovodi iz posebnog izvora. U ovaj tip sklopnih aparata spadaju pneumatski, SF6 i ostali aparati koji rade na sličnom principu. Dakle, glavni zadatak sklopnih

aparata prilikom isključivanja malih induktivnih struja je da dejstvom otpornosti električnog luka smanje struju do nule prije njenog prirodnog prolaska kroz nulu.



Slika 2.16: Grafički prikaz isključenja malih induktivnih struja

Najjednostavnije tumačenje prenapona koji nastaju usljed isključenja malih induktivnih struja je pomoću bilansa magnetne i elektrostatičke energije prije i posle gašenja električnog luka. Ekvivalentna šema je prikazana na slici 2.17, na kojoj je sa  $L_p$  označena induktivnost potrošača, a sa  $C_p$  ulazna kapacitivnost namotaja.



Slika 2.17: Ekvivalentna šema za proračun sklopnih prenapona pri isključenju malih induktivnih struja

Elektromagnetna energija prije sječenja struje je:

$$E_L = \frac{1}{2} L_p i_0^2 \quad (2-61)$$

pri čemu je vrijednost prije sječene struje:

$$i_0 = I_m \sin \varphi. \quad (2-62)$$

Elektrostatička energija neposredno prije sječenja struje je:

$$E_C = \frac{1}{2} C_p u_0^2 \quad (2-63)$$

pri čemu je trenutna vrijednost napona na kapacitivnosti u trenutku sječenja struje:

$$u_0 = U_m \cos \varphi. \quad (2-64)$$

Nakon sječenja struje ( $i_0 = 0$ ) elektromagnetna energija se pretvara u elektrostatičku. Ukupna elektrostatička energija će iznositi:

$$E'_c = E_L + E_C \quad (2-65)$$

$$E'_c = \frac{1}{2} C_p u_{max}^2, \quad (2-66)$$

pri čemu je  $u_{max}$  tjemena vrijednost napona na ulaznoj kapacitivnosti namotaja potrošača nakon sječenja struje.

Iz prethodne dvije relacije slijedi da je:

$$\frac{1}{2} C_p u_{max}^2 = \frac{1}{2} L_p i_0^2 + \frac{1}{2} C_p u_0^2. \quad (2-67)$$

Na osnovu gornjeg izraza određujemo maksimalni prenapon na namotaju potrošača nakon sječenja struje:

$$u_{max} = \sqrt{u_0^2 + \eta \frac{L_p}{C_p} i_0^2}. \quad (2-68)$$

Koeficijent gubitaka  $\eta$  predstavlja odnos elektrostatičke energije prije i poslije sječenja struje i magnetne energije na induktivnosti potrošača prije sječenja struje. U realnim električnim kolima

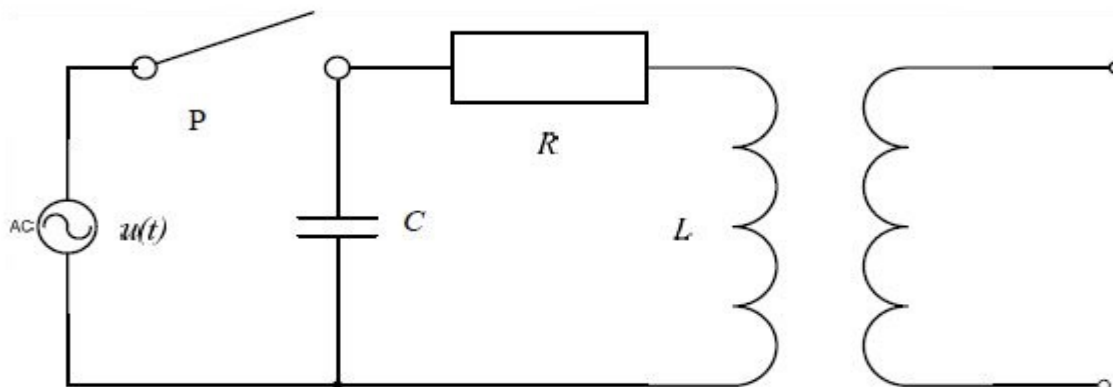


samo jedan dio magnetne energije se pretvara u elektrostatičku. Kod motora, koeficijent gubitaka  $\eta$  ima vrijednost približnu jedinici, u slučaju transformatora u praznom hodu od 0,3 do 0,5.

Analizirajući posljednju relaciju uočava se da vrijednost prenapona raste sa vrijednošću sječene struje. Ukoliko je tjemena vrijednost struje koja se prekida veća od vrijednosti sječene struje sklopnog aparata, tada vrijednost sječene struje zavisi i od amplitude struje koja se prekida, i obrnuto. U monofaznom kolu visina prenapona najviše zavisi od induktivnosti, kapacitivnosti namotaja potrošača i veličine sječene struje.

#### 2.4.3.1 Isključenje primarne strane energetskog transformatora u praznom hodu

Isključenje neopterećenog transformatora pri prekidanju nazivnih ili većih struja, zbog velike energije električnog luka, generiše visoke povratne prenapone. Pri isključenju, struja zadržava sinusni talasni oblik sve do gašenja električnog luka, koje će uslijediti prolaskom struje kroz nulu. Kod manjih struja proces gašenja električnog luka će se desiti prije prolaska struje kroz nulu. Na slici 2.18 je prikazana ekvivalentna šema neopterećenog transformatora pri isključenju malih induktivnih struja.



Slika 2.18: Ekvivalentna šema isključenja neopterećenog transformatora

Za dobijanje elektromagnetne i elektrostatičke energije koriste se iste relacije kao 2-61 i 2-63. Izjednačavanjem relacija dobija se približno tačan izraz za sklopni prenapon:

$$u_c = i_g \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2-69)$$

pri čemu je: -  $u_c$  sklopni prenapon na kapacitivnosti u trenutku isključenja,  
-  $i_g$  trenutna vrijednost struje gašenja.

Iz relacije 2-69 slijedi da što je veća struja gašenja, to će prenapon biti viši.

Sječenje struje u  $t = 0$  ne može se dogoditi momentalno, usljed čega nastaje prelazna pojava koja u početnom trenutku zadržava vrijednost  $i_g$ , i određena je izrazom [2]:

$$Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt = 0 \quad (2-70)$$

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} \cdot i = 0$$

gdje su R i L vrijednosti radne otpornosti i induktivnosti primarnog namotaja transformatora.

Iz 2-70 slijedi:

$$i(t) = e^{-\delta t} \cdot (K_1 \cos \omega_0 t + K_2 \sin \omega_0 t) \quad (2-71)$$

gdje je:  $\delta$  – koeficijent prigušenja strujnog kruga  $\delta = \frac{R}{2L}$ ,

$$\omega_0 - \text{kružna frekvencija strujnog kruga } \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

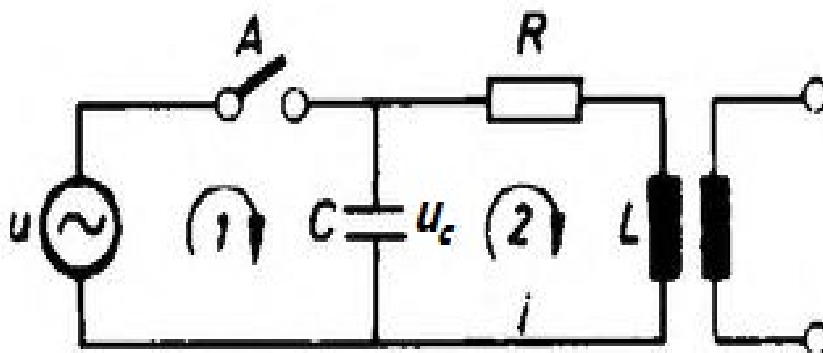
Jednačina za sklopni prenapon na kapacitivnosti C je:

$$u_c(t) = \frac{e^{-\delta t}}{C \cdot (\omega_0^2 + \delta^2)} [(K_1 \omega_0 - K_2 \delta) \sin \omega_0 t - (K_1 \delta + K_2 \omega_0) \cos \omega_0 t] + K_3 \quad (2-72)$$

Konstante  $K_1$ ,  $K_2$  i  $K_3$  se određuju iz graničnih uslova po kojima mora biti za:

$$t = 0 \rightarrow i(0) = i_g; u_c(0) = -u_g$$

$$t = \infty \rightarrow u_c(\infty) = 0 \quad (2-73)$$



Slika 2.19: Ekvivalentna šema transformatora sa odabranim smjerovima struja

Na temelju odabranih pozitivnih smjerova na ekvivalentnoj šemi transformatora sa slike 2.19 dobija se:

$$u(t) = u_{c1}(t)$$

$$u_c(t) = u_{c2}(t) = -u_{c1}(t) = -u(t). \quad (2-74)$$

Na osnovu toga iz jednačina 2-71 i 2-72 proizilazi:

$$i(0) = K_1 = i_g$$

$$u_c(\infty) = K_3 = 0$$

$$u_c(0) = -\frac{i_g}{c} \cdot \frac{\delta}{\omega_0^2 + x^2} - \frac{K_2}{c} \cdot \frac{\omega_0}{\omega_0^2 + x^2} = -u_g \quad (2-75)$$

$$K_2 = u_g \cdot \frac{C(\omega_0^2 + x^2)}{\omega_0^2} - i_g \cdot \frac{\delta}{\omega_0}$$

Kada se uvrste granični uslovi izraz za sklopni prenapon prelazi u oblik:

$$u_c(t) = e^{-\delta t} \cdot \left[ \left( i_g \cdot \frac{L}{c} - u_g \cdot \frac{\delta}{2\sqrt{\frac{L}{c}}} \right) \cdot \sin \omega_0 t - u_g \cos \omega_0 t \right] \quad (2-76)$$

gdje je  $\delta = \frac{R}{2L}$  i  $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ .

Maksimalna vrijednost prenapona se dostiže u trenutku  $t_{max}$ :

$$\omega_0 t_{max} = \frac{\pi}{2}$$

$$t_{max} = \frac{\pi}{2\omega_0} = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{LC} \quad (2-77)$$

odakle je

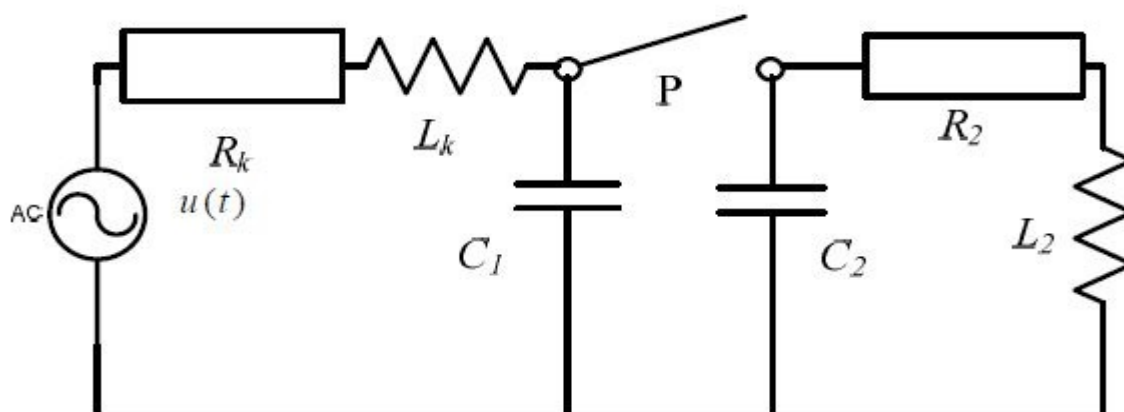
$$u_{cmax} = e^{-\frac{R}{2L}t_{max}} \cdot \left( i_g \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} - u_g \cdot \frac{R}{2\sqrt{LC}} \right).$$

Napon  $u_{cmax}$  u određenim uslovima može imati vrlo visoke vrijednosti koje mogu ugroziti elemente postrojenja. On takođe može da izazove povratni napon na sklopnom aparatu  $u_A$ , koji nastaje superpozicijom prenapona  $u_c$  i napona izvora  $u$ , tj:

$$u_A = u_c + u. \quad (2-78)$$

#### 2.4.3.2 Isključenje sekundarne strane energetskog transformatora opterećenog radno – induktivnim potrošačem

Nastajanje sklopnog prenapona može se prikazati i na primjeru isključivanja realne prigušnice koja je priključena na distributivni transformator.[18]



Slika 2.20: Ekvivalentna šema energetskog transformatora opterećenog prigušnicom

Na slici 2.20 prikazana je ekvivalentna šema transformatora koji je opterećen prigušnicom, a koju čine sljedeći elementi:

1. Transformator

$R_k$  – ekvivalentna radna otpornost,

$L_k$  – rasipna induktivnost,

$C_1$  – kapacitivnost sekundarnog namotaja prema zemlji.

2. Potrošač

$R_2$  – radna otpornost,

$L_2$  – induktivnost,

$C_2$  – kapacitivnost.

U stacionarnom stanju, primjenom Kirhofovih zakona, važi da je:

$$u(t) = (R_k + R_2) \cdot i_0(t) + (L_k + L_2) \cdot \frac{di_0(t)}{dt} \quad (2-79)$$

U trenutku isključenja prekidača dolazi do razdvajanja izvora energije i radno - induktivnog potrošača, pri čemu nastaju dvije nezavisne petlje koje se za potrebe analitičkog proračuna mogu posmatrati odvojeno. Na osnovu predašnjeg stacionarnog stanja definišu se početni uslovi za analizu prelazne pojave koja će se završiti novim stacionarnim stanjem u oba strujna kruga. Njihova razlika se javlja na prekidaču i može uzrokovati proboj između njegovih kontakata.

Za potrebe određivanja sklopnog prenapona primjenjuje se Kirhofov zakon za sve tri petlje, te tako za prvu petlju važe relacije:

$$u(t) = R_k i_1(t) + L_k \frac{di_1(t)}{dt} + \frac{1}{C_1} \int i_1(t) dt \quad (2-80)$$

$$u_{c1}(t) = u(t) - R_k i_1(t) - L_k \frac{di_1(t)}{dt} \quad (2-81)$$

Za drugu petlju važi:

$$R_2 i_2(t) + L_2 \frac{di_2(t)}{dt} + \frac{1}{C_2} \int i_2(t) dt = 0 \quad (2-82)$$

$$u_{c2}(t) = -R_2 i_2(t) - L_2 \frac{di_2(t)}{dt} \quad (2-83)$$

Nakon prekidanja strujnog kruga, sklopni prenaponi na kapacitivnostima  $C_1$  i  $C_2$  se računaju prema izrazima:

$$u_c(t) = u_{c1}(t) - u_{c2}(t) \quad (2-84)$$

$$u_{c1}(t) = u_{c1s}(t) + (\Delta u_{01} \cos(\omega t) + \Delta i_0 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \sin(\omega t)) \cdot e^{-\delta t} \quad (2-85)$$

$$u_{c2}(t) = u_{c2s}(t) + (\Delta u_{02} \cos(\omega t) + \Delta i_0 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \sin(\omega t)) \cdot e^{-\delta t} \quad (2-86)$$

pri čemu su:

$u_{c1s}$  i  $u_{c2s}$  – trenutne vrijednosti stacionarnih napona na kapacitivnostima  $C_1$  i  $C_2$ ,

$\Delta u_{01}$  i  $\Delta u_{02}$  – razlike trenutnih vrijednosti napona na kapacitivnostima  $C_1$  i  $C_2$  neposredno prije otvaranja prekidača i vrijednosti stacionarnih napona na kapacitivnostima  $C_1$  i  $C_2$  u trenutku  $t = 0$ ,  
 $\Delta i_0$  – vrijednost sječene struje tj. vrijednost struje koja prolazi kroz prekidač u trenutku otvaranja prekidača,

$\sqrt{\frac{L}{C}}$  – talasna otpornost strujnog kruga,

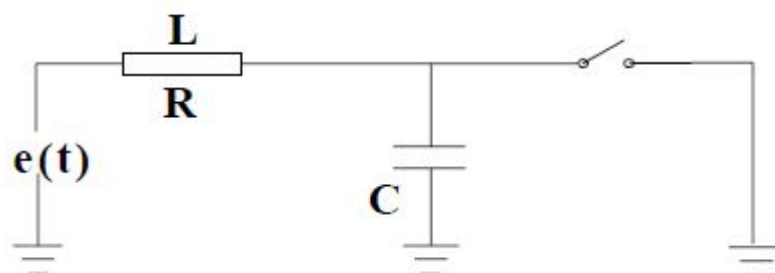
$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  – talasna kružna frekvencija strujnog kruga i

$\delta = \frac{R}{2L}$  – koeficijent prigušenja strujnog kruga.

Ako sječena struja ima veliku vrijednost, sklopni prenaponi su vrlo visoki u krugu talasne otpornosti. Prenapon će se desiti u transformatoru, prigušnici i ostalim djelovima energetske mreže zbog viška elektromagnetne energije u samom strujnom krugu.[2]

#### 2.4.4 Isključenje kvarova

U visokonaponskim (VN) mrežama gašenje električnog luka pri kratkom spoju se vrši kada struja kroz prekidač prolazi kroz nulu, jer je u tom trenutku temperatura okolnog prostora najniža, brzina jonizovanih čestica je najmanja, ali je *ems* maksimalna.[16] Na slici 2.21 prikazana je ekvivalentna šema za proračun prenapona pri isključenju kratkog spoja, za koji možemo smatrati da je nastao neposredno iza prekidača.



Slika 2.21: Ekvivalentna šema za proračun prenapona pri isključenju kratkog spoja

Napon izvora je jednak:

$$e(t) = E_m \cos \omega t \quad (2.87)$$

pri čemu je:

$E_m$  – tjemena vrijednost napona.

Struja kratkog spoja, prije otvaranja kontakata, je pretežno induktivnog karaktera, za koju važi uslov da je  $\omega L \gg R$ :

$$i(t) = \frac{E_m}{\omega L} \sin \omega t \quad (2.88)$$

pri čemu je:

$\omega L$  – induktivna reaktansa.

U trenutku isključenja prekidača, napon na kondenzatoru je jednak nuli, nakon čega dostiže maksimum. Za povratni napon otvorenog prekidača važi:

$$u_p(t) = E_m (\cos \omega t - e^{-\delta t} \cos \omega_0 t) \quad (2.89)$$

pri čemu je:

$\omega$  – pogonska frekvencija mreže,

$\omega_0$  - sopstvena frekvencija mreže:  $\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ,

$\delta$  – koeficijent prigušenja mreže:  $\delta = \frac{R}{2L}$ .

Relacija 2.89 važi kada je  $\omega_0 \gg \omega$ , ali ne u tolikoj mjeri da se može posmatrati kao konstantna vrijednost. Uz pomenuti uslov, slijedi da je povratni napon na otvorenom prekidaču jednak:

$$u_p(t) = E_m(1 - e^{-\delta t} \cos \omega_0 t) \quad (2.90)$$

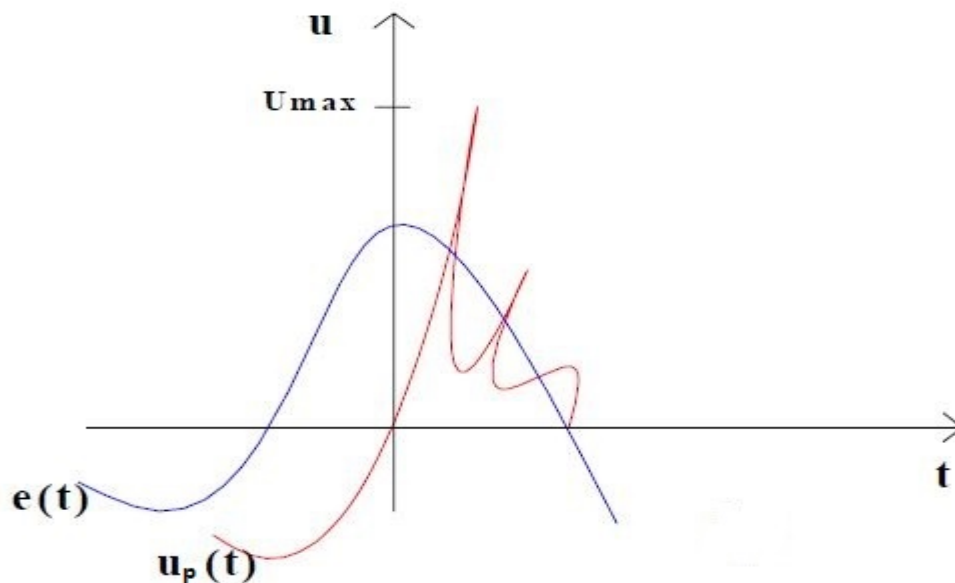
Zbog prethodno pomenutih uslova, gdje je sopstvena frekvencija mnogo veća od frekvencije izvora ( $\omega_0 \gg \omega$ ), kao i velike vremenske konstante (jer je  $L \gg R$ ), povratni napon na kontaktima prekidača približno može dostići dvostruku vrijednost maksimalnog pogonskog napona, odnosno:

$$U_{max} = 2E_{max} \quad (2.91)$$

tj. koeficijent prenapona  $k_p = 2$ .

Međutim, zbog prisustva otpornosti prigušenja u mreži, koji se javlja u realnim uslovima, koeficijent prenapona je najčešće u granicama od 1,3 – 1,6.

Na slici 2.22 prikazan je grafik sa prenaponima koji se javlja pri isključenju kratkog spoja.



Slika 2.22: Grafički prikaz prenapona koji se javlja pri isključenju kratkog spoja

Izuzetno je važno da se dielektrična izdržljivost što prije uspostavi, kako ne bi došlo do ponovnog paljenja električnog luka. Zbog toga se brzina uspostavljanja dielektrične izdržljivosti smatra veoma važnom karakteristikom prekidača.



#### **2.4.4.1 Bliski kratki spoj**

Ukoliko se kvar dogodi na određenoj udaljenosti od prekidača može se desiti da prekidač adekvatno ne odreaguje. Najčešće se udaljenost pojave kratkog spoja izražava u kilometrima i u tom slučaju govori se o bliskom kratkom spoju. Bliski kratki spoj karakteriše drugačiji karakter povratnog napona, koji uprkos manjoj struji može otežati uslove prekidanja.

Na slici 2.23 može se vidjeti šematski prikaz i dijagram bliskog kratkog spoja, pri čemu date oznake imaju sljedeća značenja:

G – generator,

A – prekidač,

K – mjesto kratkog spoja,

$u_g$  – napon stezaljki na strani generatora,

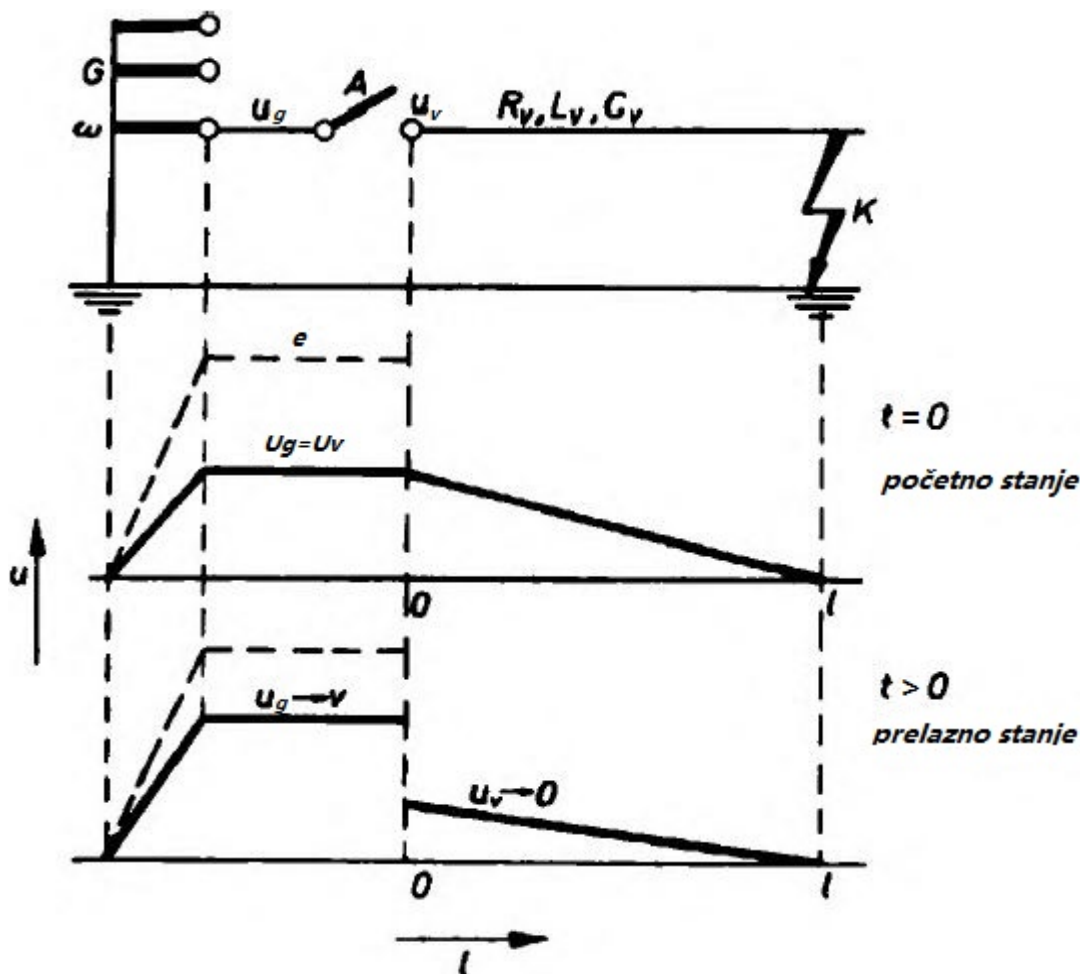
$u_v$  – napon stezaljki na strani voda,

$e$  – elektromotorna sila generatora,

$R_v, L_v, C_v$  – otpornost, induktivnost i kapacitivnost posmatranog dijela voda,

$\omega$  – pogonska kružna frekvencija generatora,

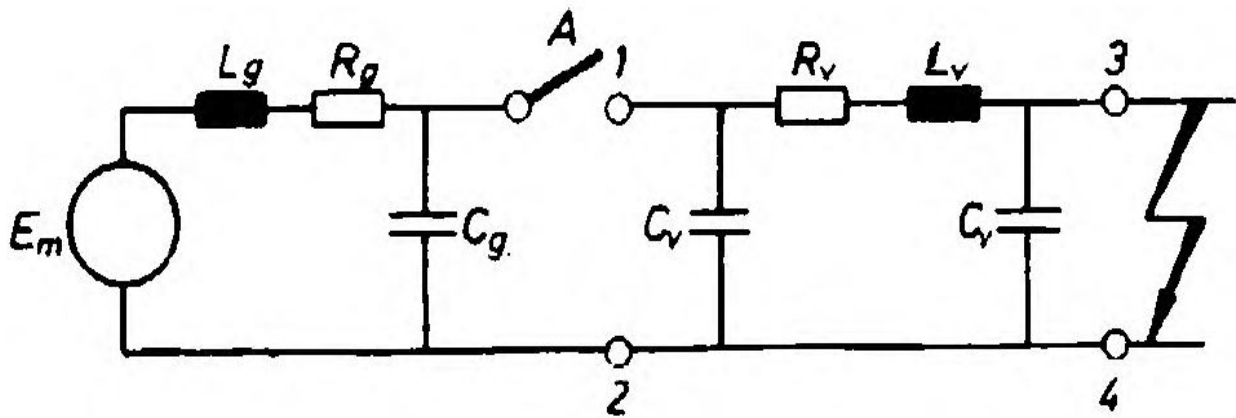
$l$  – dužina voda do mjesta pojave kratkog spoja.



Slika 2.23: Šematski prikaz bliskog kratkog spoja

Na gornjem dijagramu je prikazana raspodjela napona do trenutka otvaranja prekidača, a na donjem dijagramu raspodjela napona u prolaznom periodu neposredno nakon prekidanja. Pri otvaranju prekidača A, napon  $u_g$  raste prema elektromotornoj sili  $e$ , dok napon  $u_v$  opada prema nuli. Iz tog razloga na otvorenom polu prekidača nastaje povratni napon  $u_A$  za koji važi [17]:

$$u_A = u_g - u_v. \quad (2.92)$$



Slika 2.24: Ekvivalentna šema strujnog kruga

Prelazna pojava napona  $u_g$  određuje se iz uslova ravnoteže za strujni krug  $R_g - L_g - C_g$ , prikazanom na ekvivalentnoj šemi sa slike broj 2.24. Ako uzmemo da je za  $t = 0$  uzmemo da je početna vrijednost napona  $u_g$  jednaka:

$$u_{g0} = u_{v0} - u_{A0}, \quad (2.93)$$

pri čemu su:

$u_{v0}$  – početni napon voda,

$u_{A0}$  – napon gorenja luka.

Ukoliko kontakti prekidača nisu premošteni paralelnom otpornosti, dobija se relacija za napon  $u_g$ :

$$u_g = E_m - (E_m + U_{A0} - U_{v0}) \left( \frac{\delta}{\omega_g} \sin \omega_g t + \cos \omega_g t \right) e^{-\delta t} \quad (2.94)$$

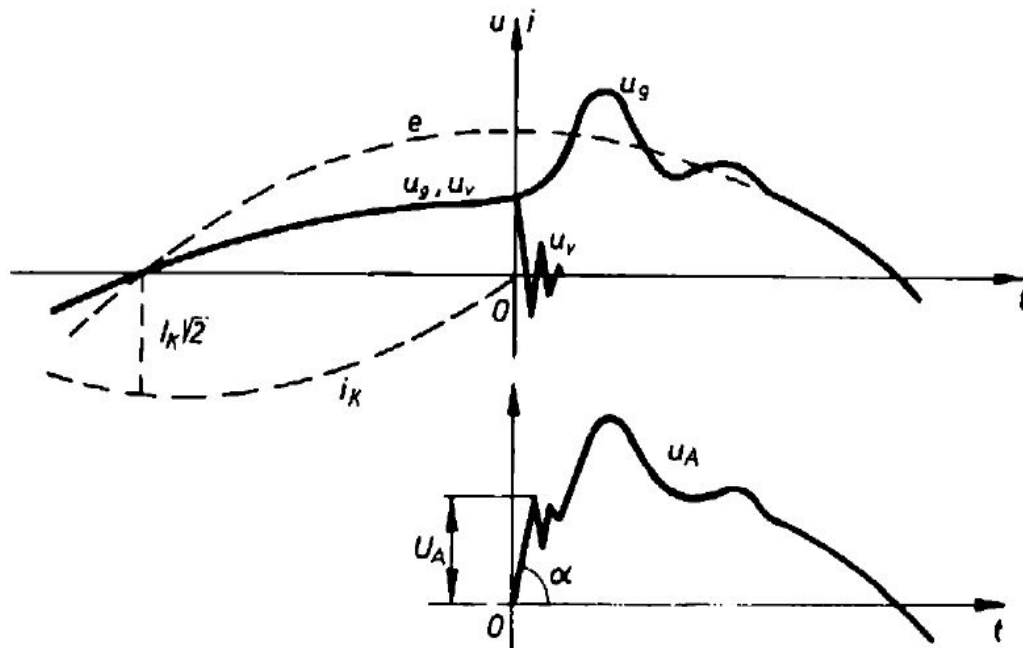
pri čemu je:

$E_m$  – tjemena vrijednost elektromotorne sile,

$\omega_g$  – učestanost prolazne komponente  $\omega_g \approx \frac{1}{\sqrt{L_g C_g}}$ ,

$\delta$  – koeficijent prigušenja  $\delta = \frac{R_g}{2L_g}$ .

Povratni napon koji nastaje na otvorenom polu prekidača osciluje sa dvije sopstvene frekvencije, prikazanim na slici 2.25. Na dijagramu je radi jednostavnosti zanemarena otpornost električnog luka.



Slika 2.25: Povratni napon pri bliskom kratkom spoju

Neposredno prije gašenja električnog luka ( $t \leq 0$ ), prilike na početku voda određene su strujom kratkog spoja i naponom koji se troši na pretežno induktivni pad napona na vodu:

$$i_k = I_k \sqrt{2} \sin \omega t \quad (2.95)$$

$$u_v \approx L_v \frac{di_k}{dt} = L_v \omega I_k \sqrt{2} \cos \omega t. \quad (2.96)$$

Ako važi da je induktansa voda uz pogonsku frekvenciju:

$$X_v = L_v \omega,$$

slijedi da je:

$$u_v = X_v I_k \sqrt{2} \cos \omega t. \quad (2.97)$$

Za  $t = 0$ , odnosno početna vrijednost napona iznosi:

$$U_{v0} = X_v I_k \sqrt{2} = l X_1 I_k \sqrt{2}, \quad (2.98)$$

gdje je  $X_1$  reaktansa voda po jedinici dužine.

Prema tome važi da je amplituda povratnog napona  $U_A$  jednaka:

$$U_A = 2U_{v0} - U_{A0} \quad (2.99)$$

Ukoliko zanemarimo napon električnog luka  $U_{A0}$ , slijedi:

$$U_A \approx 2U_{v0} = l X_1 I_k \sqrt{2} = K I_k. \quad (2.100)$$

Stvarna amplituda povratnog napona je manja od prikazane jer su pri razmatranju zanemareni mnogi faktori koji utiču na njeno smanjenje, kao što su omska otpornost voda i kratkospojne veze, napon električnog luka, itd.

#### 2.4.4.2 Automatsko ponovno uključenje (APU)

Automatsko ponovno uključenje (APU) se koristi za brzo ponovno uspostavljanje napajanja, nakon isključenja i beznaponske pauze usljed prolaznih kvarova. [18] Ukoliko se kvar tokom beznaponske pauze otkloni tj. ako kvar ima prolazni karakter (što je najčešće slučaj u EES - u), sistem će se nakon uključjenja prekidača vratiti u normalno pogonsko stanje.

Uz pomoć uređaja za APU moguće je uspostavljati brzo, sporo i kombinovano uključjenje prekidača sa kratkim ili dugim beznaponskim pauzama. [19]

Ako se desi da se prekidač nakon prvog isključenja ponovo isključi, tada se radi o trajnom kvaru koji je potrebno na drugi način otkloniti. U toj situaciji ponovno uključjenje prekidača moguće je samo ručno, nakon čega zbog sigurnosti uređaj ostaje blokiran nekoliko trenutaka.

Postoje dvije vrste isključenja:

**Monofazno** – primjenjuje se na VN mrežama kako bi se prenos električne energije nastavio preko dvije zdrave faze, te time ostvario kontinuitet snabdijevanja konzuma;

**Trofazno** – koristi se u SN mrežama, kod kojeg se prekidači pokreću jednim mehanizmom za sva tri kontakta.

### 3. Analiza karakterističnih veličina reprezentativnih sklopnih prenapona

#### 3.1 Uvod

Sklopni prenaponi predstavljaju najvažniji kriterijum na kojima se temelji projektovanje izolacije visokonaponskih postrojenja. Prenaponi su izraženi u relativnim jedinicama i njihova vrijednost se računa po formuli:

$$U_{(r.j.)} = \frac{U_m \sqrt{3}}{\sqrt{2}}, \quad (3-1)$$

pri čemu je  $U_m$  maksimalna vrijednost napona.

U cilju provjere sposobnosti izolacije da izdrži sklopne prenapone, sprovode se ispitivanja sa reprezentativnim sklopnim talasnim oblicima. Pretpostavlja se da prenapon proizvodi isti efekat na izolaciju kao prenapon određene klase koji se javljaju u radu zbog različitih uzroka. Reprezentativni sklopni prenaponi se sastoje od napona sa standardnim talasnim oblikom određene klase, i mogu se definisati sa jednom ili sa više vrijednosti, ili frekvencijskom raspodjelom vrijednosti koje karakterišu uslove rada.

#### 3.2 Podjela prenapona prema obliku i trajanju – IEC 71-1

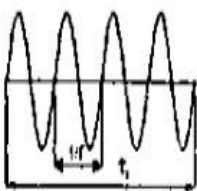
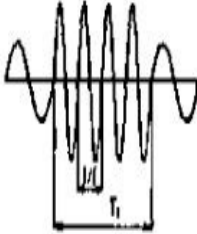
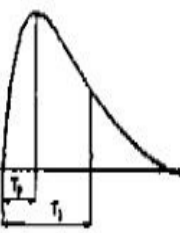


Naponi i prenaponi klasifikovani su prema njihovom obliku i trajanju, i dijele se u sljedeće klase:

- *Trajni napon pogonske frekvencije*: ima konstantnu efektivnu vrijednost i trajno je priključen na stezaljke opreme;
- *Privremeni prenapon*: prenapon pogonske frekvencije relativno dugog trajanja. Može biti neprigušen ili slabo prigušen, sa frekvencijom koja je nekoliko puta manja ili veća od pogonske frekvencije;
- *Prelazni prenapon*: kratkotrajni prenapon, sa trajanjem od nekoliko milisekundi ili kraće, oscilatoran ili neoscilatoran, najčešće vrlo prigušen. Prelazni prenaponi dijele se na:
  - a) Prenapone sporog porasta čela: To su prelazni prenaponi obično jednog polariteta, sa vremenom trajanja čela od 20 do 5000  $\mu$ s i vremenom trajanja začelja do 20 ms;
  - b) Prenapone brzog porasta čela: prelazni prenaponi obično jednog polariteta, sa vremenom trajanja čela od 0.1 do 20  $\mu$ s i vremenom trajanja začelja do 300  $\mu$ s;
  - c) Prenapone vrlo brzog porasta čela: prelazni prenaponi obično jednog polariteta, sa vremenom trajanja čela do 0.1  $\mu$ s, i ukupnim trajanjem do 3 ms.

- *Kombinovani prenaponi* (privremeni, sporog porasta čela, brzog porasta čela, vrlo brzog porasta čela): sastoje se od dvije ili više komponenti istovremeno i opterećuju izolaciju opreme priključenu između faze i zemlje.[6]

U tabeli 3.1 prikazana je klasifikacija prenapona sa karakterističnim talasnim oblikom, frekventnim opsegom i definisanim načinom ispitivanja.

Tabela 3.1: Prenaponi i ispitivanja

VRSTE NAPONA	NISKA FREKVENCIJA		PRELAZNI		
	TRAJNI	PRIVREMENI	SPORI (sklopni)	BRZI (atmosferski)	VRLO BRZI
Oblik napona					
Područje oblika napona	$f = 50$ ili $60$ Hz $T_1 \geq 3600$ s	$10 < f < 500$ Hz $3600 \geq T_1 \geq 0.03$ s	$5000 > T_1 > 20$ $\mu$ s $20$ ms $\geq T_2$	$20 > T_1 > 0.1$ $\mu$ s $300$ ms $\geq T_2$	$100 > T_1 > 3$ ns $0.3 > f_1 > 100$ MHz $30 > f_2 > 300$ kHz $3$ ms $\geq T_1$
Standardni oblik napona	$f = 50$ ili $60$ Hz $T_1$ (*)	$48 < f < 62$ Hz $T_1 = 60$ s	$T_1 = 250$ $\mu$ s $T_2 = 2500$ $\mu$ s	$T_1 = 1.2$ $\mu$ s $T_2 = 50$ $\mu$ s	(*)
Standardno ispitivanje podnosivosti	(*)	Ispitivanje kratkotrajnim naponom 50 Hz	Ispitivanje sklopnim impulsom	Ispitivanje atmosferskim impulsom	(*)



### **3.3 Ispitivanje i koordinacija izolacije pri sklopnim prenaponima**

Koordinacija izolacije predstavlja odabir dielektrične čvrstoće opreme u odnosu na napone koji se mogu javiti u sistemu za koji je namijenjena oprema, uzimajući u obzir radno okruženje i karakteristike dostupnih zaštitnih uređaja.[3]

Sklopni prenaponi naprežu izolaciju opreme na poseban način. Izolacija mora izdržati znatno više napone od pogonskih, jer bi u suprotnom svaka prelazna pojava izazivala kvarove na postrojenju. U fazi projektovanja je potrebno odrediti nivo izolacije opreme, a to se određuje vrijednošću podnosivih napona, kao i vrijednošću i trajanju udarnih napona. Udarni naponi predstavljaju napone koji se koriste u svrhe ispitivanja. Pomoću njih je moguće simulirati uticaj sklopnih prenapona na opremu u sistemu.

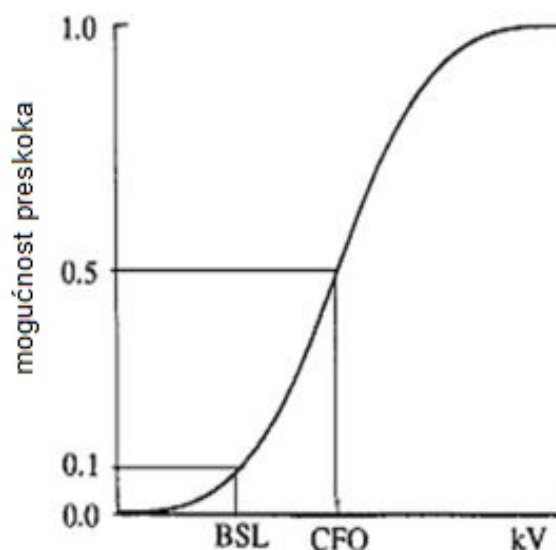
Glavna karakteristika koja se tiče izolacije je razorno pražnjenje koje se može dogoditi tokom pojave naprezanja. Pod razornim pražnjenjem odnosno probojem se podrazumijeva gubitak dielektričnih svojstava izolacije, tako da izolacija počinje da provodi struju kroz provodnik. Međutim, zbog slučajnosti fizičkih procesa koji dovode do razornog pražnjenja, isto naprezanje koje se desi nekoliko puta pod istim uslovima ne mora uvijek uzrokovati razorno pražnjenje. Takođe se pražnjenje može dogoditi u različitim vremenima. Osim toga, pojava naprezanja, čak i ako ne uzrokuje pražnjenje, može dovesti do promjena karakteristika izolacije.

Procedura koordinacije izolacije sastoji se od izbora skupa standardizovanih podnosivih napona koji karakterišu izolaciju opreme u okviru ovog standarda. Prenaponi koji ugrožavaju izolaciju definišu se na osnovu amplitude, talasnog oblika i vremena trajanja pomoću sistema koji uključuje izbor i poziciju uređaja za zaštitu od prenapona. Na ovaj način se može odrediti reprezentativni prenapon uzimajući u obzir karakteristike izolacije. Reprezentativni prenaponi takođe mogu biti okarakterisani sa pretpostavljenim maksimumom, skupom vršnih vrijednosti ili potpunom statističkom raspodjelom vršnih vrijednosti.

Vrijednost priključenog napona koji određuje dimenzije izolacije definiše se kao izolacioni nivo. Osnovni izolacioni nivo pri sklopnom impulsu (eng. Basic Switching Impulse Insulation Level – BSL) je električna čvrstoća izolacije izražena u uslovima vršne vrijednosti standardnog sklopnog impulsa. BSL može biti statistički ili konvencionalni. [20] Statistički BSL je primjenljiv samo na samoobnovljivu izolaciju, dok je konvencionalni primjenljiv na nesamoobnovljivu izolaciju. Samoobnovljiva izolacija nakon završetka pražnjenja potpuno obnavlja svoja izolaciona svojstva, dok nesamoobnovljiva trajno gubi ili ne obnavlja u potpunosti izolaciona svojstva. BSL se primjenjuje u vlažnim uslovima. Statistički BSL predstavlja vršnu vrijednost standardnog sklopnog prenapona za koji izolacija pokazuje 90 % vjerovatnoće da će izdržati i 10 % da će doći do njenog proboja. Konvencionalni BSL predstavlja vršnu vrijednost standardnog sklopnog impulsa za koji kod izolacije ne dolazi do razornog pražnjenja pri određenom broju zadatih impulsa.

U standardu IEC 71, BSL se naziva podnosivi napon sklopnog impulsa i definicija je potpuno ista, ali ne postoji podjela na statistički i konvencionalni.

Za svaku primjenu impulsa koji ima standardni talasni oblik i čija je vršna vrijednost jednaka BSL – u, vjerovatnoća preskoka ili otkaza je 10 %. Karakteristike čvrstoće samoobnovljive izolacije se mogu predstaviti kumulativnom Gausovom raspodjelom, koja je prikazana na slici 3.1.



Slika 3.1: Karakteristika čvrstoće izolacije za samoobnovljivu izolaciju

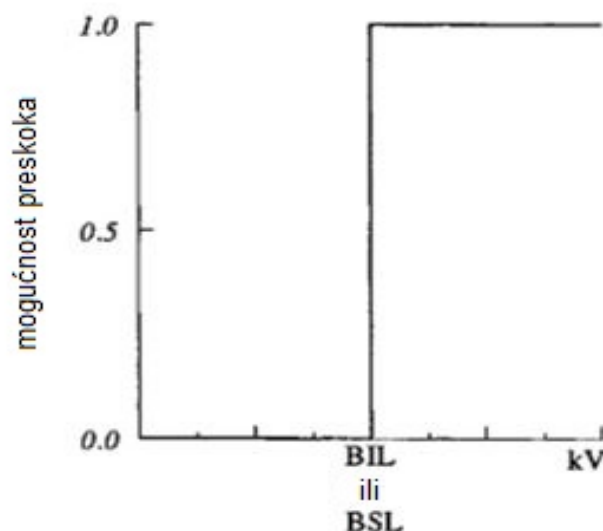
Srednja vrijednost ove raspodjele ili karakteristike definisana je kao kritični preskočni napon (eng. Critical Flashover voltage – CFO). Primjena CFO na izolaciju rezultiraće sa vjerovatnoćom od 50 % tj. polovinom preskočnog impulsa. BSL je preko CFO definisan formulom [21]:

$$BSL = CFO(1 - 1.28 \frac{\sigma_f}{CFO}), \quad (3-2)$$

pri čemu je sa  $\sigma_f$  označen koeficijent varijacije tj. standardna devijacija za CFO.

Standardna devijacija za sklopni impuls približno iznosi 5% za izolaciju stubova, dok je za izolaciju postrojenja do 7%.

Konvencionalni BSL je mnogo jednostavnije definisan od statističkog. Ako je jedan ili više impulsa standardnog talasnog oblika i vršne vrijednosti jednake BSL – u primijenjen na izolaciju, i ukoliko ne dođe do preskoka, smatra se da izolacija zadovoljava BSL. Karakteristika čvrstoće izolacije je prikazana na slici 3.2. Iz nje se može zaključiti da se čvrstoća mijenja od 0% vjerovatnoće preskoka (ili kvara) za napon jednak BSL – u, do 100 % vjerovatnoće nastanka preskoka za identični BSL.



Slika 3.2: Karakteristika čvrstoće izolacije za nesamoobnovljivu izolaciju

Standardni BSL – ovi za različitu vrstu opreme i izolacije mogu se naći u IEC 71-1, IEC 313.1 i ANSI C92.

Statistička priroda prenapona, prije svega sklopnog prenapona, zahtijeva izračunavanje velikog broja prenapona kako bi se s određenim stepenom pouzdanosti mogli utvrditi statistički prenaponi u sistemu. VN i VVN sistemi koriste određeni broj nelinearnih elemenata, ali u današnjim mogućnostima i dostupnosti računara moguće je izračunati raspodjelu prenapona. Praktičniji pristup za određivanje zahtijevane vjerovatnoće raspodjele prenapona sistema koristi sveobuhvatni sistemski simulator, stariji tipovi koriste analogne jedinice, dok noviji koriste digitalne simulatore u realnom vremenu (eng. RTDS). U svrhu koordinacije električnih pražnjenja sa električnom čvrstoćom moguće je predstaviti raspodjelu prenapona u obliku funkcije gustine vjerovatnoće (Gausova kriva raspodjele) i vjerovatnoće proboja izolacije kumulativnom funkcijom raspodjele. Poznavanje tih raspodjela omogućava da se utvrdi rizik od pojave kvara.

Testiranja za utvrđivanje BSL – a se moraju podijeliti između konvencionalnih i statističkih. Budući da je konvencionalni BSL vezan za nesamoobnovljivu izolaciju, više je nego poželjno da testiranje bude bez oštećenja. Iz tog razloga testiranje se primjenjuje na jedan ili više impulsa koji imaju standardni talasni oblik čija je vršna vrijednost jednaka BSL – u. Ako ne dođe do oštećenja, testiranje je pozitivno. Iako se na pojedinim testiranjima dešavaju oštećenja ili ti kvarovi, procenat oštećenja je izuzetno nizak. To znači da proizvođač opreme sebi ne može priuštiti procenat oštećenja, na primjer da za transformator snage prelazi 1%, jer ukoliko se to dogodi zaustavlja se proizvodnja i vrši se detaljna revizija projektne dokumentacije.

Uzimajući u obzir uspostavljanje statističkog BSL – a, teoretski nijedan test ne može pouzdano dokazati da izolacija ima vjerovatnoću proboja u iznosu od 10 %. S obzirom na to da je izolacija samoobnovljiva, dozvoljeni su preskoci izolacije.

Izolacija pri ispitivanju reprezentativnim udarnim naponom zadovoljava ako ne nastane preskok pri pet naponskih udara, ili ako nastane jedan preskok, ali se u sljedećih pet udara ne smije dogoditi nijedan.

### **3.4 Karakteristike reprezentativnih sklopnih prenapona**

Karakteristike ispitnih sklopnih prenapona su izražene sljedećim parametrima:

Vrijednost testnog napona: Ako tehnički komitet nije drugačije odredio, vrijednost ispitnog napona je potencijalna maksimalna vrijednost napona. [22]

Strmina talasa: Predstavlja odnos maksimalne vrijednosti i vremena čela talasa:

$$s = \frac{U}{T_1} = \left[ \frac{kV}{\mu s} \right] \quad (3-3)$$

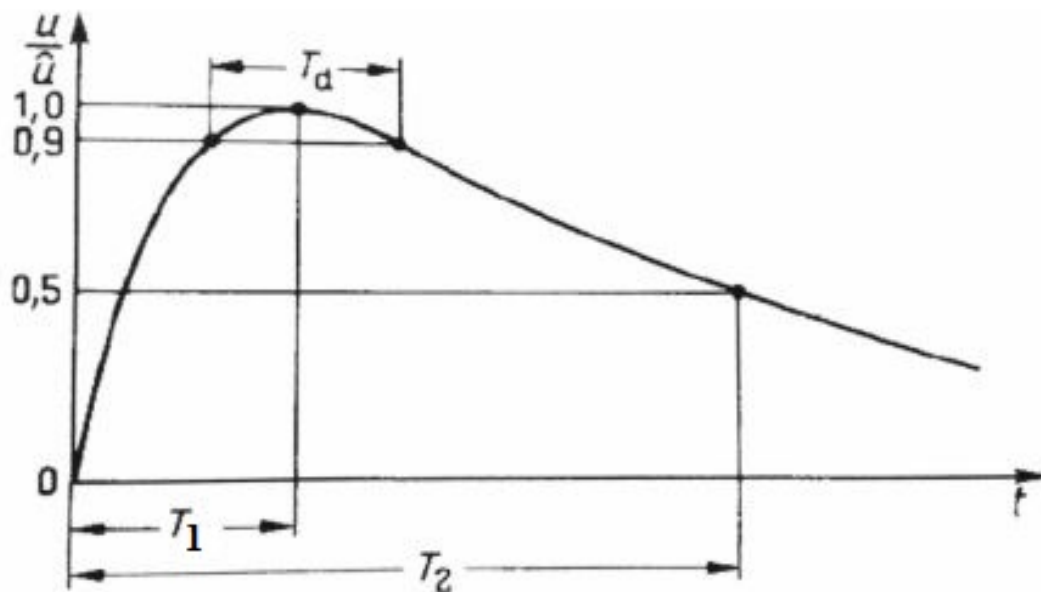
Vrijeme čela (T1): Vremenski interval između stvarne nule napona i trenutka kada je napon dostigao maksimalnu vrijednost.

Vrijeme začelja (vrijeme do polovine vrijednosti napona, T2): Vremenski interval između stvarne nule napona i trenutka kada se maksimalni napon prvi put smanjio na polovinu svoje vrijednosti.

Vrijeme iznad 90% (Td): Vremenski interval tokom kojeg je impulsni napon iznad 90% svoje vršne vrijednosti.

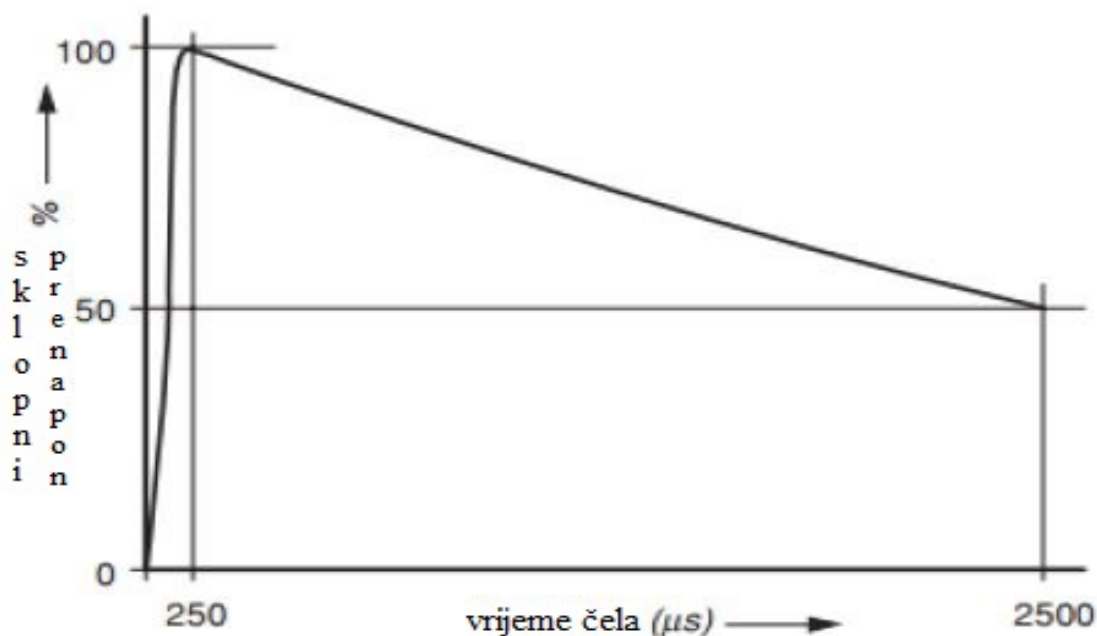
Vrijeme do nule (T0): Vremenski interval stvarne nule napona i trenutka kada napon prvi put prođe kroz nulu.

Na slici 3.3 može se vidjeti grafički prikaz talasnog oblika sklopnog prenapona sa tipičnim vremenskim karakteristikama.



Slika 3.3: Grafički prikaz vremenskih karakteristika talasnog oblika sklopnih prenapona

Kada se definiše sklopni impuls, obično se daje samo jedan skup parametara koji se odnose na talasni oblik. Određeni vremenski parametri bi trebali da budu jasno naznačeni referencom, npr. impuls  $T_1/T_2$  ili  $T_1/T_d/T_0$ . [22] Tipični reprezentativni naponski talas, usvojen kao standard kod ispitivanja opreme na sklopne/komutacione prenapone označava se kao  $\pm 250/2\ 500\ \mu s$ , što znači da je to standardni naponski talas pozitivnog ili negativnog polariteta, s vremenom trajanja čela od  $250\ \mu s$  i vremenom trajanja začelja od  $2\ 500\ \mu s$  (slika 3.4). To znači da će impulsni sklopni talas za ispitivanje dielektrika porasti do njegovog čela za  $250\ \mu s$  sa tolerancijom od  $\pm 20\%$  i propadati do polovine vrijednosti za vrijeme od  $2\ 500\ \mu s$  sa tolerancijom od  $\pm 60\%$ . Tolerancija za tjemenu vrijednost napona iznosi  $\pm 3\%$ . Čelo talasa se računa od stvarnog početka impulsa do njegove vršne vrijednosti. Za ključna ispitivanja u vezi sa čvrstoćom izolacije elemenata sistema, vrijeme čela mora varirati u intervalu između  $100$  i  $1000\ \mu s$ , jer probojna čvrstoća sistema izolacije može biti osjetljiva na talasni oblik napona.



Slika 3.4: Standardni talasni oblik reprezentativnog sklopnog prenapona

### 3.4.1 Koeficijent prenapona

Za potrebe lakšeg uvida u visinu prenapona koristi se koeficijent prenapona  $K_p$ . Koeficijent prenapona predstavlja broj koji pokazuje kolika je visina nastalog prenapona u odnosu na maksimalnu, odnosno vršnu vrijednost faznog napona.[6] Koeficijent prenapona ne sadrži mjernu jedinicu, već se najčešće prikazuje brojem ili postotkom.

$$K_p = \frac{U_p}{\sqrt{2}U_l} = 1.225 \frac{U_p}{U_f} \quad (3-4)$$

Pri čemu je:

$U_p$  – amplituda prenapona;

$U_l$  – efektivna vrijednost linijskog napona;

$U_f$  – efektivna vrijednost faznog napona.

Koeficijent prenapona je jedan od parametara koji se može posmatrati u cilju projektovanja efikasnog, ali i ekonomičnog sistema.

### **3.5 Procedura za testiranje sklopnim prenaponima**

Otkaz električne izolacije može se predstaviti pomoću proboja i preskoka. Proboj predstavlja razorno pražnjenje kroz čvrsti dielektrik, zbog čega dolazi do trajnog gubitka dielektrične čvrstoće. Preskok predstavlja probojno pražnjenje kroz vazduh koji okružuje površinu izolatora, ili kroz vazduh preko površine izolatora između djelova različitog potencijala ili polariteta, prouzrokovano promjenom napona, pri čemu je probojna staza dovoljno jonizovana tako da može održavati električni luk.

Prema upotrebi izolaciju možemo podijeliti na spoljašnju (eksternu) i unutrašnju (internu). Eksterna izolacija je vazдушna izolacija i površina izolatora izložena spoljašnjim uticajima, pri čemu su oboje izloženi djelovanju električnih naprezanja, kao i drugim spoljašnjim uticajima kao što su vlaga, zagađenje, itd. Interna ili unutrašnja izolacija sadrži unutrašnje elemente izolatora koji su zaštićeni od djelovanja atmosfere i drugih spoljašnjih uticaja.[23]

Eksterna međufazna izolacija određuje se tako što se uzimaju u obzir stvarna naprezanja tokom sklopnih operacija, kvarova ili drugih uzroka, ponašanje izolacije kada je izložena ovim naprezanjima i prihvaćeni rizik od kvara.

Za eksternu izolaciju test se radi u suvim uslovima. Međutim, ako su uključene i neke spoljašnje eksterne izolacije, za ispitivanje sklopnih impulsa trebaju se uzeti u obzir vlažni uslovi.

Kao što je već navedeno, reprezentativni sklopni impuls ima vrijeme čela 250  $\mu$ s i vrijeme začelja 2500  $\mu$ s. Ispitivanje se vrši sa dva sklopna impulsa generatora koji proizvode dvije naponske komponente sa simultanim vršnim vrijednostima čije su vrijednosti navedene u standardu, koristeći pozitivnu komponentu u jednoj fazi i negativnu komponentu u drugoj.

Za eksternu izolaciju, primijenjena pozitivna komponenta bi uvijek trebala da ima vrijeme čela u iznosu od 250  $\mu$ s, kao što je definisano u IEC standardu 60-2.[24] Ovo pravilo važi za ispitivanje između faza, kao i za ispitivanje između faze i zemlje. Vrijeme čela negativne komponente ima zanemarljiv uticaj, međutim mora biti isto ili duže od pozitivne komponente. S tim u vezi, kao alternativa negativna komponenta sklopnog impulsa se može generisati pomoću impulsno – pobuđenog transformatora. Ako je vrijeme čela negativne komponente duže od pozitivne, pozitivna komponenta može uzrokovati vidljivo izobličenje (pad napona) na negativnoj komponenti, usljed kapacitivne sprege. Pad napona ne smije prelaziti 20% potencijalne vršne vrijednosti negativne komponente. U trenutku vršne vrijednosti pozitivne komponente, stvarni napon negativne komponente bi trebao biti jednak zahtijevanoj vrijednosti.

Raspored ispitivanja između faza i između faze i zemlje trebaju biti u standardnim uslovima rada koji moraju biti poznati. Ispitivanje se izvodi na jednoj ili više parova susjednih faza, u zavisnosti od stepena geometrijske asimetrije stvarnog trofaznog rasporeda. Ako je treća faza prisutna u testnoj proceduri, potrebno je uzemljiti.[25]

## **4. Modelovanje elemenata sistema za potrebe proračuna sklopnih prenapona**

### **4.1 Uvod**

Osnovna uloga elektroenergetskog sistema (EES) je snabdijevanje potrošača električnom energijom definisanog kvaliteta. Sastoji se od četiri povezana podsistema: proizvodnja, prenos, distribucija i potrošnja električne energije. Promjena konfiguracije EES – a se ostvaruje primjenom sklopnih aparata. Sklopni aparat je uređaj namijenjen uklapanju, provođenju i/ili prekidanju struje u jednom ili više strujnih krugova tj. stavljanju u naponsko ili beznaponsko stanje.[26] Djelovanjem sklopnih aparata dolazi do prelaznog procesa u EES – u koji se manifestuje povećanjem napona i/ili struje. Sva povećanja struja i napona mogu dovesti do oštećenja i kvarova elemenata EES – a. Iz tog razloga je neophodno poznavati maksimalne vrijednosti struja i napona kako bi se u fazi projektovanja izvršio pravilan odabir zaštitne opreme.

Visokonaponska razvodna postrojenja (VNRP) su postrojenja koja omogućavaju transformaciju i/ili distribuciju električne energije u elektroenergetskim sistemima. Razvodno postrojenje po pravilu bi trebalo da postoji u svakom čvorištu mreže, bez obzira da li je prisutna transformacija. Postrojenja mogu biti unutrašnje i spoljašnje izvedbe. Za više napone se primjenjuje spoljašnja izvedba, s tim da elementi postrojenja moraju biti konstruisani tako da mogu ispravno funkcionisati pod spoljašnjim uticajima. [5]

### **4.2 Uvod u Matlab - Simulink**

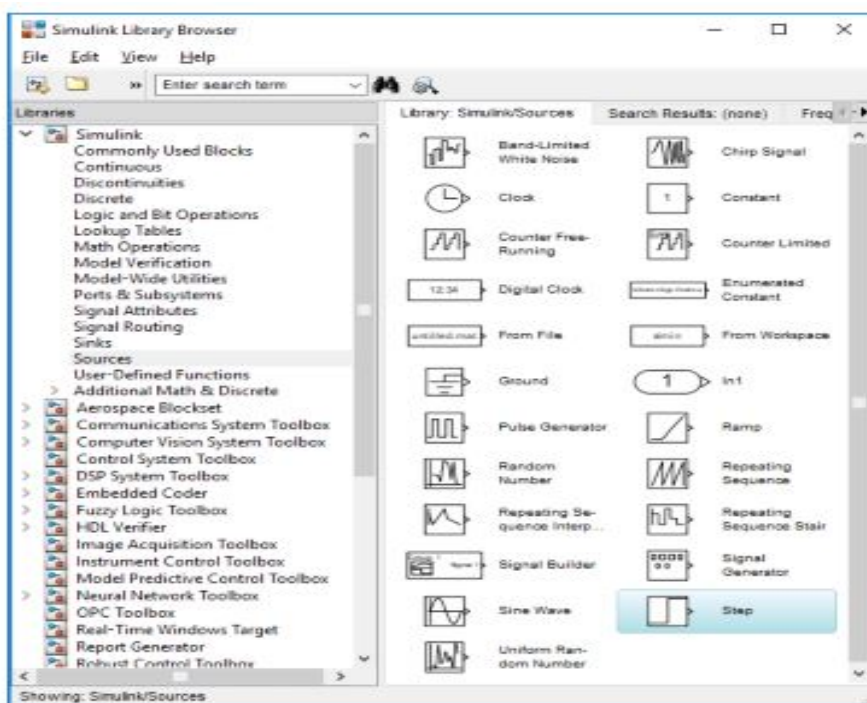
Razvoj grafički orijentisanih simulatora omogućava analizu složenih slučajeva sklopnih prenapona. U ovom radu za prikaz simulacionih modela korištenih u svrhu analize osjetljivosti sklopnih prenapona korišten je programski jezik Matlab - Simulink. Uz pomoć Matlab – Simulinka vrši se analiza i obezbijeduje grafičko okruženje u kome je moguće opisno skicirati blok dijagram sistema i vršiti njegovu simulaciju. Prilikom traženja i dobijanja rezultata analize osjetljivosti sklopnih prenapona na različite uslove ispituju se koncepcije sa različitim parametrima. U svrhu postizanja istraživačkog cilja, ti parametri variraju dok se ne dobiju rezultati koji se mogu javiti na stvarnom fizičkom modelu.

### **4.3 Modelovanje u Simulink – u**

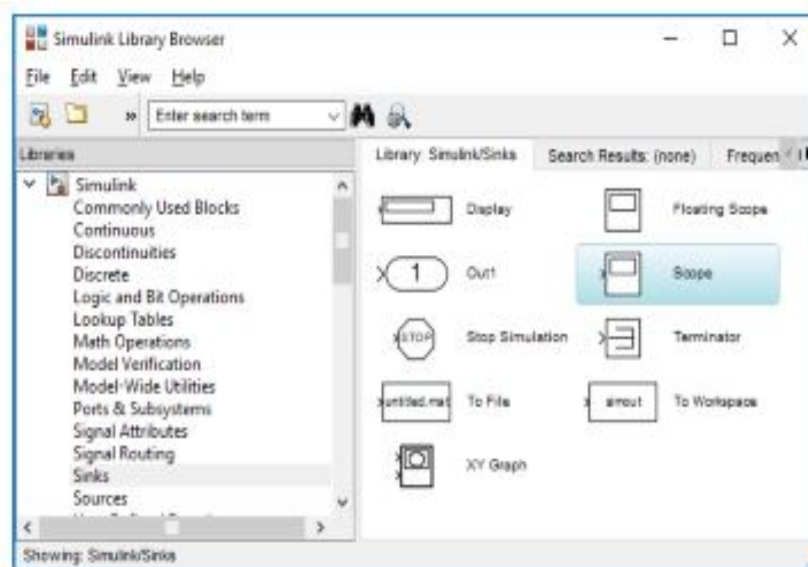
Nakon pokretanja Simulink - a, pojavljuje se prozor Simulink Library Browser, gdje su pobrojane dostupne biblioteke. Glavne biblioteke su: Simulink, Control System Toolbox, Neural Network Blockset i Simscape. U Simulink - u, sistemi su nacrtani na ekranu kao blok dijagrami. Mnogi od



elementa blok dijagrama su dostupni, kao što su prenosne funkcije, veze i drugo, baš kao i virtuelni ulazni i izlazni uređaji poput generatora funkcija i osciloskopa koji se nalaze u Simulink - ovim bibliotekama Sources (slika 4.1) i Sinks (slika 4.2). Simulink je integrisan sa Matlab - om i podaci jednostavno mogu da se razmjenjuju između ta dva programa. Simulink se primjenjuje kako bi modelovali sisteme, izgradili kontrolere i simulirali sisteme. Simulink je podržan od strane Unix, Macintosh i Windows okruženja i uključen u studentsku verziju Matlab - a za PC računare.



*Slika 4.1: Elementi Simulink - ove biblioteke Sources*

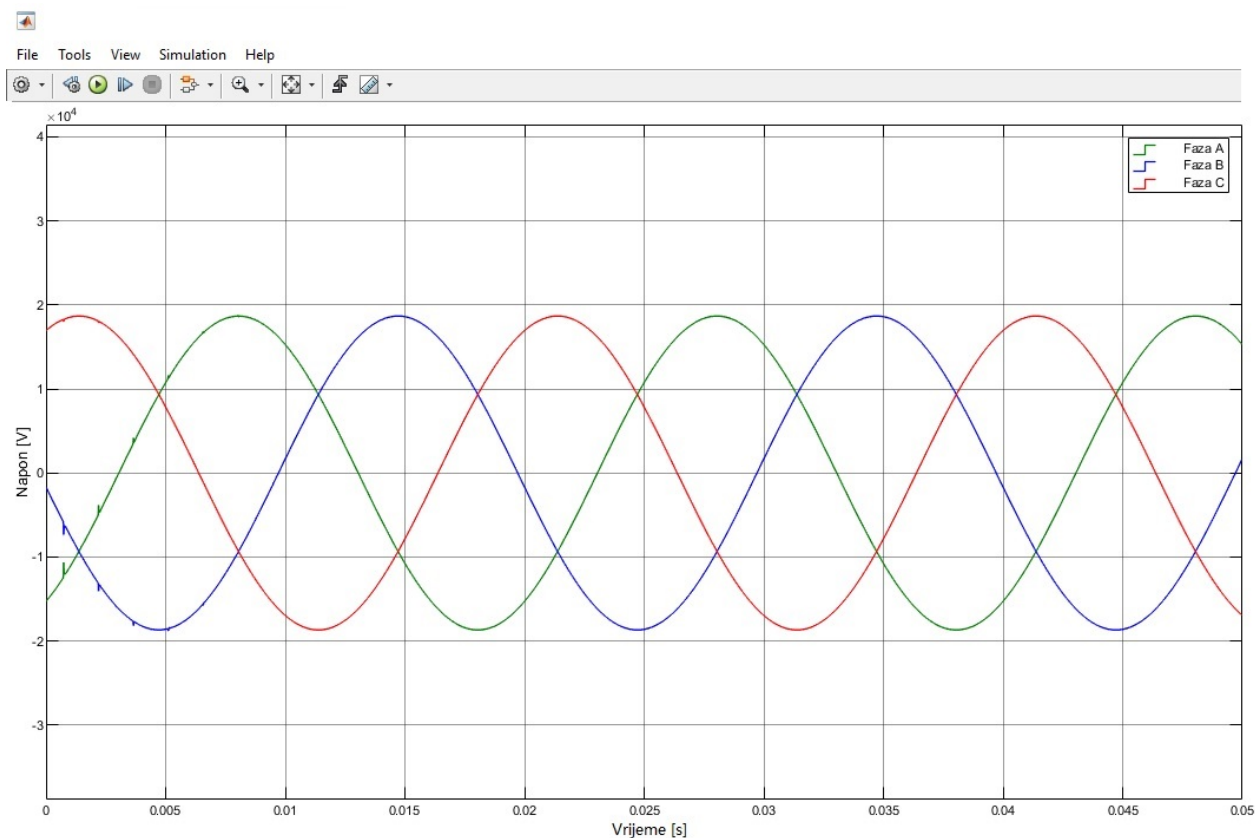


*Slika 4.2: Elementi Simulink - ove biblioteke Sinks*

U Simulink - u modeli predstavljaju skup blokova koji u opštem slučaju čine sistem. Osnovne klase elemenata čine blokovi i linije. Blokovi se koriste za generisanje, modifikaciju, kombinovanje izlaza i displej signale, dok se linije koriste za prenos signala sa jednog bloka ka drugom. [27]

Nakon otvaranja Simulink modela, prije pokretanja simulacije, potrebno je odabrati metodu integracije (Solver) i podesiti parametre za izvođenje simulacije.

Za pokretanje simulacije potrebno je selektovati Start ili Run. Nakon što je podešeno u bloku osciloskopa da automatski startuje prilikom pokretanja simulacije, na ekranu će se pojaviti prozor osciloskopa kao na slici broj 4.3.



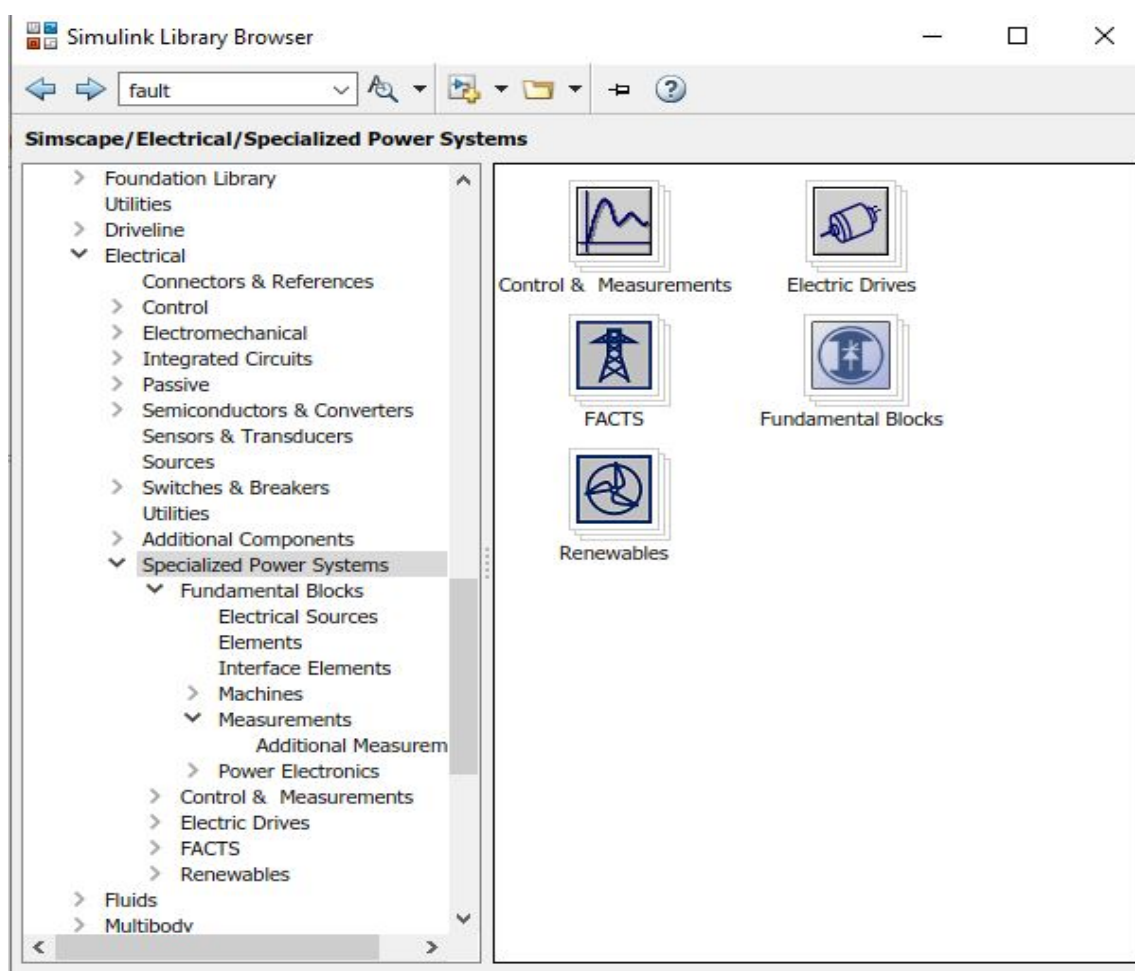
Slika 4. 3: Izlazni signal na osciloskopu

#### 4.3.1 Osnovne biblioteke za modelovanje električnih sistema u Simscape – u

Za potrebe modelovanja, simuliranja i analize multidomenskih fizičkih sistema u Matlab – u koristi se alat Simscape. Za formiranje modela koriste se blokovi koji odgovaraju fizičkim komponentama kao što su kondenzator, kalem, otpornik, transformator, itd. Između komponenti se uspostavljaju veze koje odgovaraju energetskim tokovima i tokovima signala. Na taj način struktura formiranog modela ekvivalentna je strukturi realnog sistema, a sam proces formiranja modela podsjeća na sklapanje realnog sistema.

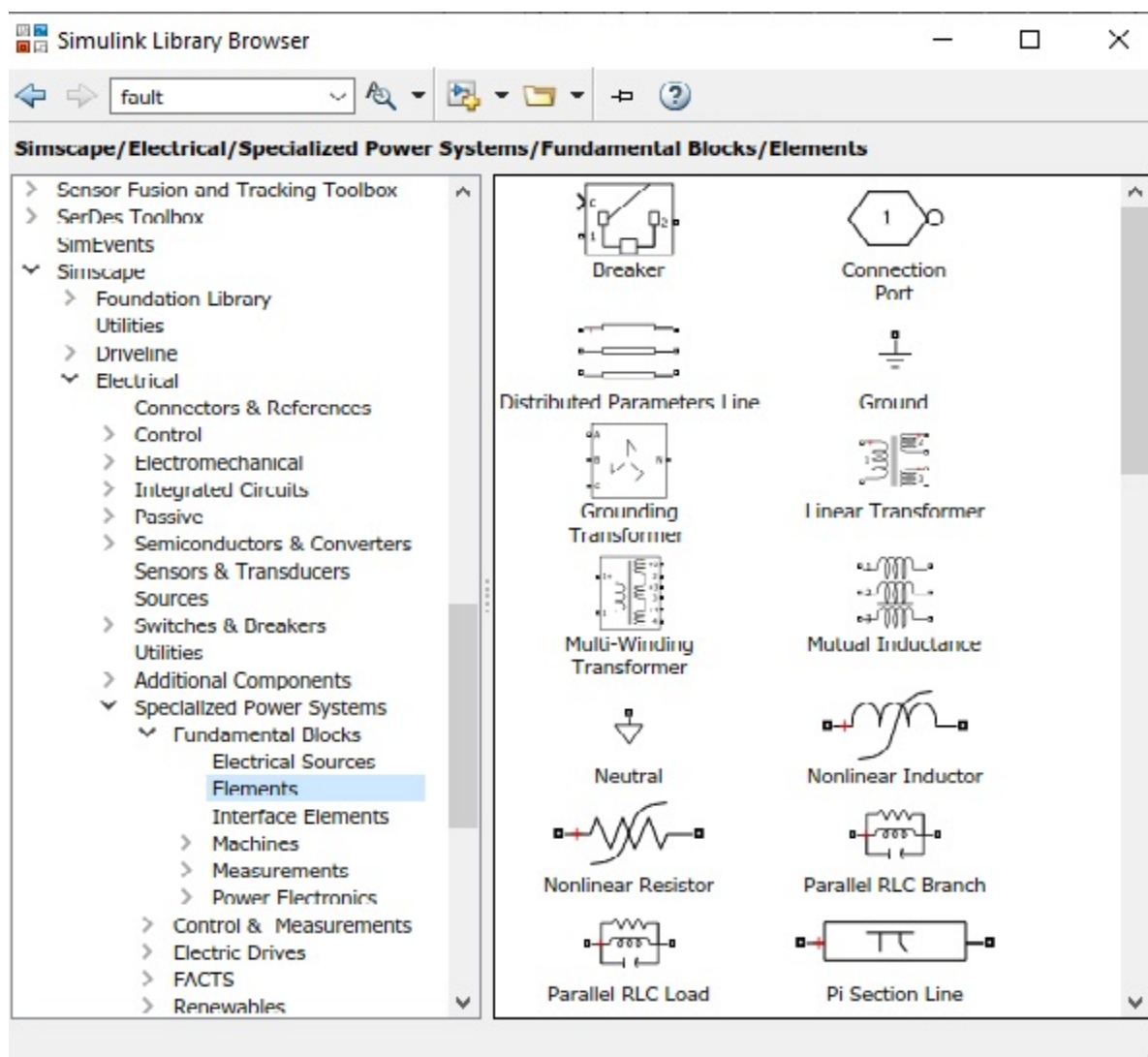
Sve komponente su predstavljene pomoću svog interfejsa koji je određen brojem i tipom priključaka preko kojih se razmjenjuju informacije. U Simscape - u se ti priključci nazivaju energetska tj. signalni portovi. Energetska portovi odgovaraju fizičkim vezama kod kojih se vrši dvosmjerna razmjena energije bez gubitaka. Signalni portovi su jednosmjerni i kroz njih se prenose signali između blokova. Veze između komponenti (blokova) se formiraju pomoću linija i predstavljaju fizičke veze koje prenose signale ili energiju.

Osnovni gradivni elementi za modelovanje električnih sistema nalaze se u Simscape/Electrical biblioteci (slika 4.4). Ova biblioteka ne zahtijeva matematičko modelovanje, već samo pravilno povezivanje elemenata sistema koji podsjećaju na realne električne komponente.



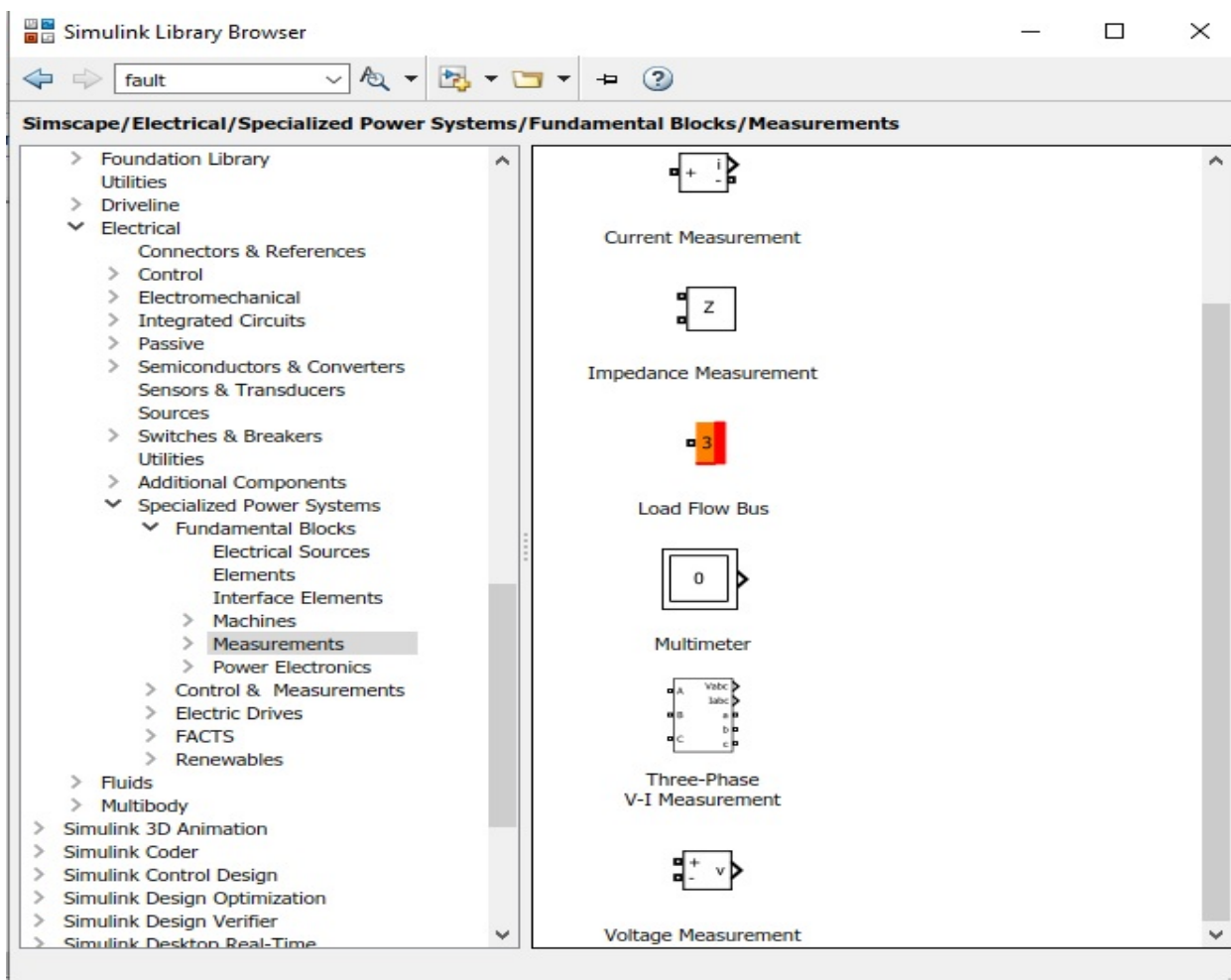
Slika 4.4: Simscape/Electrical/Specialized Power Systems biblioteka

Biblioteka Specialized Power Systems/ Fundamental Blocks / Elements (slika 4.5) sadrži osnovne elemente uz pomoć kojih se mogu realizovati električne šeme. Svaki od elemenata je potrebno konfigurirati tj upisati mu definisane parametre.



Slika 4.5: Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Fundamental Blocks/Elements biblioteka

Da bi grafički mogli da se prikažu vrijednosti struje i napona izmjerene u formiranom električnom sistemu koristi se biblioteka Measurements (slika 4.6). Tako za mjerenje vrijednosti struja i napona transformatora snage i vodova u magistarskom radu koristi se simulacioni blok trofazni V- I mjerač koji u modelu predstavlja istovremeno naponski i strujni transformator. U ovom bloku mjerenje struja i napona je moguće vršiti i u relativnim jedinicama. Izmjerene vrijednosti strujnih i naponskih izvora Simscape – a moguće je prikazati uz pomoć bloka Scope – osciloskop (slika 4.3), koji predstavlja jedan od Simulink - ovih Sinks blokova.



Slika 4.6: Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Fundamental Blocks/Measurement biblioteka

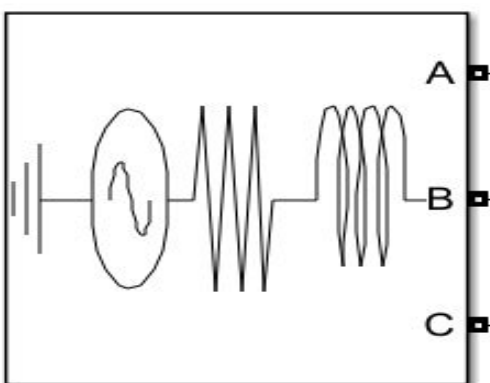
#### 4.4 Simulaciono modelovanje komponenata visokonaponskog razvodnog postrojenja u Matlab Simulink – u

Kao što je već pomenuto, Matlab Simulink pruža široku biblioteku razvijenih simulacionih komponenti koje se mogu koristiti u svrhu modelovanja i simulacije elektroenergetskih sistema. Razvijeni simulacioni modeli komponenata se uglavnom koriste za modelovanje i simulaciju proizvodnje, prenosa, distribucije i potrošnje električne energije. Posebno razvijeni simulacioni blokovi koriste se u području analize dinamike prelaznih pojava.

U sljedećim podpoglavljima biće opisan način simulacionog modelovanja naponskog izvora, energetskog transformatora, energetskog voda i prekidača, s ciljem istraživanja karakteristika sklopnih prenapona. Pomenuti elementi biće korišteni za modelovanje visokonaponskog razvodnog postrojenja.

#### 4.4.1 Naponski izvor

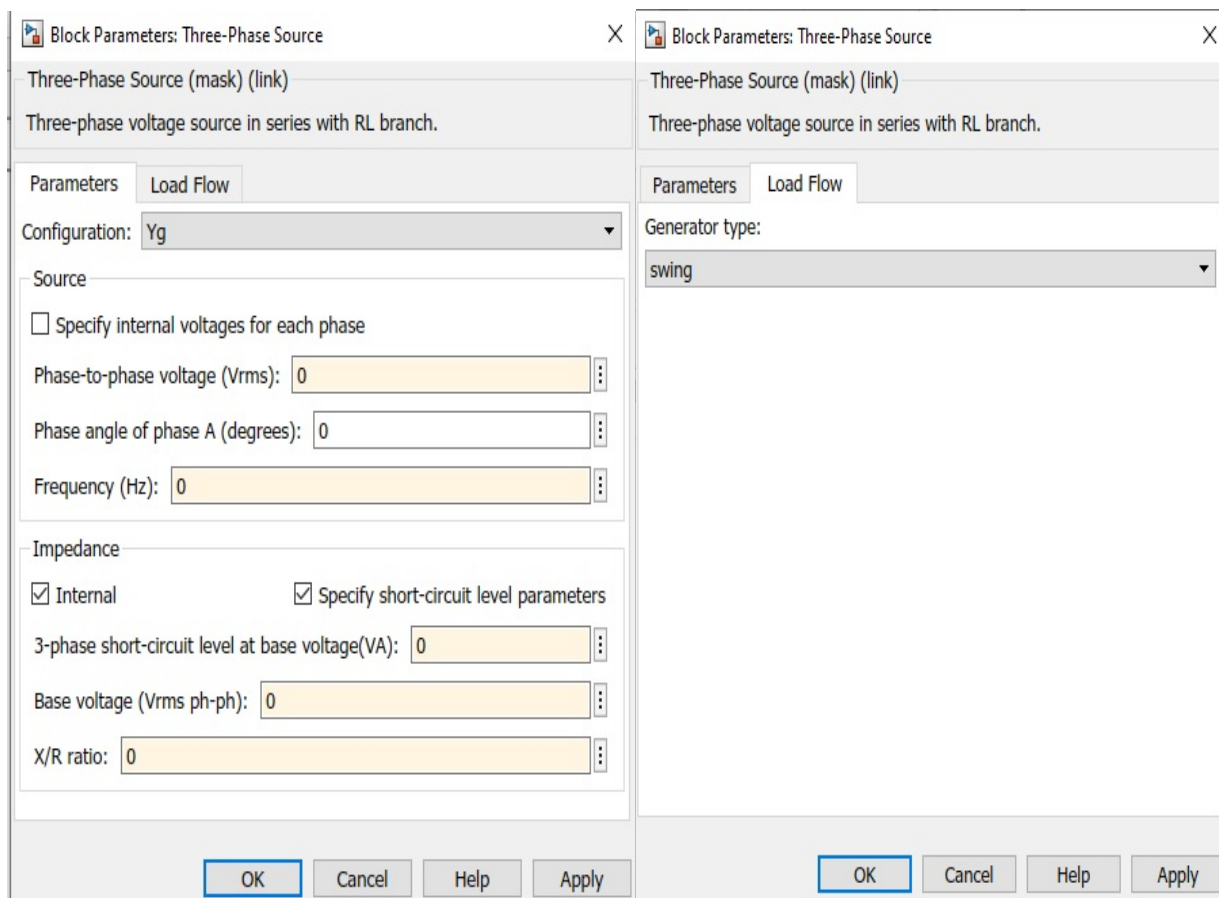
Simulaciona komponenta trofaznog naponskog izvora predstavlja trofazni izvor napona serijski povezanog sa RL impedansom. Tri jednofazna izvora spojena su u Y, dok se način tretiranja uzemljenja podešava prilikom simulacionog konfigurisanja. Ovoj komponenti je omogućeno lokalno direktno uzemljenje ili lokalno izolovano uzemljenje zvjezdišta trofaznog izvora. Način parametrizacije naponskog izvora je takav da je potrebno definisati napon svake faze, fazni ugao, frekvenciju, kao i vrijednost napona trofaznog kratkog spoja, baznog napona i međusobnog odnosa induktivnosti i radne otpornosti (X/R) izvora, što se može vidjeti u tabeli 4.1. Bazna efektivna vrijednost napona jednaka je nazivnom efektivnom linijskom naponu sistema. Na slici 4.7 je prikazan blok simulacionog modela naponskog izvora, dok se na slici 4.8 prikazuje način parametrizacije simulacione komponente naponskog izvora.



Slika 4.7: Blok simulacionog modela naponskog izvora

Tabela 4.1: Ulazni parametri naponskog izvora

Ulazni parametri naponskog izvora	Oznaka	Jedinica
Pogonska efektivna vrijednost faznih napona	$U_0$	[V]
Fazni uglovi napona	$\varphi_0$	[°]
Frekvencija	$f$	[Hz]
Snaga trofaznog kratkog spoja pri baznom naponu	$S_{ks}$	[VA]
Bazna efektivna vrijednost linijskog napona	$U_{00}$	[V]
Međusobni odnos induktivnosti i radne otpornosti	$X/R$	[ ]



Slika 4.8: Parametrizacija naponskog izvora

Na temelju poznate ukupne aktivne i reaktivne snage trofaznog kratkog spoja sabirnice numerički se proračunava odnos ukupnog radnog i induktivnog otpora krute mreže. Ulazni parametri simulacionog blok modela naponskog izvora koriste se isključivo za potrebe inicijalizacije simulacionih modela komponenata. Kontrolisane referentne vrijednosti amplitude napona i faznog ugla se dodjeljuju zavisno od odabranog programa rada naponskog izvora. Simulacioni blok model ima tri programa rada. To su PV, PQ i balansni program rada. Tip načina rada za potrebe realizacije magistarskog rada je podešen na balansni sa referentnom sabirnicom (engl. Swing). Referentna sabirnica kontroliše amplitudu i fazni ugao pogonskog napona koristeći numeričku analizu tokova snaga.

#### **4.4.2 Trofazni prekidač**

U visokonaponskim razvodnim postrojenjima (VNRP) prekidači služe za uklapanje i isklapanje strujnih kola, odnosno elemenata VNRP – a pod opterećenjem ili bez opterećenja, zaštitu elemenata od kratkog spoja i preopterećenja, kao i za prekidanje strujnog kola u slučaju pojave havarijskog stanja.

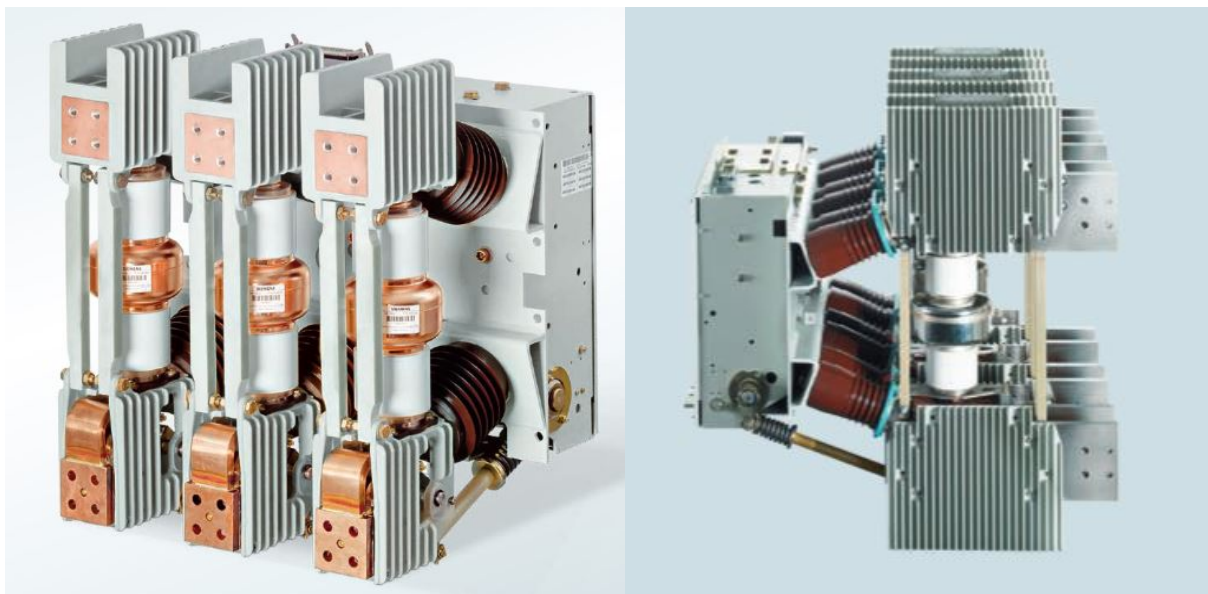
Visokonaponski prekidači su, bez obzira na tip ili nazivni napon, najčešće konstruisani na bazi modularnog koncepta, kojim se obezbjeđuje visok stepen unifikacije komponenti. Osnovne komponente prekidača čine: prekidna jedinica, pogonski mehanizam, upravljački sistem, noseća konstrukcija, mehanički prenos i izolatori. Prema vrsti komore za gašenje luka prekidači se dijele na uljne, malouljne, pneumatske, SF6 i vakumske prekidače.[28] Za potrebe magistarskog rada u svrsi analize VNRP – a korišteni su visokonaponski SF6 i vakuumski srednjenaponski prekidači. SF6 prekidači koriste SF6 (sumpor heksafluorid) gas kao medijum za gašenje luka, dok vakuumski prekidači koriste jako razrijeđen vazduh. Vakuumski prekidači omogućavaju veliki broj sklopnih operacija.

Na slici 4.9 je prikazan visokonaponski SF6 prekidač, dok se na slici 4.10 može vidjeti vakuumski (SN) prekidač.



*Slika 4.9: Visokonaponski SF6 (3API – FG 145 kV) prekidač*



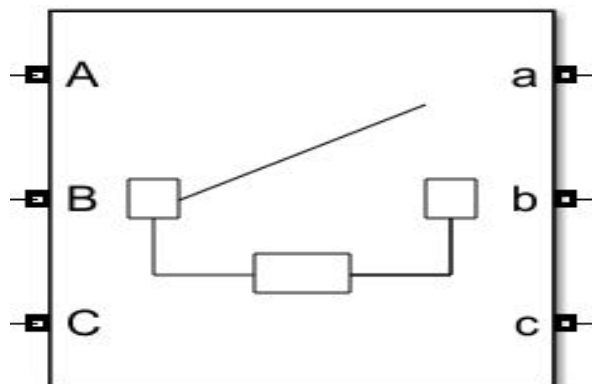


Slika 4.10: Vakuumski (SN) prekidač

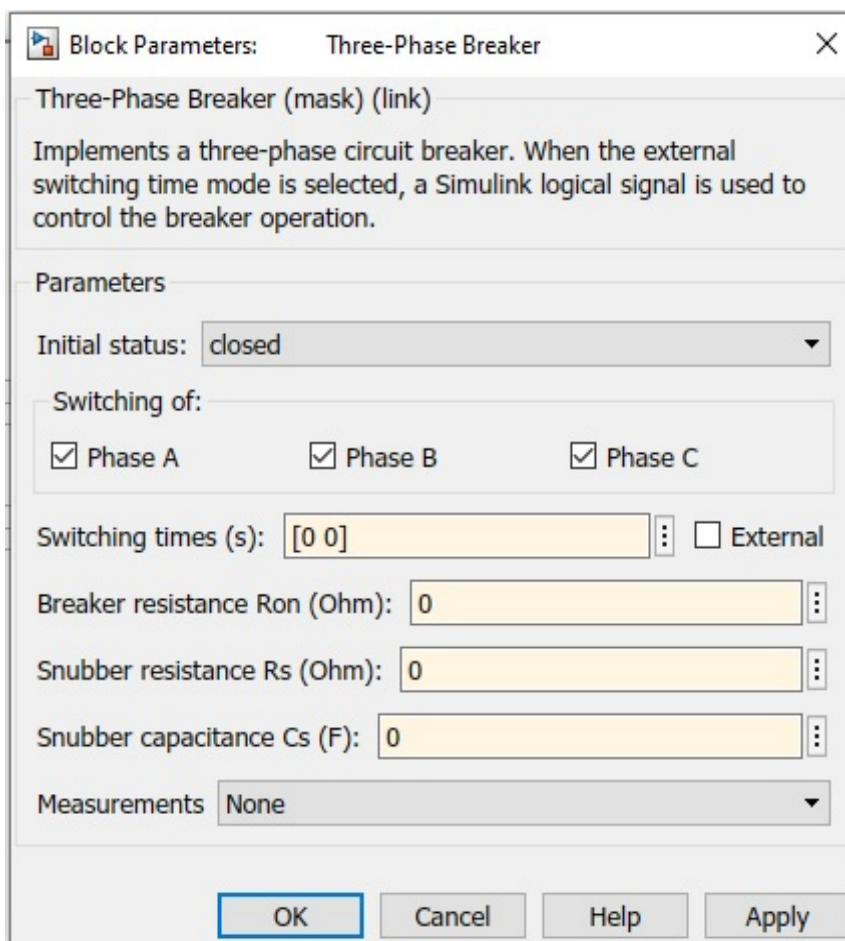
Simulaciono modelovanje zahtijeva razmatranje svih mogućih radnih stanja. Stanja prekidača koja se najčešće modeluju su otvoreno stanje, zatvoreno stanje, stanje NF i VF iskrenja između kontakata prekidača, stanje odloženog električnog luka, stanje trenutka rezanja struje kroz prekidač, stanje prekidne čvrstoće dielektrika, kao i stanje brzine oporavka napona između kontakata vakuumnog prekidača. Matlab Simulink u svojoj biblioteci ne raspolaže sa različitim modelskim tehnologijama shodno vrsti prekidača (npr vakuumski, pneumatski, SF6, itd.) Posebna pažnja se obraća na analizu tehnike uklapanja, gdje ima statičko, simultano i nesimultano uklapanje trofaznog prekidača.[2]

Osnovni simulacioni model prekidača se modeluje za temeljna stanja. To su otvoreno i zatvoreno stanje, kao i stanje prekidanja u trenutku prolaska struje kroz nulu. Za takozvano sječenje struje tj. u slučaju kada struja ne prolazi kroz nulu, postoji posebno razvijen i nadograđen podsistem prekidača koji omogućava kontrolisano vremensko upravljanje aktivacije prekidača.

Postoji interni i eksterni način upravljanja simulacionom komponentom. Odabir načina upravljanja prekidačem zavisi isključivo od analiziranog sklopnog slučaja. Ukoliko se želi aktivirati eksterni način upravljanja, potrebno je izvorni model prekidača nadograditi dodatnim simulacionim blokovima. Za interni način upravljanja potrebno je definisati vektor uklopnih trenutaka. Na simulacionom bloku trofaznog prekidača moguće je selektovati faze koje je potrebno aktivirati, kao i početno stanje prekidača. Blok simulacionog modela sadrži i serijsku prigušnu impedansu. Opremljen simulacionim okidačem, momentalno vrši preklapanje između uključenog i isključenog položaja. Struja se provodi u oba smjera, bez pada napona. Na slici 4.11 je prikazan simulacioni blok trofaznog prekidača u Simulink – u, dok se na slici 4.12 može uvidjeti način i mogućnosti njegove gore opisane parametrizacije. Simulacioni blok trofaznog prekidača u kombinaciji sa trofaznim mjernim blokom ima mogućnost selektovanja mjerenja struja i napona na ulaznim priključnicama.



Slika 4.11: Blok simulacionog modela trofaznog prekidača



Slika 4.12: Parametrizacija trofaznog prekidača

U tabeli 4.2 prikazan je popis ulaznih parametara simulacione komponente trofaznog prekidača pri frekvenciji od 50 Hz. Kao što je napomenuto, ovi parametri se unose za modelovanje svih tipova prekidača.

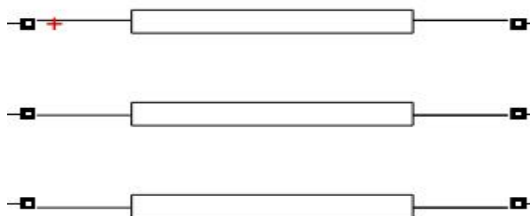
Tabela 4.2: Ulazni parametri trofaznog prekidača

Ulazni parametri trofaznog prekidača	Oznaka	Jedinica
Unutrašnja otpornost trofaznog prekidača u vodljivom stanju	$R_{on}$	[ $\Omega$ ]
Trenutak uklapanja trofaznog prekidača	$t_{uklapanja}$	[ms]
Trenutak isklapanja trofaznog prekidača	$t_{isklapanja}$	[ms]
Prigušna otpornost trofaznog prekidača	$R_p$	[ $\Omega$ ]
Prigušna kapacitivnost trofaznog prekidača	$C_p$	[F]

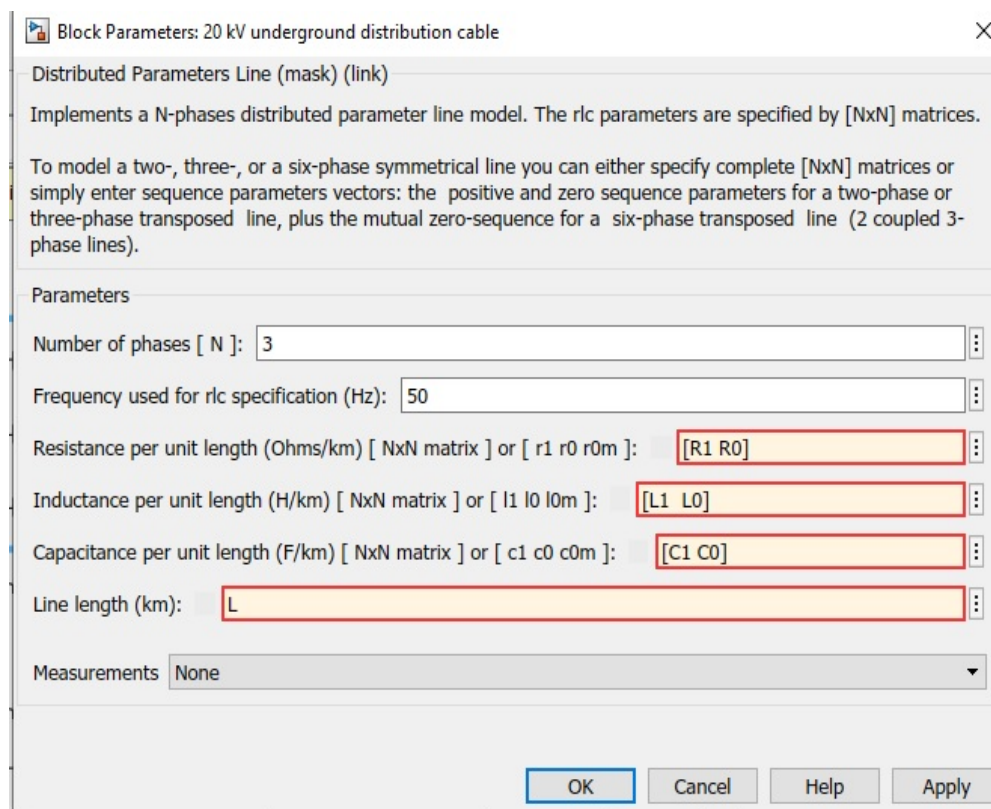
#### 4.4.3 Distributivni SN/NN vod

U Matlab Simulink – u moguće je implementirati dvije vrste simulacionog modela trofaznog voda. To su model voda sa distribuiranim parametrima i model voda sa koncentrisanim parametrima (slike 4.13 i 4.15).

Kod modela voda sa distribuiranim parametrima radne otpornosti, induktivnost i kapacitivnost su ravnomjerno raspoređeni duž čitavog voda. Izvorne grupe ulaznih parametara prenosnog voda ( $R_1$ ,  $R_0$ ), ( $L_1$ ,  $L_0$ ) i ( $C_1$ ,  $C_0$ ) definišu se po kilometru dužine. Ulazni parametri uzimaju u obzir realne električne i magnetne petlje između tri faze voda, kao i električne veze prema zemlji. S tim u vezi, induktivnost voda zavisi od načina polaganja kabla (zemlja ili vazduh), te samim tim ima različito definisanu vrijednost izvornog parametra. Prvi član ( $R_1$ ,  $L_1$  i  $C_1$ ) čine direktni parametri voda, dok su drugi član ( $R_0$ ,  $L_0$  i  $C_0$ ) nulti parametri voda. Navedeni podaci se uzimaju iz specifikacije energetskog voda za koji se želi napraviti simulacioni model. Kod ovog simulacionog bloka moguće je modelovati dvije, tri ili šest faza (dva trofazna voda) definisanjem matrice ( $N \times N$ ). Na slici 4.14 prikazan je način i mogućnost parametrizacije simulacionog voda sa distribuiranim parametrima. Osim pomenutog, moguće je definisati pogonsku frekvenciju i dužinu prenosnog voda.



Slika 4.13: Simulacioni modeli voda sa distribuiranim parametrima



Slika 4.14: Parametrizacija simulacionog bloka voda sa distribuiranim parametrima

U tabeli 4.3 su definisani ulazni parametri simulacione komponente distributivnog voda sa distribuiranim parametrima, pri odgovarajućoj pogonskoj frekvenciji. U magistarskom radu, za potrebe simulacionog modela korišten je ovaj tip simulacione komponente trofaznog SN voda.

Tabela 4.3: Ulazni parametri SN/NN voda

Ulazni parametri energetskog voda	Oznaka	Jedinica
Direktna radna otpornost voda	$R_1$	[ $\Omega$ /km]
Nulta radna otpornost voda	$R_0$	[ $\Omega$ /km]
Direktna induktivnost voda	$L_1$	[H/km]
Nulta induktivnost voda	$L_0$	[H/km]
Direktna fazna kapacitivnost voda	$C_1$	[F/km]
Direktna uzemljena kapacitivnost voda	$C_0$	[F/km]
Broj faza voda	N	[ ]
Dužina voda	l	[km]
Pogonska frekvencija	f	[Hz]

Metoda određivanja ulaznih koncentrisanih parametara trofaznog voda pretpostavlja da su sve tri faze u simetriji. Ukupne koncentrisane fazne i međufazne radne otpornosti ( $R_s$  i  $R_m$ ), zatim ukupne koncentrisane fazne i međufazne induktivnosti ( $L_s$ ,  $L_m$ ) tri povezana jednofazna voda, kao i ukupne koncentrisane fazne i uzemljene kapacitivnosti ( $C_s$ ,  $C_g$ ) su proračunati i izvedeni iz simetričnog direktnog i nultog sistema. Za proračun grupe totalnih ulaznih parametara voda ( $R_{11}$ ,  $R_{10}$ ;  $L_{11}$ ,  $L_{10}$ ;  $C_{11}$ ,  $C_{10}$ ) uzimaju se u obzir izvorni parametri voda, dužina voda u kilometrima i direktni i nulti hiperbolni korekcionni faktori ( $k_{R1}$ ,  $k_{R0}$ ,  $k_{L1}$ ,  $k_{L0}$ ,  $k_{C1}$ ,  $k_{C0}$ ). Ovi faktori nemaju uticaj na vodove do 15 km, dok se za duže vodove moraju uzeti u obzir kako bi se izvršila korekcija ukupnih parametara voda pri pogonskoj frekvenciji. Konačni koncentrisani parametri  $\pi$  modela voda određeni su sljedećim relacijama:

$$R_s = (2R_{11} + R_{10})/3; \quad (4-1)$$

$$R_m = (R_{10} - R_{11})/3; \quad (4-2)$$

pri čemu je  $R_{11} = R_1 * l * k_{R1}$  i  $R_{10} = R_0 * l * k_{R0}$ ;

$$L_s = (2L_{11} + L_{10})/3; \quad (4-3)$$

$$L_m = (L_{10} - L_{11})/3; \quad (4-4)$$

pri čemu je  $L_{11} = L_1 * l * k_{L1}$  i  $L_{10} = L_0 * l * k_{L0}$ ;

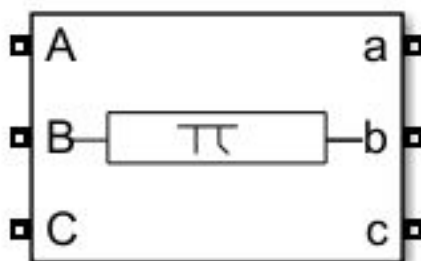
$$C_s = C_{11};$$

$$C_g = 3C_{11}C_{10}/(C_{11} - C_{10}); \quad (4-5)$$

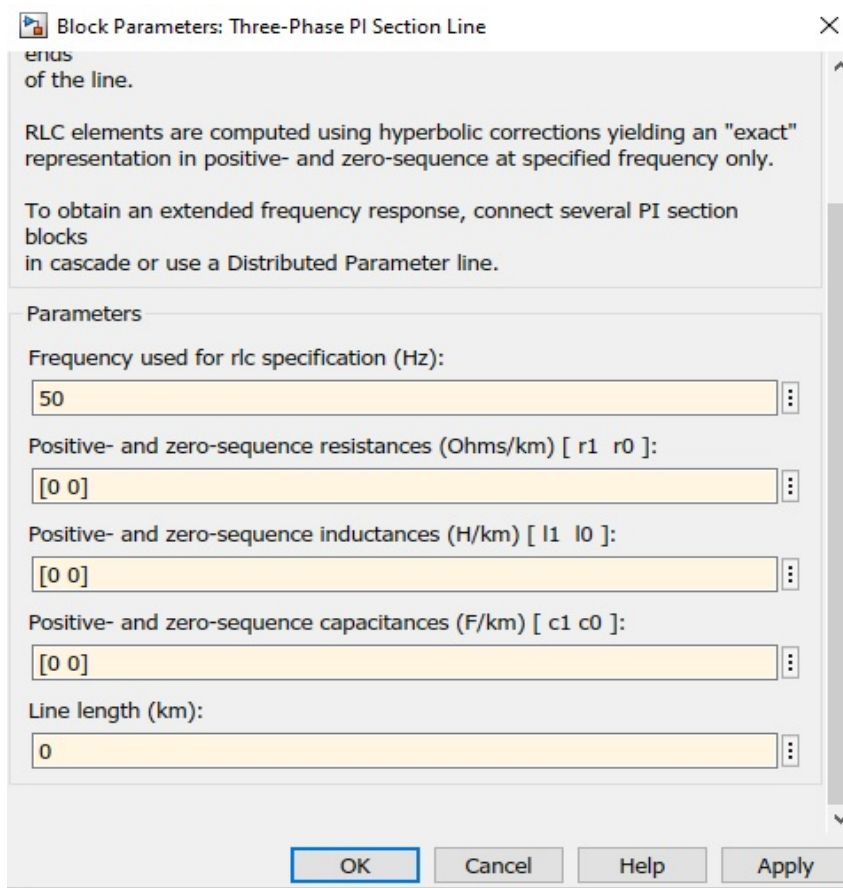
pri čemu je  $C_{11} = C_1 * l * k_{C1}$  i  $C_{10} = C_0 * l * k_{C0}$ .

Dakle, simulacioni model voda određuju dvije grupe serijskih koncentrisanih elemenata spojenih između ulaznih i izlaznih priključaka, kao i jedna grupa paralelnih koncentrisanih kapacitivnosti dodatih SN ili NN vodu na svakom kraju. Na slici 4.15 je prikazan blok simulacionog  $\pi$  modela

trofaznog energetskog voda, dok se na slici 4.16 mogu vidjeti načini i mogućnosti njegove simulacione parametrizacije. Kao i kod simulacionog modela voda sa distribuiranim parametrima, moguće je podesiti pogonsku frekvenciju i dužinu voda. Da bi se dobio prošireni frekvencijski odziv simulacione komponente, potrebno je spojiti više  $\pi$  modela voda u kaskadni spoj.



Slika 4.15: Simulacioni modeli voda sa distribuiranim parametrima



Slika 4.16: Parametrizacija simulacionog bloka voda sa distribuiranim parametrima

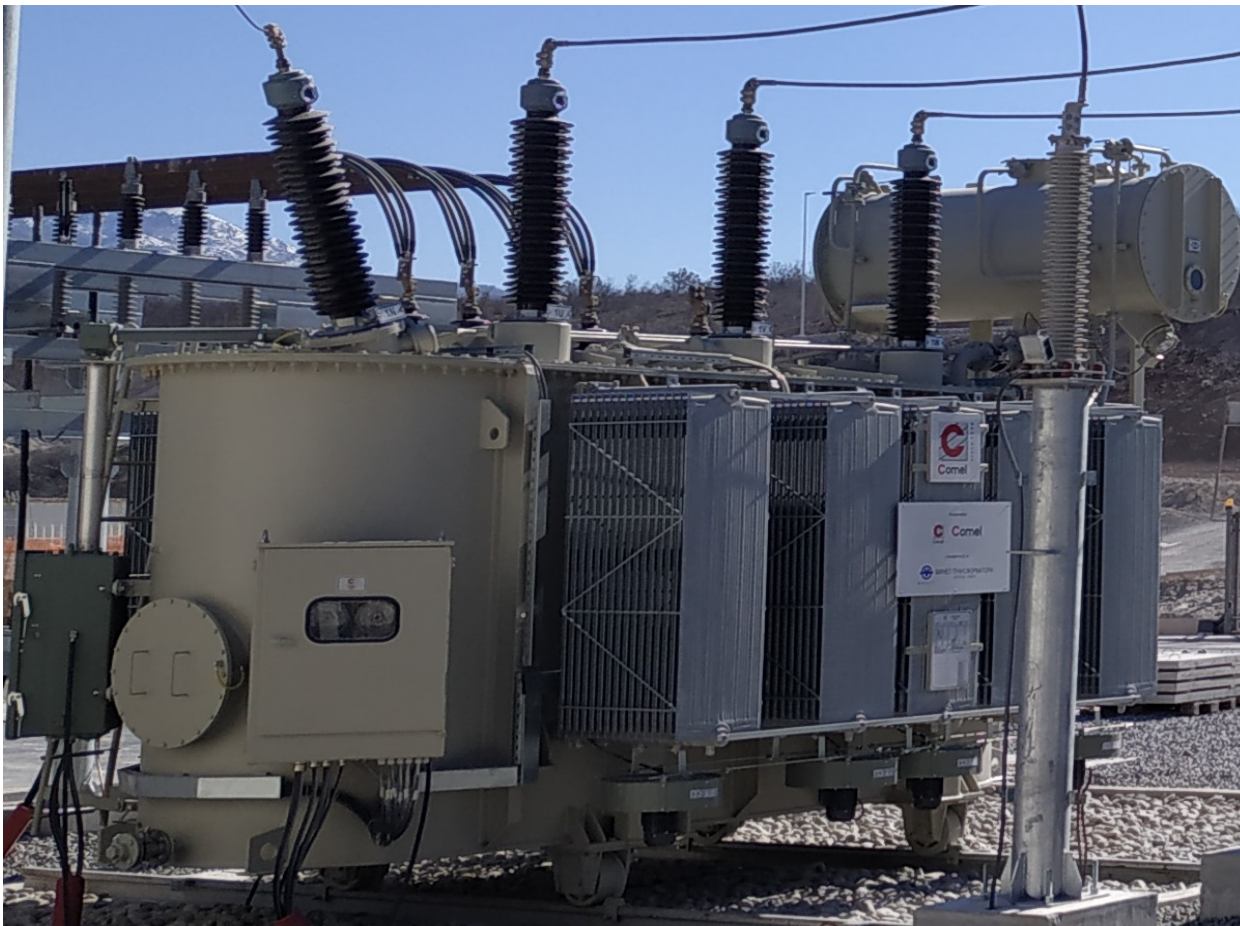
U tabeli 4.4 je prikazan spisak izračunatih parametara simulacione komponente pri odgovarajućoj pogonskoj frekvenciji.

Tabela 4.4: Izračunati koncentrisani parametri SN/NN voda

Izračunati koncentrisani parametri energetskog voda	Oznaka	Jedinica
Fazna radna otpornost voda	$R_s$	[ $\Omega/\text{km}$ ]
Međufazna radna otpornost voda	$R_m$	[ $\Omega/\text{km}$ ]
Fazna induktivnost voda	$L_s$	[ $\text{H}/\text{km}$ ]
Međufazna induktivnost voda	$L_m$	[ $\text{H}/\text{km}$ ]
Fazna kapacitivnost voda	$C_s$	[ $\text{F}/\text{km}$ ]
Fazna uzemljena kapacitivnost voda	$C_g$	[ $\text{F}/\text{km}$ ]
Dužina voda	$l$	[ $\text{km}$ ]
Pogonska frekvencija	$f$	[ $\text{Hz}$ ]

#### 4.4.4 Dvonamotajni trofazni transformator

Svrha transformatora je pretvaranje jednog sistema naizmjeničnih struja u jedan ili više sistema naizmjeničnih struja, iste učestanosti i obično različitih vrijednosti struja i napona. Njegovom primjenom se, uz veoma male gubitke energije, rješavaju problemi raznih naponskih nivoa i međusobne izolovanosti kola na različitim naponskim nivoima. Na slici 4.17 je prikazan trofazni transformator VNRP – a.



*Slika 4.17: Trofazni transformator VNRP – a*

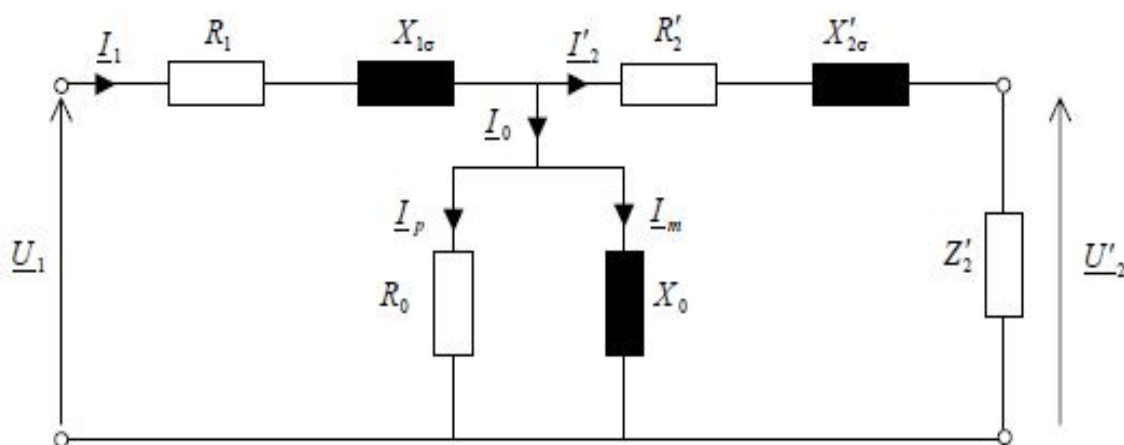
Transformator treba da bude projektovan i izrađen tako da izdrži moguća naprezanja kojima je izložen tokom trajanja svog rada. Naprezanja se u osnovi mogu podijeliti u tri grupe: električna, mehanička i toplotna naprezanja. Kod električnih naprezanja se obraća pažnja na sklopne prenapone, atmosferska pražnjenja, električni luk prema zemlji, kratki spoj i ispitne napone. Pojave praćene većim strujama u odnosu na naznačene opasne su sa stanovišta mehaničkih i toplotnih naprezanja (koja su proporcionalna sa kvadratom struje). Do toplotnih naprezanja dolazi i kod preopterećenja transformatora. Zbog velike izloženosti prenaponima, transformatori se zahtjevnije dielektrično ispituju.

Namotaji trofaznih transformatora sprežu se u trougao (D), zvijezdu (Y) i slomljenu zvijezdu (z). Oznaka za spregu višeg napona piše se velikim slovom, dok je oznaka za spregu nižeg napona malim slovom. Sprega slomljena zvijezda (z) se isključivo primjenjuje za niskonaponske (NN) namotaje. Namotaji primara i sekundara transformatora snage u elektroenergetskom sistemu mogu biti vezani u Y - y, Y - d, D - y i D - d. Prema važećim standardima priključne stezaljke, odnosno provodni izolatori faza i neutralnog voda označavaju se slovnim oznakama U, V, W i N, dok su ranije oznake bile A, B, C i N. Ispred slovne oznake za svaku pojedinačnu fazu stavljaju se brojčane oznake za visinu naponskog nivoa namotaja. Tako je broj 1 za visokonaponski namotaj (VN), broj



2 za sredjenaponski namotaj (SN) kod tronamotajnih transformatora i niskonaponski namotaj (NN) kod dvonamotajnih transformatora, i broj 3 za niskonaponski namotaj (NN) kod tronamotajnih transformatora. Osim sprege, kod trofaznih transformatora potrebno je znati i sprežni broj. Sprežni broj predstavlja fazni pomjeraj sekundarnog napona u odnosu na primarni napon. Sprežni broj je posljedica različitih načina namotavanja namotaja na stubovima transformatora. Na osnovu faznog pomjeraja (proizvod sa  $30^\circ$ ) vrši se podjela na četiri osnovne grupe sprege: 0 (4, 8), 5 (9, 1), 6 (10, 2) i 11 (3, 7). Grupa sprege je najvažnija kod paralelnog rada transformatora, gdje je neophodno da transformatori na sekundaru imaju napone koji su u fazi. Prenosni odnos ili ti odnos transformacije ( $m$ ) predstavlja odnos nominalnih napona namotaja, izraženim njihovim punim iznosima.[29]

Ekvivalentna šema transformatora prikazana na slici 4.18 predstavlja pojednostavljeni model pomoću kojeg može, bez stvarnog opterećenja, da se predvidi ponašanje transformatora u raznim uslovima rada. Parametri ekvivalentne šeme se određuju iz standardnih ispitivanja transformatora u ogledu praznog hoda i ogledu kratkog spoja. Ispitivanja i pomenuti ogledi se vrše u skladu sa testnim eksperimentalnim protokolom definisanim standardom. Sve veličine i parametri sekundara su svedeni na primar i preračunati kvadratom odnosa broja namotaja, tako da je  $R'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_2$ .



Slika 4.18: Ekvivalentna šema trofaznog transformatora

Prikazani parametri ekvivalentne šeme su:

$\underline{I}_0$  – struja praznog hoda;

$\underline{I}_p$  – aktivna komponenta struje praznog hoda;

$\underline{I}_m$  – struja magnećenja (reaktivna komponenta struje praznog hoda);

$R_0$  – ekvivalentna otpornost u praznom hodu;

$X_0$  – reaktansa magnećenja;

$R_1$  i  $R_2$  - aktivne otpornosti primarnog i sekundarnog namotaja;

$X_{1\sigma}$  i  $X_{2\sigma}$  - rasipna reaktansa primarnog i sekundarnog namotaja;

$Z_2$  – reaktansa prijemnika.

Pod praznim hodom dvonamotajnog transformatora podrazumijeva se stanje u kojem je jedan od namotaja priključen na napajanje, a krajevi drugog namotaja su otvoreni. Ogled praznog hoda spovodi se zbog određivanja gubitaka u praznom hodu  $P_0$  (što približno odgovara gubicima u gvožđu), karakteristika struje praznog hoda  $I_0$  i činioca snage praznog hoda  $\cos \varphi_0$ , u zavisnosti od napona napajanja  $U_0$ . Kod trofaznih transformatora za struju praznog hoda uzima se srednja aritmetička vrijednost mjerenja ispitivanog transformatora. S obzirom na to da su parametri poprečne grane mnogo veći od parametara uzdužne grane ekvivalentne šeme, prilikom analize ogleada praznog hoda parametri uzdužne grane se zanemaruju. U tom slučaju, parametre poprečne grane ekvivalentne šeme trofaznog transformatora dobijamo iz relacija:

- impedansa praznog hoda

$$Z_0 = U_0 / I_0 ; \quad (4-6)$$

- faktor snage praznog hoda

$$\cos \varphi_0 = P_0 / \sqrt{3} U_0 I_0 ; \quad (4-7)$$

- aktivna otpornost

$$R_0 = 3U_0^2 / P_0 ; \quad (4-8)$$

- reaktansa magnećenja

$$X_0 = Z_0 / \sin \varphi_0, \quad (4-9)$$

pri čemu je

$$X_0 = \omega L_0. \quad (4-10)$$

Pod kratkim spojem transformatora podrazumijeva se stanje u kojem je jedan od namotaja priključen na napajanje, a krajevi drugog kratko spojeni. Ogled kratkog spoja se sprovodi u cilju određivanja gubitaka usljed opterećenja  $P_k$ , koji približno odgovaraju Džulovim gubicima, odnosno tkzv. gubicima u bakru, struje kratkog spoja  $I_k$ , u zavisnosti od napona napajanja  $U_k$ . Prilikom određivanja parametara ekvivalentne šeme zanemaruje se poprečna grana, jer je struja praznog hoda mnogo manja od naznačene struje.[30]

Parametre uzdužne grane ekvivalentne šeme trofaznog transformatora određujemo na sljedeći način:

- impedansa kratkog spoja

$$Z_k = U_k / I_k ; \quad (4-11)$$

- aktivna otpornost kratkog spoja

$$R_k = P_k / 3I_k^2 ; \quad (4-12)$$

- reaktansa magnećenja

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (4-13)$$

pri čemu je

$$X_k = \omega L_k. \quad (4-14)$$

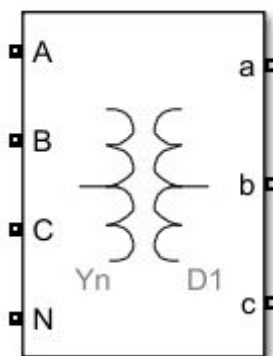
Jednostavno se izvode i izrazi za relativne vrijednosti napona kratkog spoja, radnog i induktivnog pada napona izraženim u procentima:

$$u_k[\%] = 100 \frac{U_k}{U_n} = 100 \frac{Z_k I_n}{U_n} = z_k[\%]; \quad (4.15)$$

$$u_r[\%] = 100 \frac{R_k I_n}{U_n} = 100 \frac{P_k}{S_n} ; \quad (4.16)$$

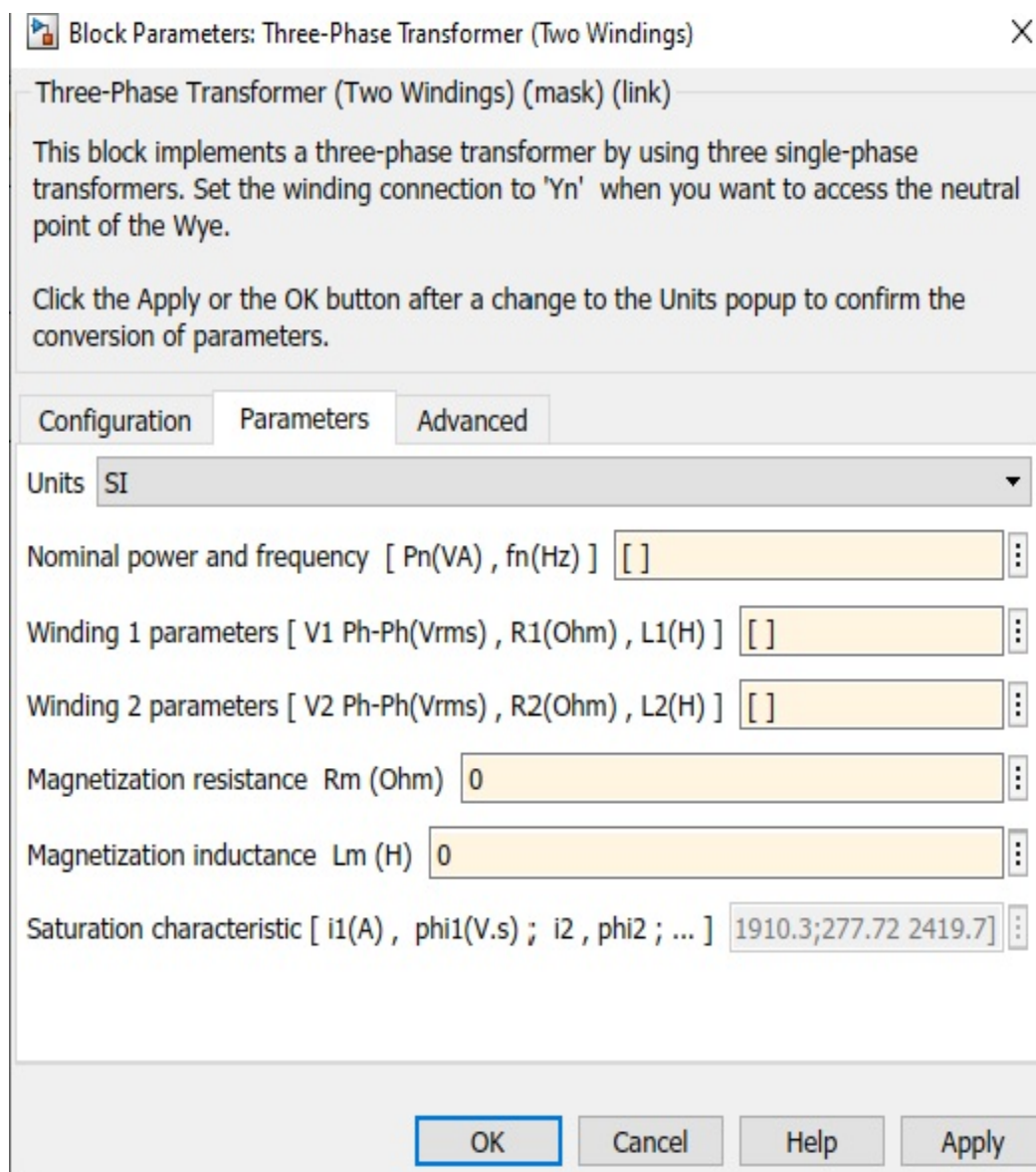
$$u_x[\%] = 100 \frac{X_k I_n}{U_n} = \sqrt{u_k^2 - u_r^2}. \quad (4.17)$$

Kod trofaznih transformatora moguća su dva tehnička rješenja: grupa od tri jednofazna transformatora sa zasebnim magnetskim kolima, ili jedan trofazni transformator sa zajedničkim magnetskim kolom. Za potrebe magistarskog rada, prilikom izrade simulacionog modela korišten je simulacioni blok dvonamotajnog transformatora sa tri jednofazna transformatora. Slika 4.19 prikazuje simulacioni blok trofaznog dvonamotajnog transformatora, čije su modelovane faze simetrične.



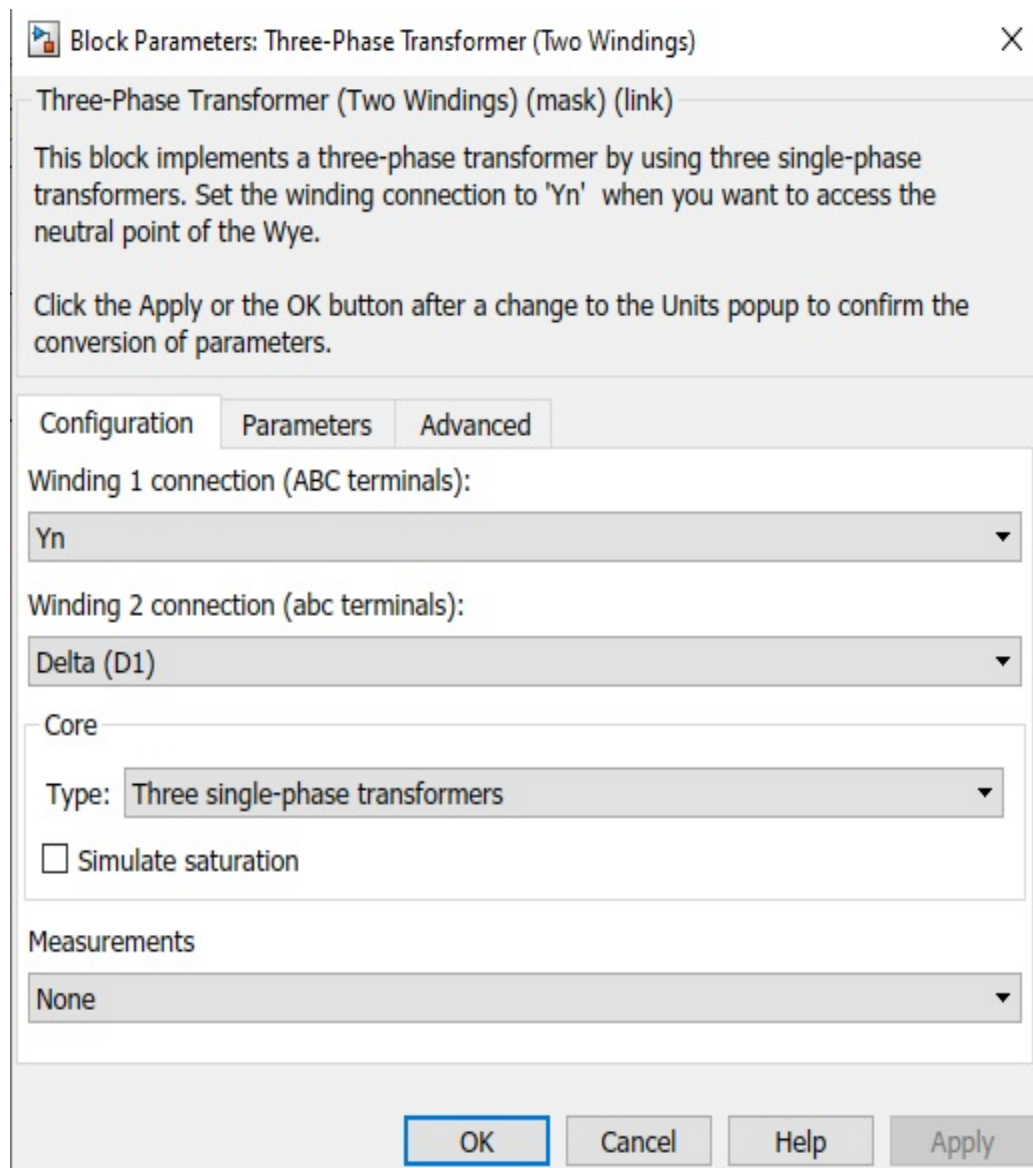
Slika 4.19: Simulacioni blok trofaznog dvonamotajnog transformatora

Nakon primjene proračuna za izračunavanje parametara korištenjem vrijednosti dobijenih pri eksperimentalnom ispitivanju transformatora u ogledu praznog hoda i kratkog spoja, moguće je izvršiti parametrizaciju u Simulink modelu, koja je prikazana na slici 4.20. Takođe, na ovom simulacionom trofaznom dvonamotajnom transformatoru je moguće konfigurirati različite spojeve zvjezdišta. S tim u vezi, simulacioni blok omogućava različite načine tretiranja zvjezdišta primarnog i sekundarnog namotaja transformatora: dostupno neutralno zvjezdište, interno direktno uzemljeno zvjezdište, spoljašnje uzemljeno zvjezdište preko dodate impedanse uzemljenja zvjezdišta (slika 4.21). Ovaj simulacioni blok transformatora omogućava podešavanje uglavnom svih kombinacija grupa spojeva primarnog i sekundarnog namotaja transformatora koje dominiraju u elektroenergetskim sistemima.



Slika 4.20: Parametrizacija simulacionog bloka trofaznog dvonamotajnog transformatora

U kombinaciji sa mjernim simulacionim blokom dostupno je mjerenje električnih veličina transformatora. Blok simulacionog modela trofaznog dvonamotajnog transformatora omogućava pojedinačno ili istovremeno mjerenje faznih napona, faznih struja, fluksa i struju magnecenja na namotajima.



Slika 4.21: Konfiguracija uzemljenja transformatora

U tabeli 4.5 prikazan je popis ulaznih parametara simulacione komponente trofaznog dvonamotajnog transformatora pri odgovarajućoj nominalnoj frekvenciji, kao i koncentrisani parametri dobijeni putem prethodno prikazanih relacija.

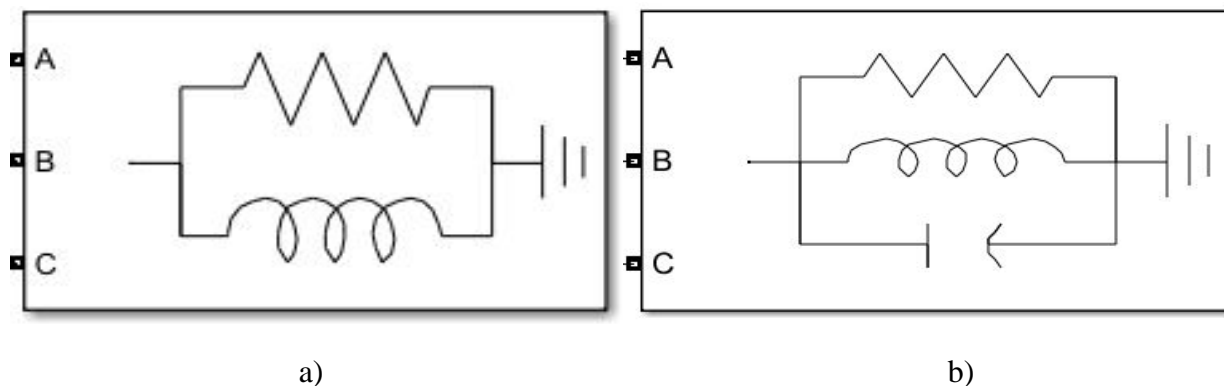
Tabela 4.5: Ulazni i koncentrisani parametri trofaznog dvonamotajnog transformatora

Ulazni i koncentrisani parametri transformatora	Oznaka	Jedinica
Nazivna prividna snaga transformatora	$S_n$	[VA]
Efektivna vrijednost linijskog napona primarnog namotaja transformatora	$U_{1n}$	[V]
Efektivna vrijednost linijskog napona sekundarnog namotaja transformatora	$U_{2n}$	[V]
Fazna radna otpornost primarnog namotaja transformatora	$R_1$	[ $\Omega$ ]
Fazna radna otpornost sekundarnog namotaja transformatora	$R_2$	[ $\Omega$ ]
Fazna induktivnost primarnog namotaja transformatora	$L_1$	[H]
Fazna induktivnost sekundarnog namotaja transformatora	$L_2$	[H]
Otpornost magnećenja	$R_m$	[ $\Omega$ ]
Induktivnost magnećenja	$L_m$	[H]

#### 4.4.5 Simulacioni model opterećenja sabirnice

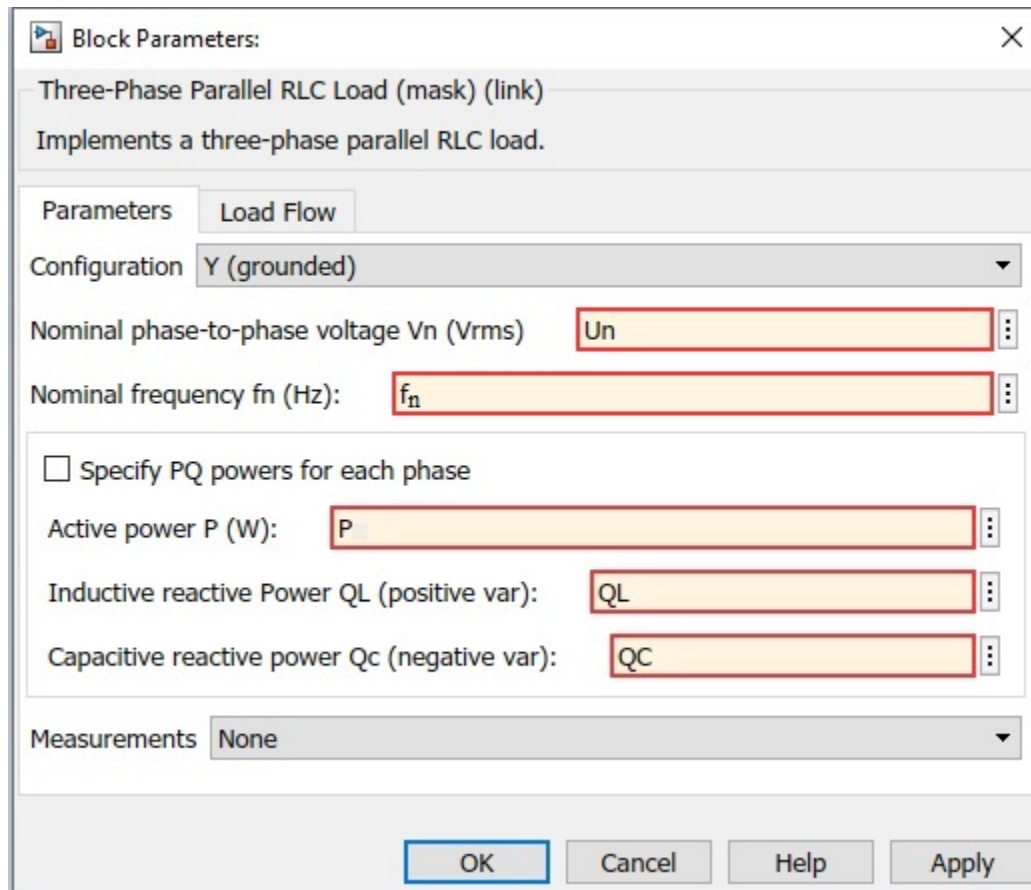
Trofazno opterećenje SN/NN sabirnice se modeluje kao paralelni spoj RLC elemenata. Karakter opterećenja može biti čisto radni, čisto induktivni, čisto kapacitivni, radno – induktivni, ili radno – kapacitivni. Definisanjem aktivnih i reaktivnih snaga opterećenja mijenja se i karakter opterećenja. Shodno tome, na samom bloku se prikazuju samo aktivni elementi. To znači da elementi kojima je dodijeljena vrijednost nula nisu prikazani na RLC bloku.

Na slici 4.22 prikazan je izgled simulacionog blok modela trofaznog opterećenja sabirnice, dok je na slici 4.23 prikazana njegova parametrizacija.



Slika 4.22: Simulacioni RLC blok trofaznog opterećenja sa

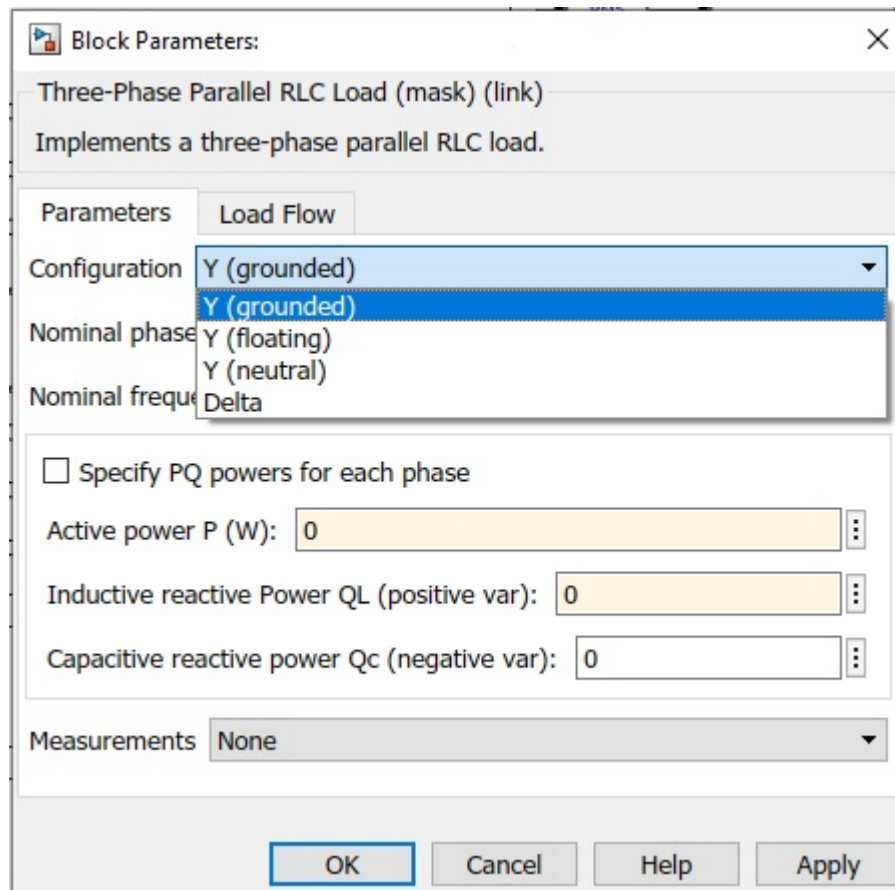
a) induktivnom reaktivnom snagom b) induktivnom i kapacitivnom reaktivnom snagom



Slika 4.23: Parametrizacija RLC simulacionog bloka trofaznog opterećenja

Uzemljenja trofaznog RLC opterećenja moguće je konfigurirati u simulacionoj kartici parametri (slika 4.24). Uzemljenje može biti interno (slika 4.22), direktno eksterno, izolovano uzemljenje, kao i spoj potrošača u trougao. Odabirom tipa uzemljenja u padajućem meniju ažurira se i blok simulacionog modela opterećenja. Osim toga, potrebno je definisati nominalni linijski napon i nominalnu frekvenciju (u Evropi 50 Hz). U kombinaciji sa mjernim virtuelnim simulacionim blokom omogućeno je i mjerenje napona i struja opterećenja.

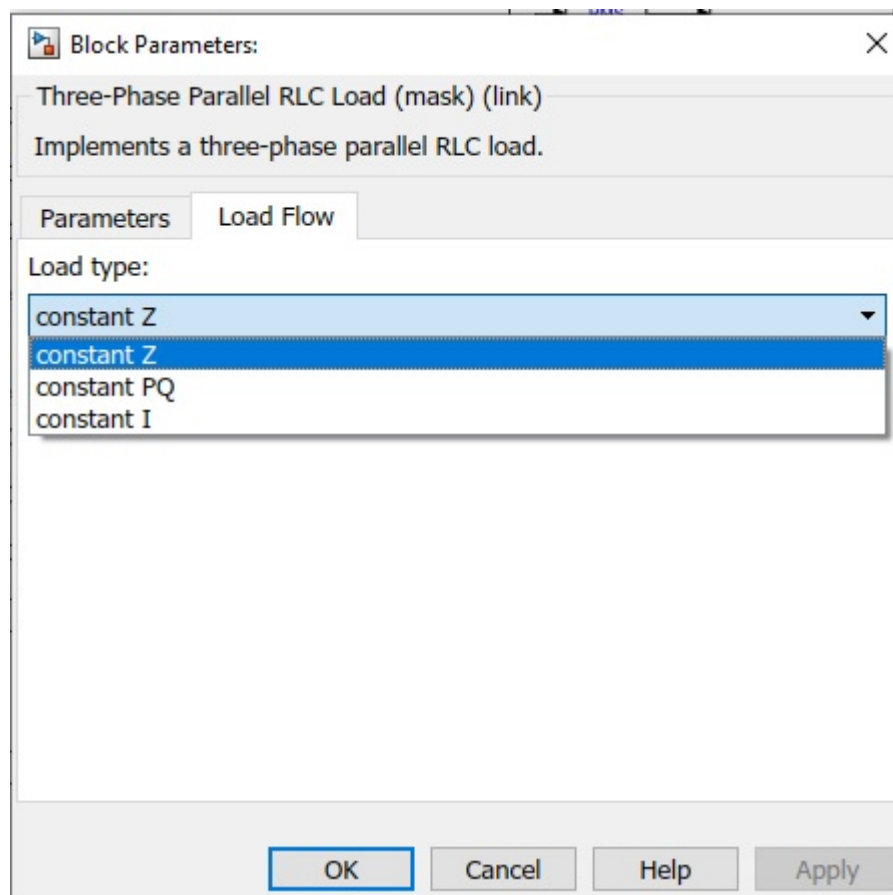




Slika 4.24: Konfiguracija uzemljenja simulacionog modela trofaznog opterećenja

U kartici tokova snaga bloka parametara konfigurirše se program rada simulacionog modela. Ukoliko se želi analizirati uticaj sklopnog prenapona na sabirnicu različitih vrsta opterećenja potrebno je kreirati simulacioni model industrijskog opterećenja koji odgovara realnom industrijskom opterećenju. Parametri potrebni za unos u ovu karticu koriste se za inicijalizaciju Simulink modela. Oni nemaju uticaj na blok simulacionog modela trofaznog opterećenja, kao ni na rezultate simulacije. Ukoliko se odabere program rada "constant Z", numerički iznos impedanse se određuje na osnovu unesene aktivne i reaktivne snage i nominalnog faznog napona. Tokom numeričkog proračuna RLC elemenata modela potrošača impedansa se održava konstantnom. Efektivne vrijednosti ukupne aktivne snage  $P$  i reaktivne snage ( $Q_L - Q_C$ ) se mijenjaju proporcionalno promjeni kvadrata pogonskog napona na sabirnici opterećenja.

Ukoliko se definiše program rada "constant PQ", aktivna snaga i ukupna reaktivna snaga imaju konstantne vrijednosti unijete u prethodnoj kartici simulacionog bloka. Ako se pri ovim uslovima izvrši primjena numeričkog proračuna tokova snaga, nominalni linijski napon će se prilagoditi linijskom naponu sabirnice koji proizilazi iz numeričkog proračuna tokova snaga (slika 4.25). Za odabir programa rada "constant I", ukupna struja opterećenja će imati konstantnu vrijednost. Ukoliko se izvrši primjena numeričkog proračuna tokova snaga, struja opterećenja će imati vrijednost dobijenu iz numeričkog proračuna za unesene vrijednosti snaga.



Slika 4.25: Konfiguracija tokova snaga simulacionog modela trofaznog opterećenja

U tabeli 4.6 se nalazi lista ulaznih parametara simulacionog blok modela trofaznog opterećenja SN/NN sabirnice.

Tabela 4.6: Ulazni parametri trofaznog opterećenja SN/NN sabirnice

Izračunati koncentrisani parametri energetskog voda	Oznaka	Jedinica
Efektivna vrijednost linijskog napona	$U_{ln}$	[V]
Nominalna frekvencija	$f_n$	[Hz]
Ukupna trofazna aktivna snaga	$P$	[W]
Ukupna pozitivna reaktivna snaga	$Q_L$	[VAr]
Ukupna negativna reaktivna snaga	$Q_C$	[VAr]

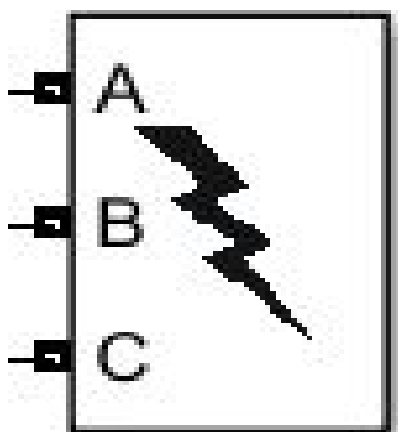
#### 4.4.6 Simulacioni model kratkog spoja

U trofaznim mrežama razlikuju se četiri vrste kratkih spojeva: jednopolni, dvopolni, dvopolni s istovremenim spojem sa zemljom i trolpolni kratki spoj.

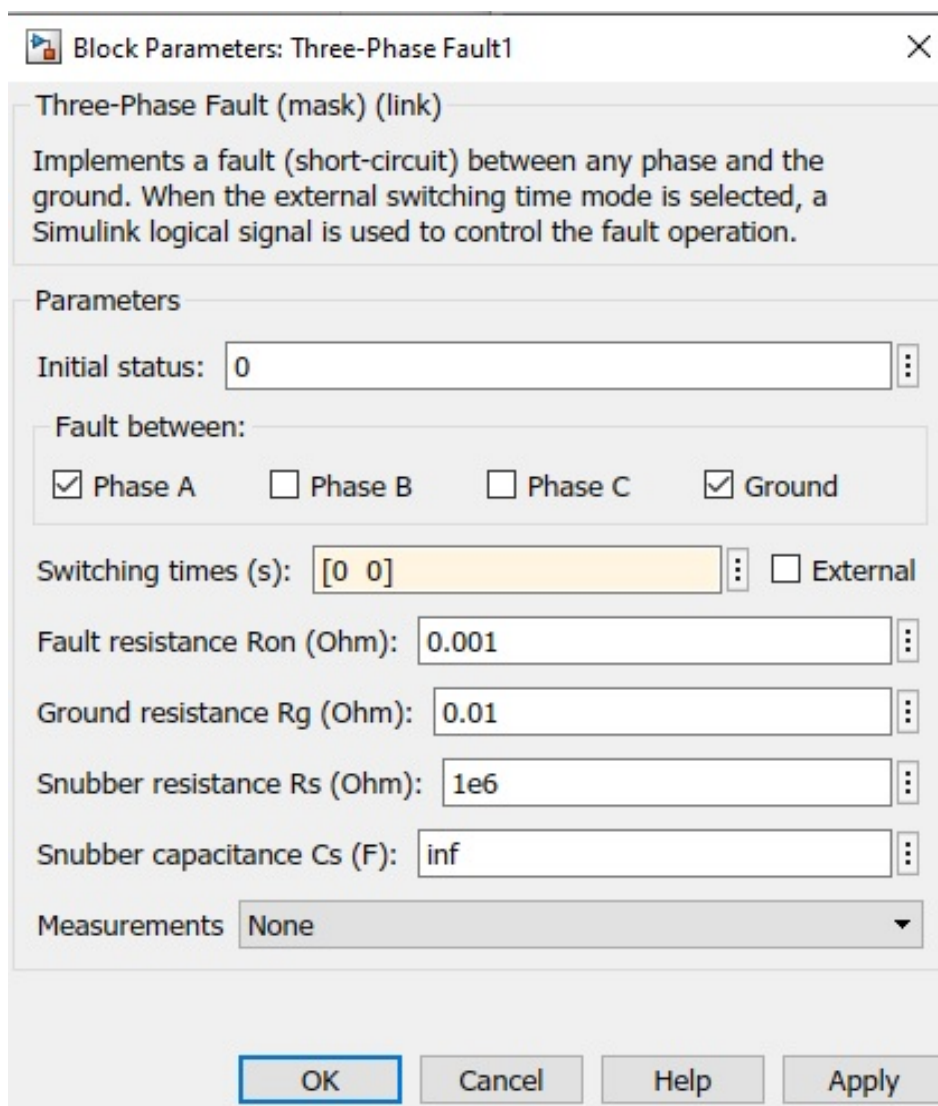
Pri izboru opreme za visokonaponsko razvodno postrojenje potrebno je znati za koju vrstu kratkog spoja se pojavljuje najveća struja, iz razloga što je između ostalog veličina struje kratkog spoja mjerodavna za taj izbor. Poznavanje vrijednosti struje kratkog spoja je veoma korisno, jer one predstavljaju maksimalne vrijednosti koje se uopšte mogu pojaviti u posmatranom sistemu. Bolje poznavanje prilika u elektroenergetskim sistemima, prilikom analize dovodi do pretpostavki i rezultata bližih stvarnim prilikama.[8]

U okviru Simulink biblioteke postoji trofazni blok koji se zove "Fault". Glavna karakteristika ovog bloka je vrijeme uključenja i isključenja trajanja generisanog kvara koji se podešava eksternim Simulink signalom, ili trofaznim prekidačem kola koji predstavlja tajmer za internu kontrolu. Vrste kratkog spoja koje se mogu inicirati uz pomoć trofaznog bloka "Fault" su greške između jedne faze i zemlje, između dvije faze, dvije faze i zemlje i između tri faze. Odabir vrste kratkog spoja se vrši čekiranjem. Za potrebe magistarskog rada koristiće se jednopolni kratki spoj, koji u modelovanom visokonaponskom postrojenju predstavlja kvar sa najvećom strujom. Vrijeme uključenja i isključenja trajanja generisanog kvara se određuje spram potreba analize simulacionog modela. [31]

Na slici 4.26 prikazan je izgled simulacionog bloka "Fault", dok je na slici 4.27 prikazana mogućnost parametrizacije simulacionog bloka. U kombinaciji sa mjernim virtuelnim simulacionim blokom omogućeno je i mjerenje napona i struja kvara.



Slika 4.26: Simulacioni blok trofaznog kvara



Slika 4.27: Parametrizacija simulacionog bloka trofaznog kvara

## **5. Analiza sklopnih prenapona na TS 110 / 20 kV "Autoput 1 - Mrke"**

### **5.1 Uvod**

Za potrebe elektroenergetskog napajanja autoputa Bar – Boljare, u cilju dvostranog nezavisnog napajanja dionice „Smokovac – Mateševo“ izgrađena je TS 110/20 kV „AUTOPUT 1 - Mrke“. Nezavisnost napajanja trafostanice obezbijeđena je ulazno – izlaznim 110 kV dalekovodima.

Na trafostanicu „Autoput 1 - Mrke“ predviđeno je povezivanje TS 20/0,4 kV za napajanje objekata pomenute dionice. Napajanje će se obezbijediti za objekte koji se koriste za funkcionisanje autoputa, kao što su tuneli, naplatne rampe, petlje i ostali pomoćni objekti. [32]

Izgradnje 110 kV postrojenja i transformatora vrši se u sljedećim fazama:

- 1) izgradnja 110 kV postrojenja;
- 2) izgradnja transformacije 110/20 kV;
- 3) izgradnja 20 kV postrojenja;
- 4) izgradnja AC/DC razvoda;
- 5) izgradnja gromobranske zaštite i uzemljenja.

Postrojenje 110 kV je spoljašnje izvedbe, vazduhom izolovano sa jednim prekidačem, izlaznim rastavljačem sa noževima za uzemljenje, sabirničkim rastavljačem, strujnim i naponskim transformatorom u tri faze. Elementi postrojenja su montirani na čeličnim nosačima koji su fiksirani u betonskim temeljima.

TS 110/20 kV „Autoput 1 - Mrke“ se na 110 kV povezuje nadzemnim vodom do TS Podgorica 1, DV Podgorica 1/2 i izlazni DV Podgorica 1 – Trebješica do elektrovučnog postrojenja (EVP) Trebješica.

Veze u 110 kV dijelu postrojenja su projektovane Al/Fe 240 mm<sup>2</sup> užetom. [32] Veza između 110 i 20 kV naponskog nivoa uspostavljena je preko energetskog transformatora prenosnog odnosa 110/20 kV, snage 20 MVA. Najviši radni napon 110 kV postrojenja je 123 kV. Osnovne tehničke informacije za visokonaponsko postrojenje prikazane su u tabeli 5.1.

Tabela 5.1: Tehničke informacije visokonaponskog postrojenja

Tehničke informacije VN postrojenja	Vrijednosti
Nazivni napon	110 kV
Najviši radni napon	123 kV
Nazivna frekvencija	50 Hz
Podnosivi napon pogonske frekvencije, 1 min.	230 kV
Podnosivi udarni napon 1.2/50 $\mu$ s	550 kV
Naznačena podnosiva struja kratkog spoja	40 kA

Tropolni prekidač za 110 kV vodno polje je projektovano sa jednim elektromotornim pogonom za pomoćni napon 230 V AC, napon signalnih i upravljačkih jedinica 110 V DC, SF6 gasom za gašenje električnog luka, nominalnog napona 123 kV, nominalne struje 2000 A, nominalne prekidne moći 40 kA i nominalnom strujom uključenja 100 kA. Prekidač je proizvođača Siemens tipa 3AP1 FG – 145. Za SN naponski nivo predviđen je vakuumski prekidač nominalnog napona 24 kV, nominalne struje 1250 A i nominalne prekidne moći 20 kA.

Od interesa za analizu sklopnih prenapona su dva 20 kV – na izvoda VN postrojenja „Autoput 1 - Mrke“ tj. transformatorske stanice 20/0,4 kV „Vjeternik“ i „Smokovac“. Snaga TS „Vjeternik“ je 725 kW, dok je snaga TS „Smokovac“ 89 kW. Za SN vod (20 kV) je korišten kabl tipa XHE 49 – A 12/20 kV, koji je položen u kablovskom kanalu duž trase autoputa. [33] [34] [35]

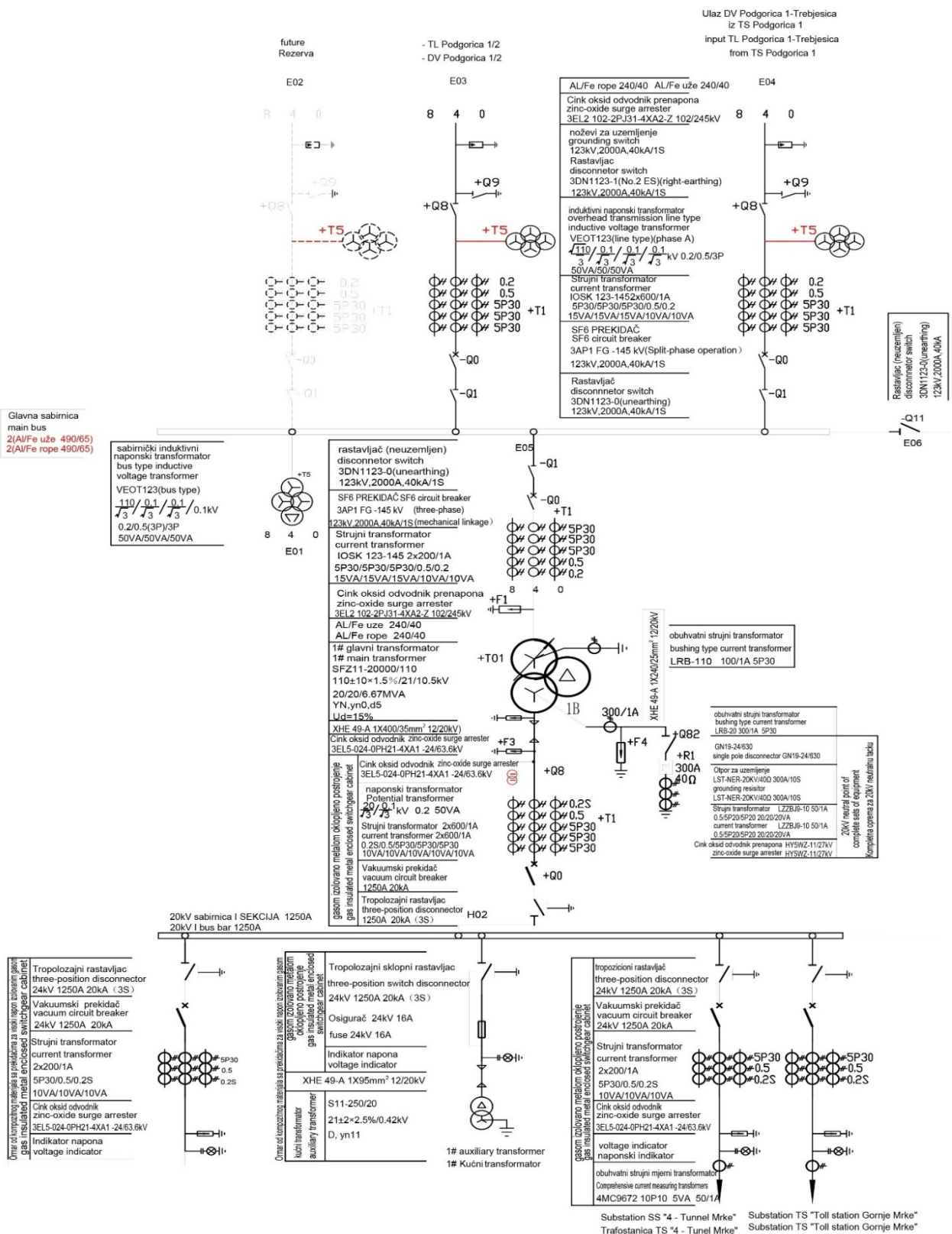
Na slici 5.1 prikazano je visokonaponsko razvodno postrojenje 110/20 kV „Autoput 1 - Mrke“, dok se na slikama 5.2 i 5.3 mogu vidjeti TS 20/04 kV, odnosno ekvivalentna šema samog postrojenja.



*Slika 5.1: Visokonaponsko razvodno postrojenje 110/20 kV „Autoput 1 - Mrke”*



*Slika 5.2: Građevinski objekat TS 20/0,4 kV*



Slika 5.3: Ekvivalentna šema VN postrojenja 110/20 kV „Autoput 1 - Mrke“



## 5.2 Konfiguracija elemenata VN postrojenja Autoput 1 „Mrke“ u programskom jeziku Matlab – Simulink

U ovom podpoglavlju tabelarno su prikazani elementi visokonaponskog razvodnog postrojenja korišteni za potrebe modelovanja u programskom jeziku Matlab – Simulink. Elementi su korišteni za vršenje simulacija i provjere sklopnih prenapona, koje su prikazane u narednim podpoglavljima.

### Naponski izvor

Tabela 5.2: Parametrizacija naponskog izvora

Ulazni parametri naponskog izvora	Oznaka	Vrijednost	Jedinica
Pogonska efektivna vrijednost faznih napona	$U_0$	$110e3/\sqrt{3}$	[V]
Fazni uglovi napona	$\varphi_0$	0, -120, 120	[°]
Frekvencija	f	50	[Hz]
Snaga trofaznog kratkog spoja pri baznom naponu	$S_{ks}$	100e6	[VA]
Bazna efektivna vrijednost linijskog napona	$U_{00}$	110e3	[V]
Međusobni odnos induktivnosti i radne otpornosti	X/R	7.72	[ ]

### Trofazni prekidači

Tabela 5.3: Parametrizacija 110 kV – nog trofaznog prekidača

Ulazni parametri trofaznog prekidača	Oznaka	Vrijednost	Jedinica
Unutrašnja otpornost trofaznog prekidača u vodljivom stanju	$R_{on}$	42e-6	[Ω]
Trenutak uklapanja trofaznog prekidača	$t_{uklapanja}$	zatvoren	[ms]
Trenutak isklapanja trofaznog prekidača	$t_{isklapanja}$	10e3	[ms]
Prigušna otpornost trofaznog prekidača	$R_p$	1e6	[Ω]
Prigušna kapacitivnost trofaznog prekidača	$C_p$	inf	[F]

Tabela 5.4: Parametrizacija 20 kV – nog trofaznog prekidača

Ulazni parametri trofaznog prekidača	Oznaka	Vrijednost	Jedinica
Unutrašnja otpornost trofaznog prekidača u vodljivom stanju	$R_{on}$	70e-6	[Ω]
Trenutak uklapanja trofaznog prekidača	$t_{uklapanja}$	-	[ms]
Trenutak isklapanja trofaznog prekidača	$t_{isklapanja}$	-	[ms]
Prigušna otpornost trofaznog prekidača	$R_p$	1e6	[Ω]
Prigušna kapacitivnost trofaznog prekidača	$C_p$	inf	[F]

### Distributivni SN vod

Tabela 5.5: Ulazni parametri SN voda

Ulazni parametri energetskog voda	Oznaka	Vrijednost	Jedinica
Direktna radna otpornost voda	$R_1$	0,125	[Ω/km]
Nulta radna otpornost voda	$R_0$	0,375	[Ω/km]
Direktna induktivnost voda	$L_1$	0,553e-3	[H/km]
Nulta induktivnost voda	$L_0$	1,659e-3	[H/km]
Direktna kapacitivnost voda	$C_1$	0,28e-6	[F/km]
Nulta kapacitivnost voda	$C_0$	0,093e-6	[F/km]
Broj faza voda	N	3	[ ]
Dužina voda	l	51 i 58	[km]
Pogonska frekvencija	f	50	[Hz]

**Trofazni dvonamotajni energetski transformator**

Tabela 5.6: Parametrizacija trofaznog dvonamotajnog transformatora

Ulazni i koncentrisani parametri transformatora	Oznaka	Vrijednost	Jedinica
Nazivna prividna snaga transformatora	$S_n$	20e6	[VA]
Efektivna vrijednost linijskog napona primarnog namotaja transformatora	$U_{1n}$	1.1e+05	[V]
Efektivna vrijednost linijskog napona sekundarnog namotaja transformatora	$U_{2n}$	2e+04	[V]
Fazna radna otpornost primarnog namotaja transformatora	$R_1$	3,025	[Ω]
Fazna radna otpornost sekundarnog namotaja transformatora	$R_2$	0,3	[Ω]
Fazna induktivnost primarnog namotaja transformatora	$L_1$	3,6975	[H]
Fazna induktivnost sekundarnog namotaja transformatora	$L_2$	0,011459	[H]
Otpornost magnećenja	$R_m$	5000	[Ω]
Induktivnost magnećenja	$L_m$	962,89	[H]

**Trofazno opterećenje**

Tabela 5.7: Parametrizacija trofaznog opterećenja

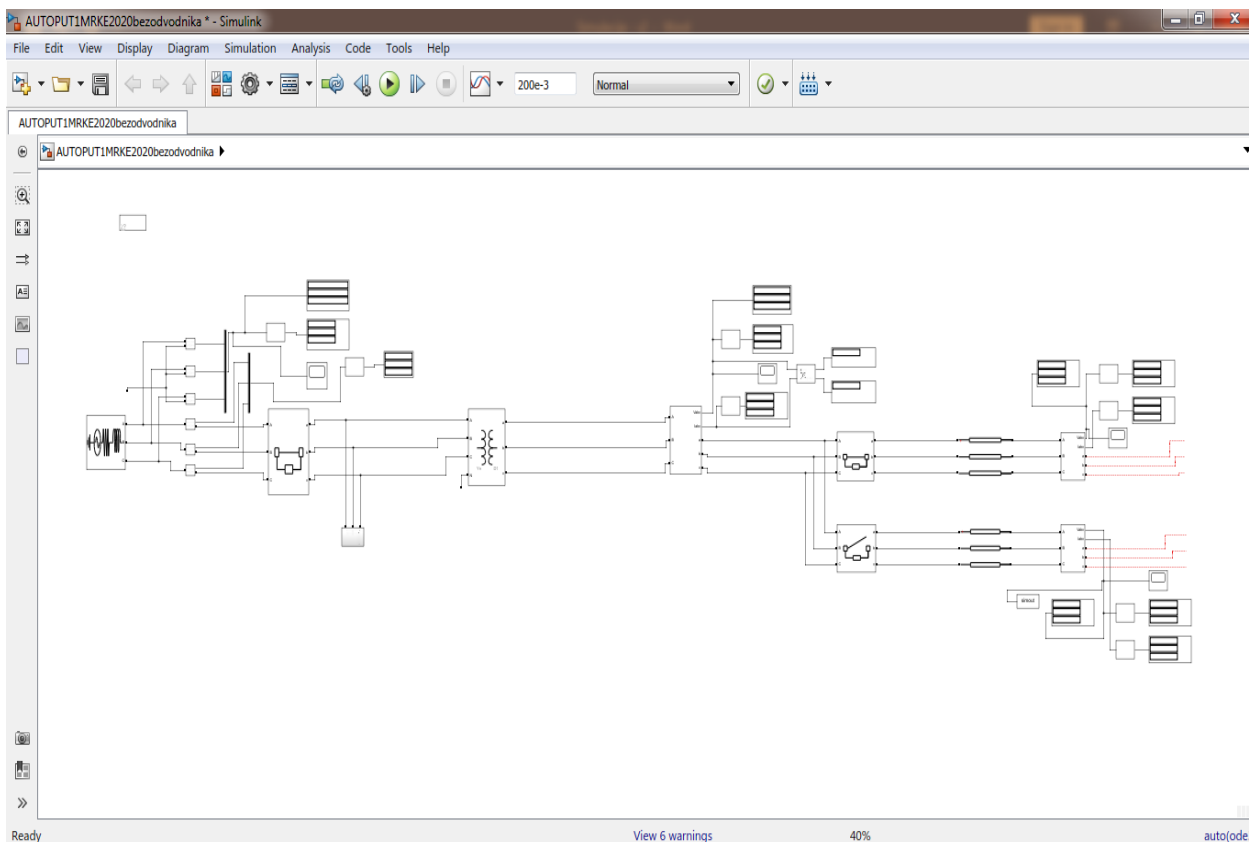
Izračunati koncentrisani parametri energetskog voda	Oznaka	Vrijednost	Jedinica
Efektivna vrijednost linijskog napona	$U_{ln}$	20e3	[V]
Nominalna frekvencija	$f_n$	50	[Hz]
Ukupna trofazna aktivna snaga	$P$	89.21e3 i 724.9e3	[W]
Ukupna pozitivna reaktivna snaga	$Q_L$	27.85e3 i 238.26e3	[VAr]
Ukupna negativna reaktivna snaga	$Q_C$	0	[VAr]

### 5.3 Simulacije VN postrojenja Autoput 1 „Mrke“

Visokonaponsko postrojenje 110/20 kV „Autoput 1 - Mrke“ posjeduje dva 20 kV – na izvoda na čijim krajevima se nalaze „TS Vjeternik“ i „TS Smokovac“, čije su dužine izlaznih kablova 59,5 km i 51 km. [35]

Zbog veće dužine voda i snage, „TS Vjeternik“ će se tretirati kao prvi izvod na kome se prekidač uključuje, dok će „TS Smokovac“ biti drugi izvod koji će u trenucima uključivanja prekidača prvog izvoda biti otvoren ili zatvoren. Cilj je da se nađe najnepovoljnija situacija tj. da se zabilježe maksimalni mogući prenaponi. U simulaciji su mjereni fazni naponi. Nominalna vrijednost faznog napona sekundara energetskog transformatora iznosi 11.547 kV. Iz modela VN postrojenja su tokom simulacije uklonjeni odvodnici prenapona.

Izvršeno je simuliranje sa različitim vremenima zatvaranja prekidača od kojih su izdvojene simulacije sa najvećim vrijednostima. Na slici 5.4 je prikazan model VN postrojenja „Autoput 1 – Mrke“ u programskom jeziku Matlab – Simulink, za slučaj rada postrojenja u praznom hodu.



Slika 5.4: Model VN postrojenja „Autoput 1 – Mrke“ – Simulink; prazan hod

Prekidač 110 kV je podešen na sljedeći način:

Initial status: closed

Switching time: 10 s

Mjereni su i fazni naponi na 110 kV – noj strani, kao i vrijednosti na sekundaru transformatora.

### **5.3.1 Analiza uticaja manipulacije trofaznim prekidačem izvoda „TS Vjeternik“ na visinu i trajanje sklopnog prenapona pri otvorenom prekidaču izvoda „TS Smokovac“**

Cilj simulacija je analizirati visinu i trajanje sklopnog prenapona pri uklapanju trofaznog prekidača izvoda „TS Vjeternik“. U trenutku uklapanja prekidača „TS Vjeternik“, prekidač izvoda „TS Smokovac“ je u otvorenom položaju sa podešenim vremenom zatvaranja 10 sekundi.

#### Prekidač TS Smokovac:

Initial status: open

Switching time: 10 s

Ulazni parametri identični su ulaznim parametrima definisanim u tabelama podpoglavlja 5.2.

#### **5.3.1.1 Slučaj neopterećenog izvoda „TS Vjeternik“**

Za simulacije označene brojevima 1.1, 1.2 i 1.3 definisana su vremena uklapanja trofaznog prekidača izvoda „TS Vjeternik“ na sljedeći način:

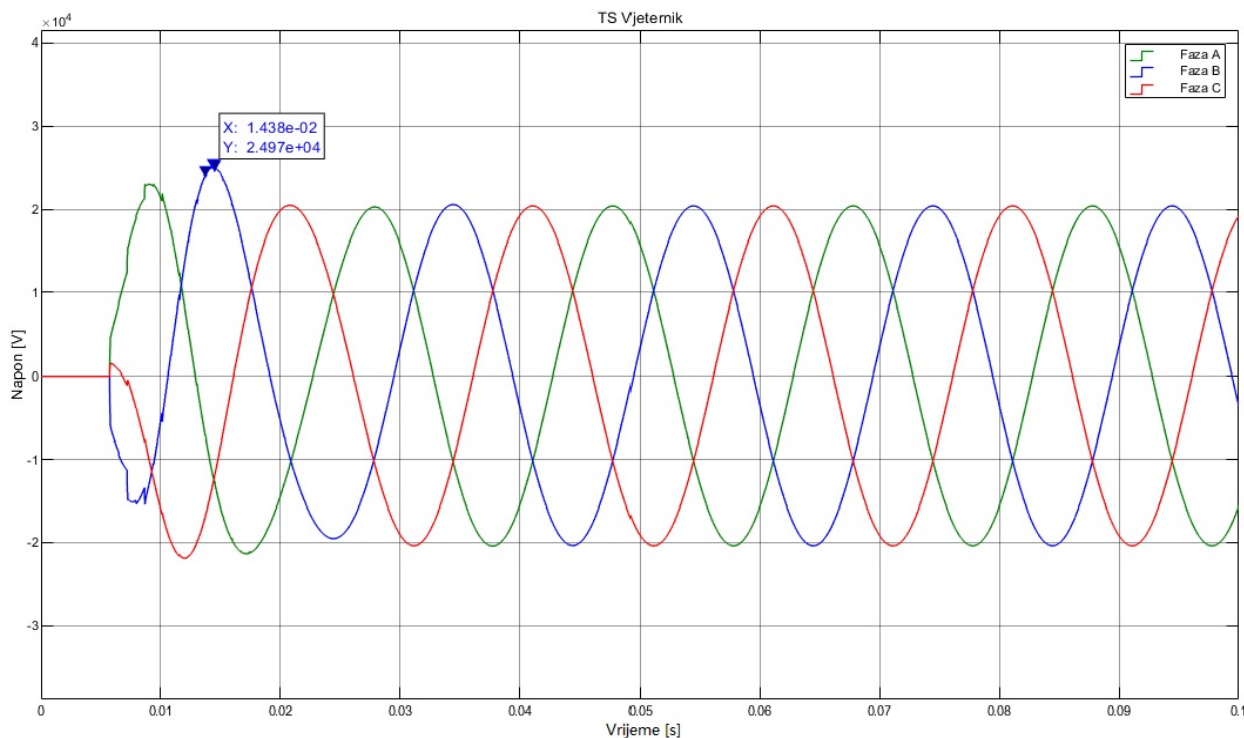
#### Prekidač TS Vjeternik:

Initial status: open;

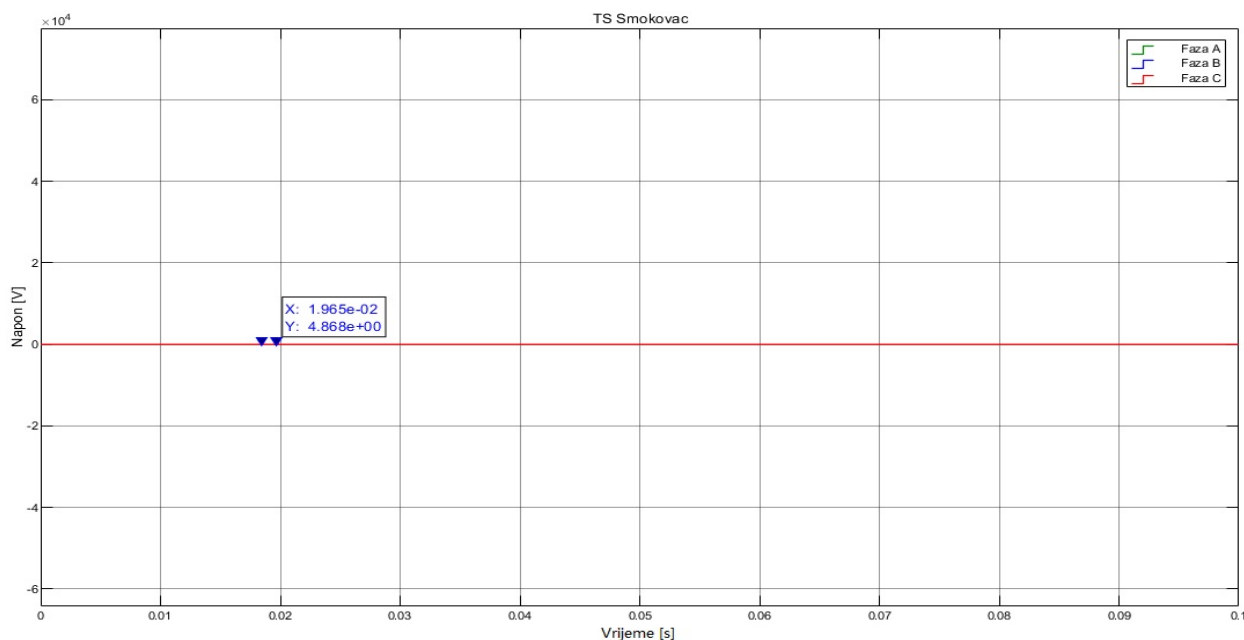
Switching time: 5e-3; 15e-3; 25e-3 s.

To znači da je za simulaciju broj 1.1 vrijeme uklapanja prekidača nakon 5 ms, za simulaciju 1.2 nakon 15 ms i za simulaciju broj 1.3 nakon 25 ms. Prilikom ispitivanja na kraju oba izvoda nije prisutno trofazno opterećenje tj VNRP radi u praznom hodu.

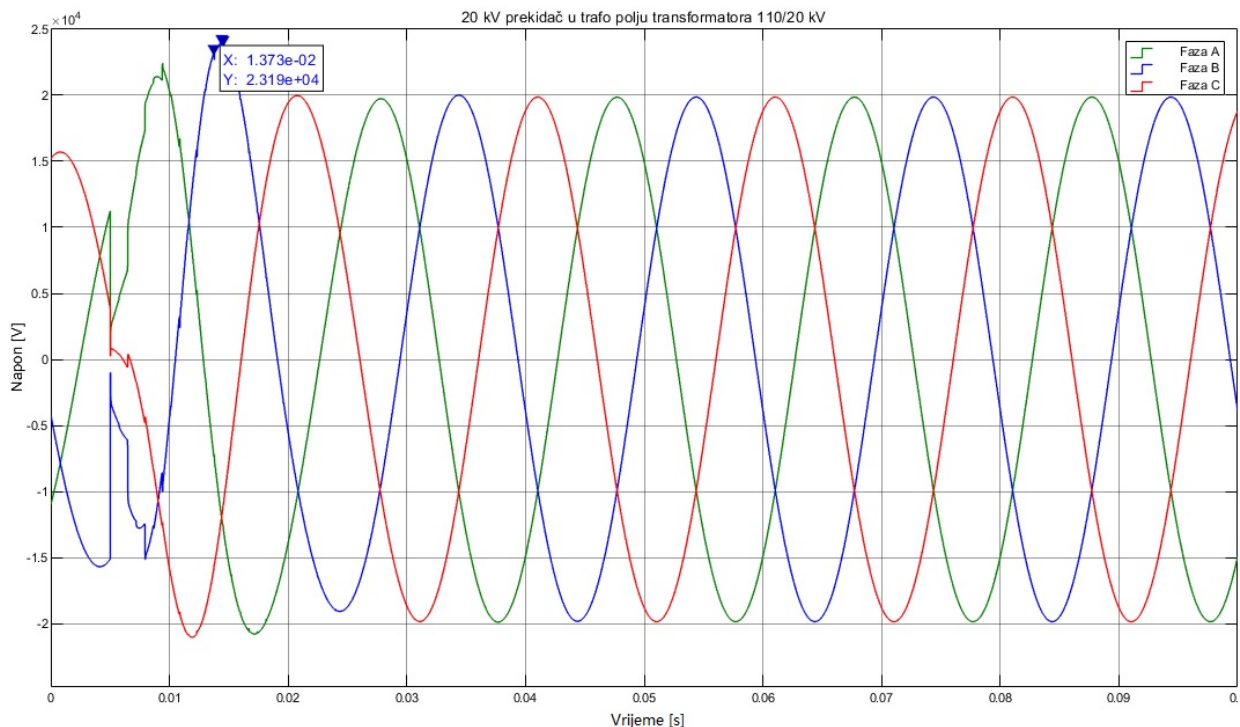
Na slikama 5.5, 5.6 i 5.7 su prikazani sinusoidalni oblici napona za izvod „TS Vjeternik“, „TS Smokovac“, kao i sinusoidalni oblik 20 kV – nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV za simulacije 1.1, 1.2 i 1.3, dok su u tabeli 5.8 prikazane vremenske karakteristike maksimalnog prenapona posmatranog izvoda „TS Vjeternik“ čija je vrijednost dobijena u svim navedenim simulacijama.



Slika 5.5: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik“ (simulacije broj 1.1, 1.2 i 1.3)



Slika 5.6: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac“ (simulacije broj 1.1, 1.2 i 1.3)



Slika 5.7: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacije broj 1.1, 1.2 i 1.3)

Tabela 5.8: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik” – simulacije 1.1, 1.2 i 1.3

Broj simulacije	Amplituda prenapona (kV)	Amplituda prenapona (r.j.)	Strmina porasta napona (kV/ $\mu$ s)	Vrijeme čela talasa T1 (ms)	Vrijeme začelja talasa T2 (ms)	Vrijeme trajanja maksimuma Td (ms)	Vrijeme do prolaska kroz nulu T0 (ms)
1.1	24,966	1,53	0,0066	3,758	6,695	2,276	8,271
1.2							
1.3							

### 5.3.1.2 Slučaj opterećenog izvoda „TS Vjeternik”

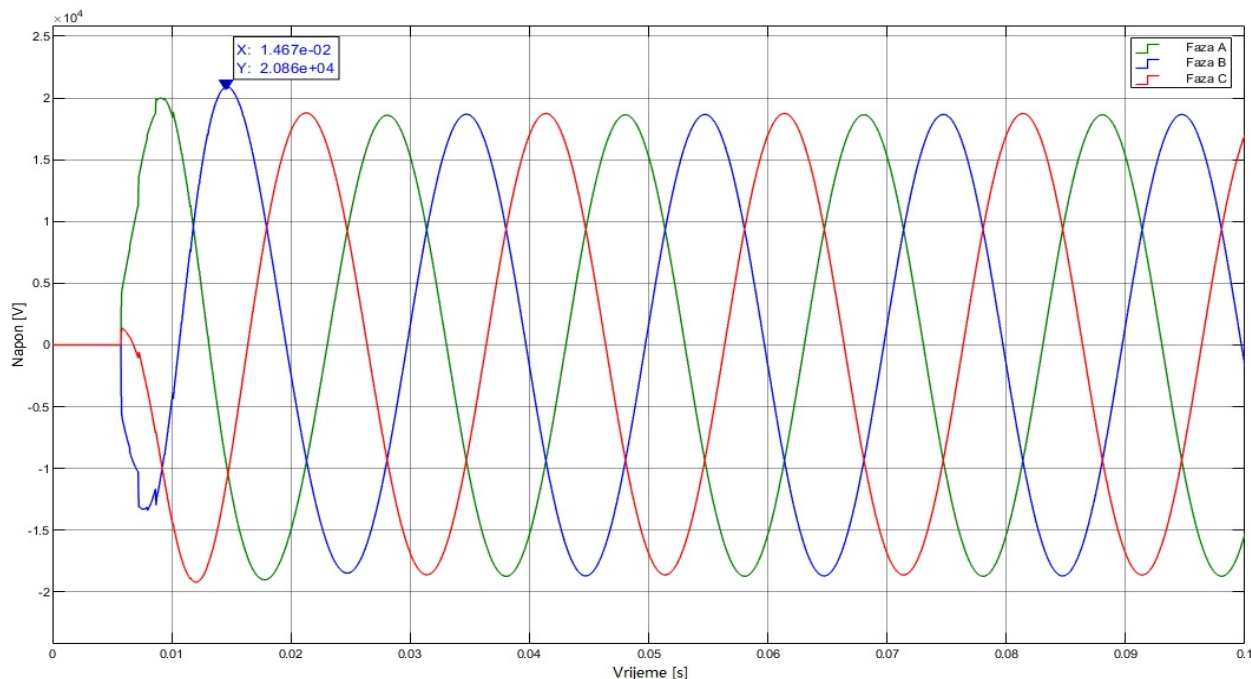
Za simulacije pod brojem 3.1, 3.2 i 3.3 važi ista parametrizacija prekidača kao i u prethodno navedenim simulacijama, odnosno vremena uklapanja prekidača izvoda „TS Vjeternik” su 5, 15 i 25 ms.

Prekidač TS Vjeternik:

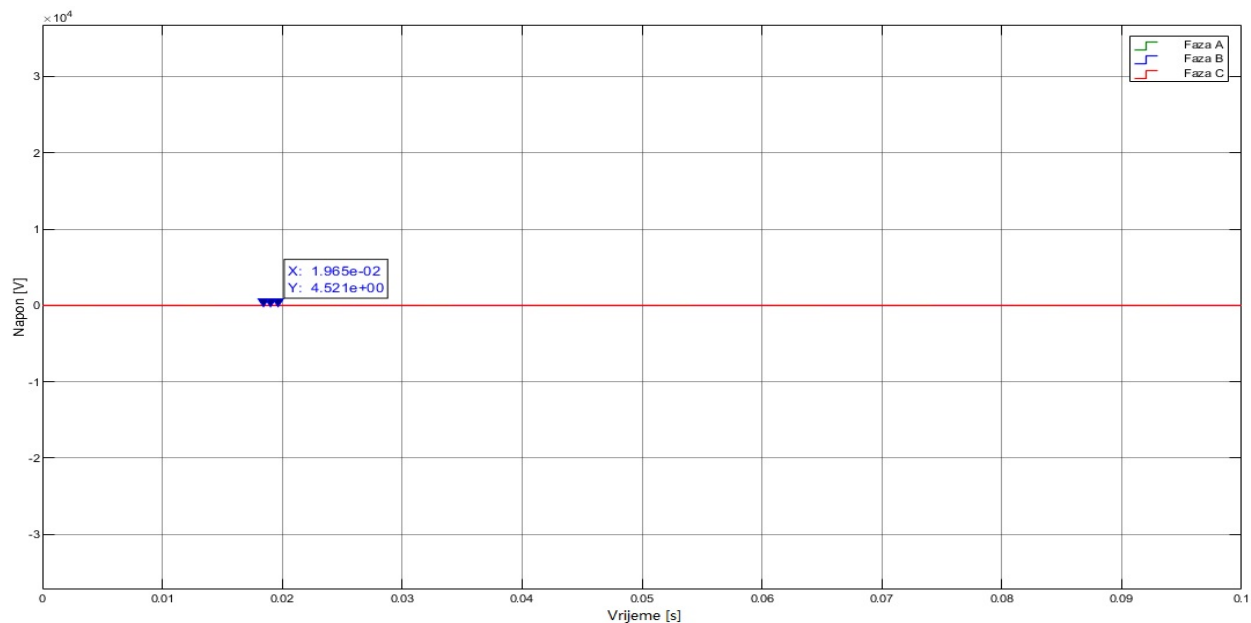
Initial status: open

Switching time: 5e-3; 15e-3; 25e-3 s.

Za navedene simulacije važi da je na kraju oba izvoda prisutno opterećenje, s tim što je tokom simulacija prekidač izvoda „TS Smokovac“ konstantno otvoren. Parametrizacija opterećenja definisana je u tabeli 5.7. Na slikama 5.8, 5.9 i 5.10 su prikazani sinusoidalni oblici napona oba izvoda, kao i 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV, dok su u tabeli 5.9 prikazane vremenske karakteristike maksimalnog napona.

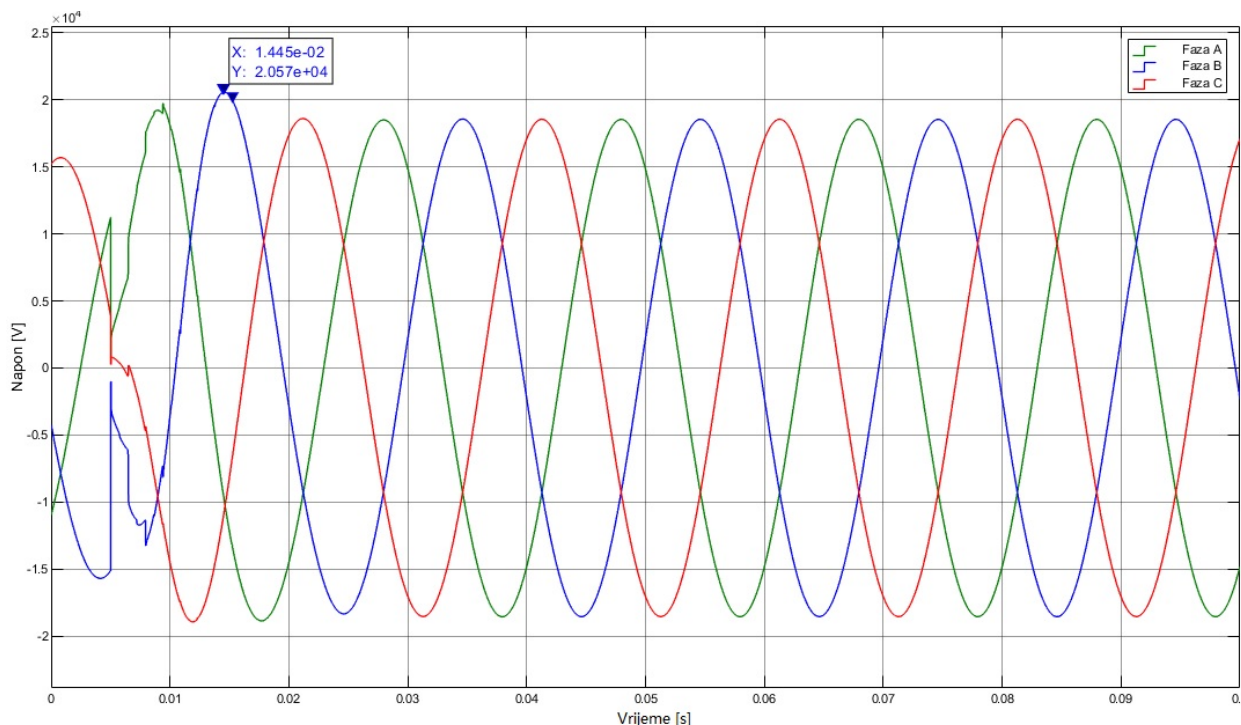


Slika 5. 8: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik“ (simulacije broj 3.1, 3.2, 3.3)



Slika 5. 9: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac“ (simulacije broj 3.1, 3.2, 3.3)





Slika 5.10: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacije broj 3.1, 3.2, 3.3)

Tabela 5. 9: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik” – simulacije 3.1, 3.2 i 3.3

Broj simulacije	Amplituda prenapona (kV)	Amplituda prenapona (r.j.)	Strmina porasta napona (kV/ $\mu$ s)	Vrijeme čela talasa T1 (ms)	Vrijeme začelja talasa T2 (ms)	Vrijeme trajanja maksimuma Td (ms)	Vrijeme do prolaska kroz nulu T0 (ms)
3.1	20,286	1,28	0,0049	4,085	7,184	2,901	8,723
3.2							
3.3							

### 5.3.2 Analiza uticaja manipulacije trofaznim prekidačem izvoda „TS Vjeternik” na visinu i trajanje sklopnog prenapona pri zatvorenom prekidaču izvoda „TS Smokovac”

Cilj simulacija je analizirati visinu i trajanje sklopnog prenapona pri uklapanju trofaznog prekidača izvoda „TS Vjeternik”. U trenutku uklapanja prekidača „TS Vjeternik”, prekidač izvoda „TS Smokovac” je u zatvorenom položaju sa podešenim vremenom zatvaranja 10 sekundi.

Prekidač TS Smokovac:

Initial status: close

Switching time: 10 s

Ulazni parametri identični su ulaznim parametrima definisanim u tabelama podpoglavlja 5.2.

### **5.3.2.1 Slučaj rada VNRP – a u praznom hodu**

U simulacijama označene brojevima 2.1, 2.2 i 2.3 vrši se ispitivanje postrojenja pri radu u praznom hodu, za koje je prekidač izvoda „TS Vjeternik" podešen na sljedeći način:

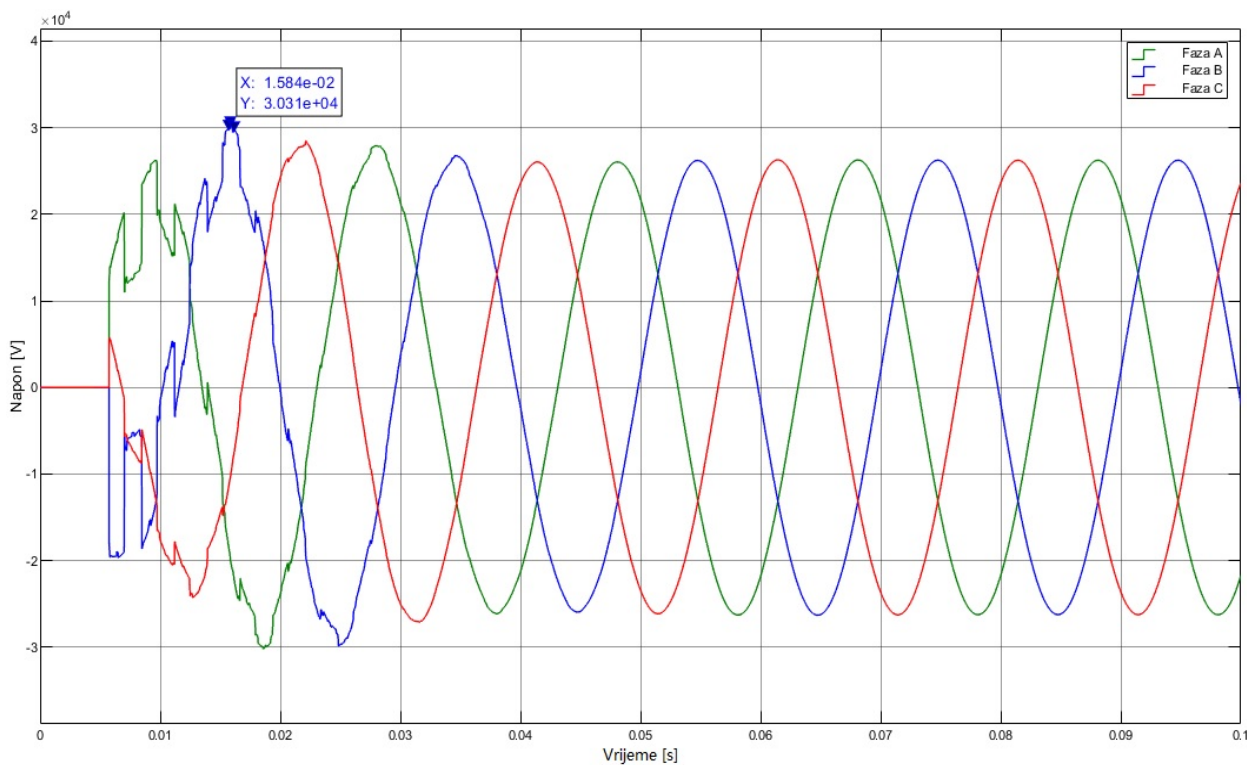
Prekidač TS Vjeternik:

Initial status: open

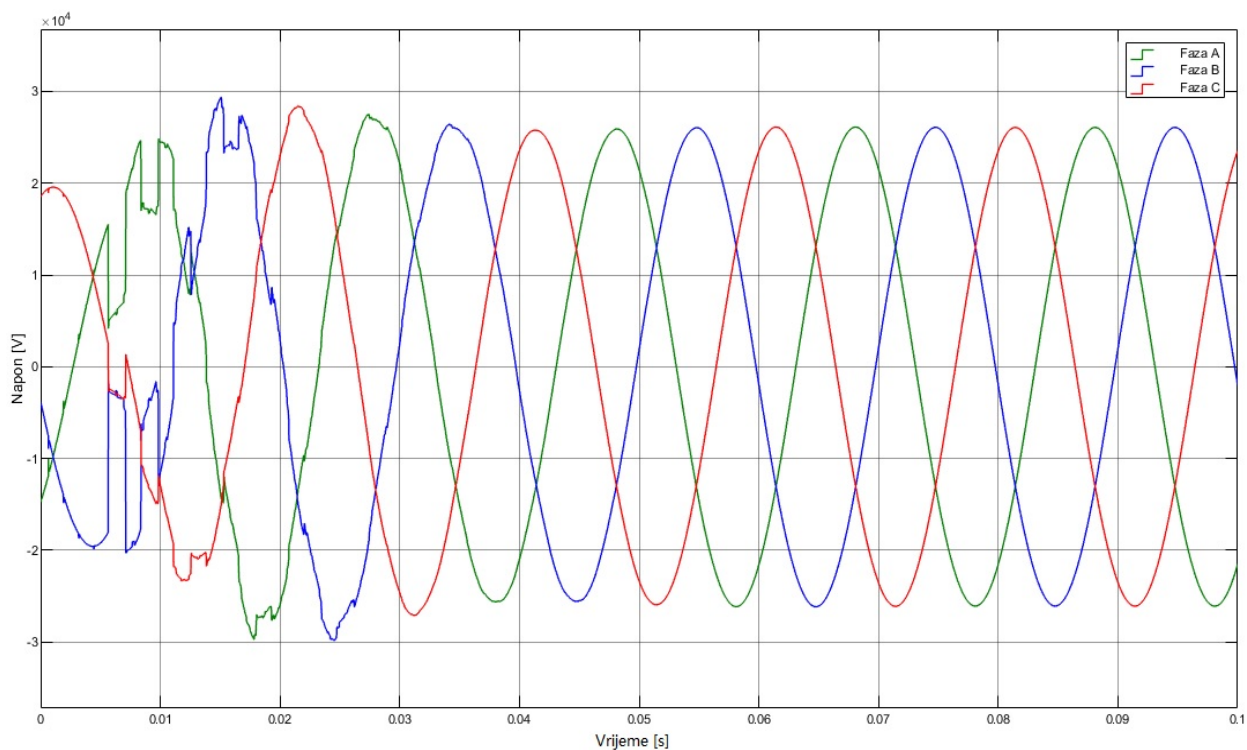
Switching time: 5e-3; 15e-3; 25e-3 s.

To znači da je za simulaciju broj 2.1 vrijeme uklapanja prekidača nakon 5 ms, za simulaciju 2.2 nakon 15 ms i za simulaciju broj 2.3 nakon 25 ms.

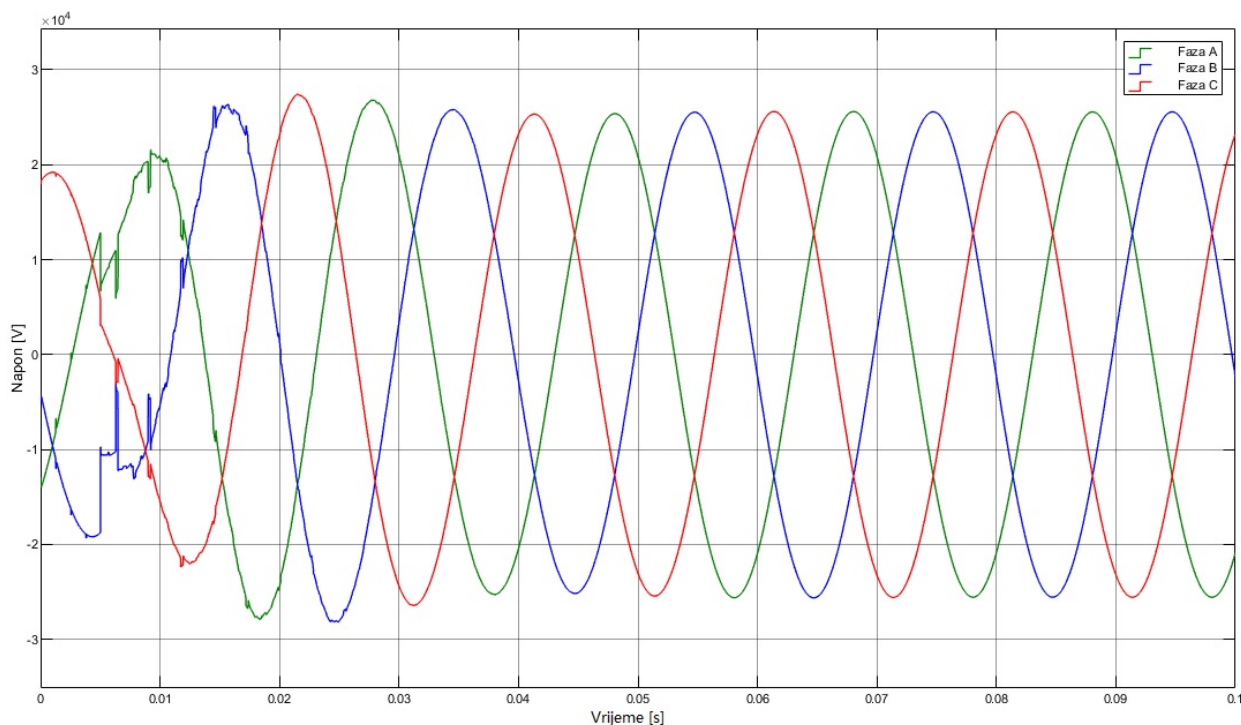
Na slikama 5.11, 5.12 i 5.13 su prikazani sinusoidalni oblici napona za izvod „TS Vjeternik", „TS Smokovac", kao i sinusoidalni oblik 20 kV – nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV za simulacije 2.1, 2.2 i 2.3, dok su u tabeli 5.10 prikazane vremenske karakteristike maksimalnog prenapona posmatranog izvoda „TS Vjeternik" čija je vrijednost dobijena u svim navedenim simulacijama.



Slika 5.11: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik“ (simulacije broj 2.1, 2.2 i 2.3)



Slika 5.12: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac“ (simulacije broj 2.1, 2.2 i 2.3)



Slika 5.13: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacije broj 2.1, 2.2 i 2.3)

Tabela 5. 10: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik“ – simulacije 2.1, 2.2 i 2.3

Broj simulacije	Amplituda prenapona (kV)	Amplituda prenapona (r.j.)	Strmina porasta napona (kV/ $\mu$ s)	Vrijeme čela talasa T1 (ms)	Vrijeme začelja talasa T2 (ms)	Vrijeme trajanja maksimuma Td (ms)	Vrijeme do prolaska kroz nulu T0 (ms)
2.1	30,311	1,86	0,0071	4,245	6,712	1,451	7,946
2.2							
2.3							

### 5.3.2.2 Slučaj rada VNRP – a pod opterećenjem

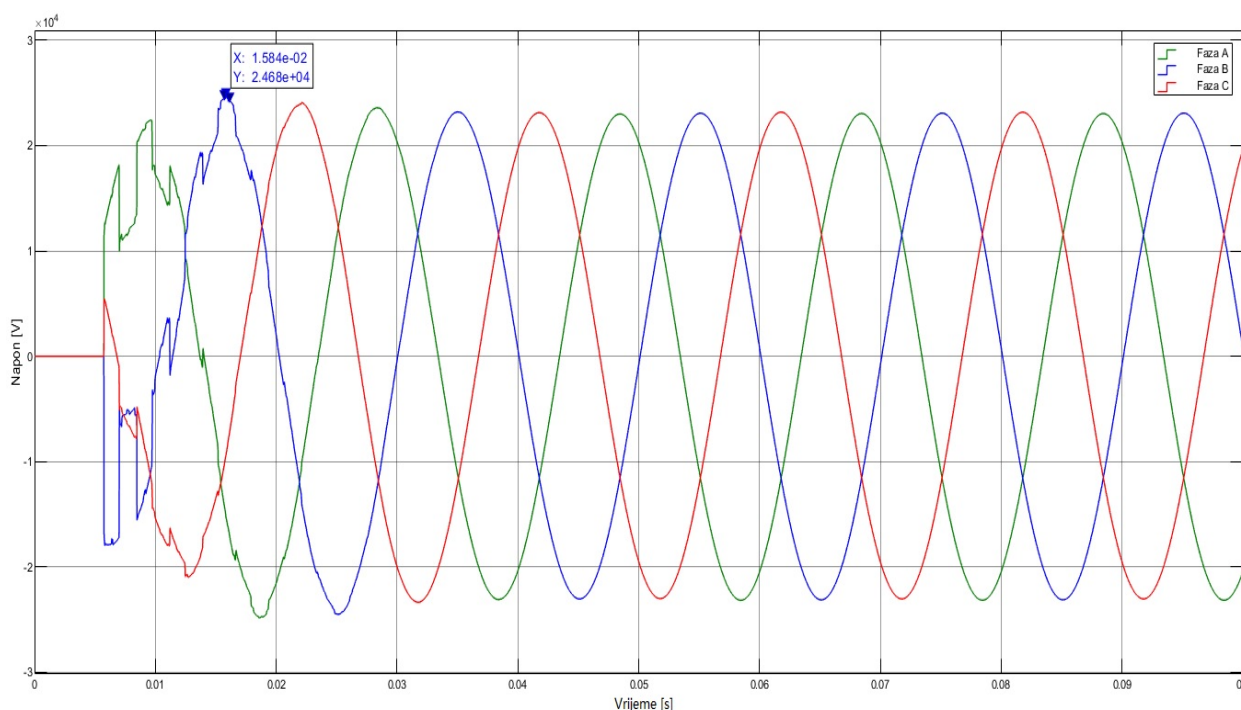
Za simulacije označene brojevima 4.1, 4.2 i 4.3 važi da su oba izvoda pod opterećenjem. Parametrizacija opterećenja je prikazana u tabeli 5.7. Vremena uklapanja prekidača izvoda „TS Vjeternik“ su ista kao i pri radu VNRP – a u praznom hodu, odnosno 5, 15 i 25 ms.

Prekidač TS Vjeternik:

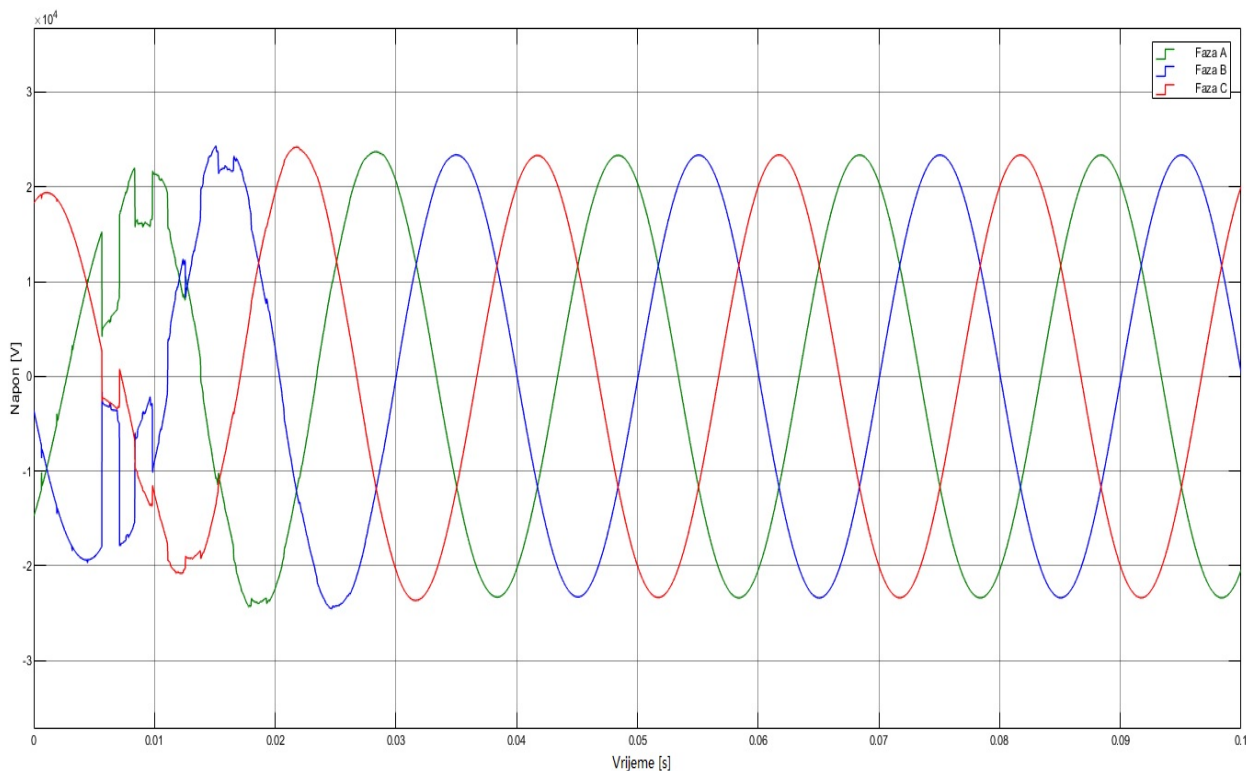
Initial status: open

Switching time: 5e-3; 15e-3; 25e-3 s.

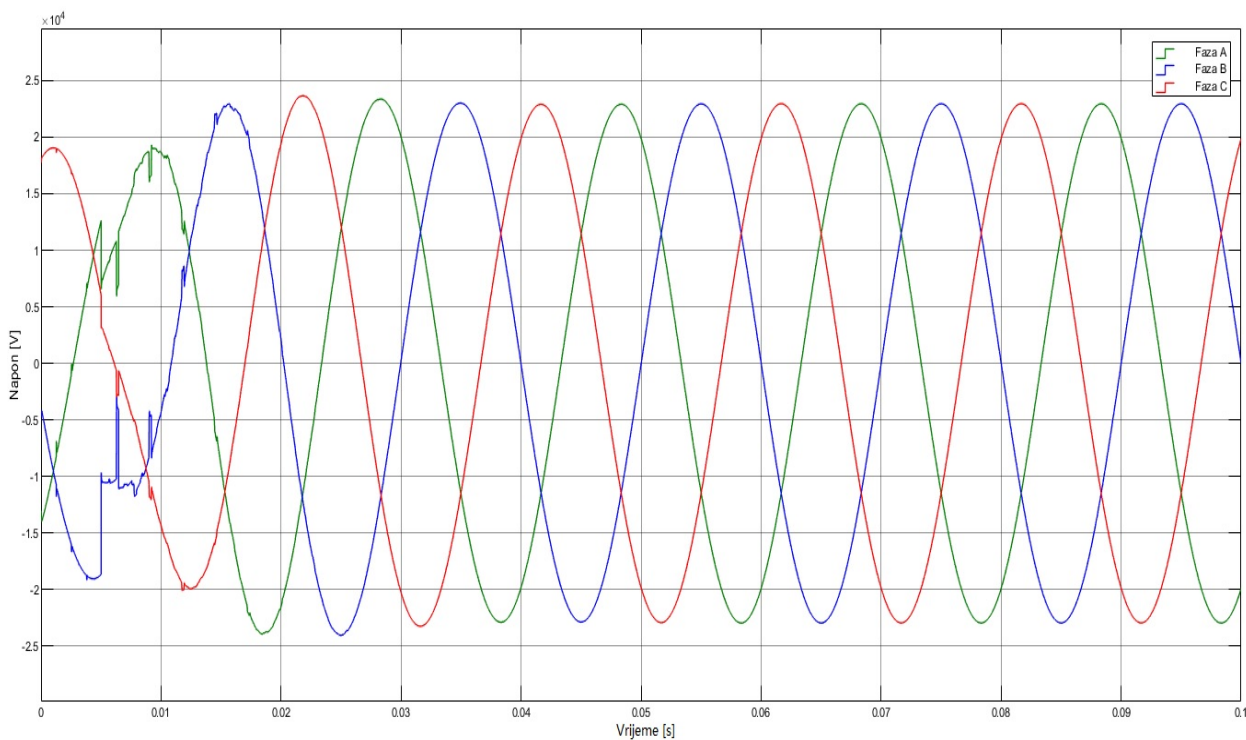
Dobijeni rezultati maksimalnog prenapona su isti za navedene simulacije, i njegove vremenske karakteristike prikazane su u tabeli 5.11, dok se na slikama 5.14, 5.15 i 5.16 mogu vidjeti sinusoidalni oblici napona oba izvoda i 20 kV – nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV.



Slika 5. 14: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik“ (simulacije broj 4.1, 4.2 i 4.3)



Slika 5. 15: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac” (simulacije broj 4.1, 4.2 i 4.3)



Slika 5. 16: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacije broj 4.1, 4.2 i 4.3)

Tabela 5. 11: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik“ – simulacije 4.1, 4.2 i 4.3

Broj simulacije	Amplituda prenapona (kV)	Amplituda prenapona (r.j.)	Strmina porasta napona (kV/ $\mu$ s)	Vrijeme čela talasa T1 (ms)	Vrijeme začelja talasa T2 (ms)	Vrijeme trajanja maksimuma Td (ms)	Vrijeme do prolaska kroz nulu T0 (ms)
4.1	24,682	1,51	0,0054	4,556	7,836	1,949	9,112
4.2							
4.3							

### 5.3.2.3 Slučaj rada VNRP – a pri neopterećenom izvodu „TS Smokovac“

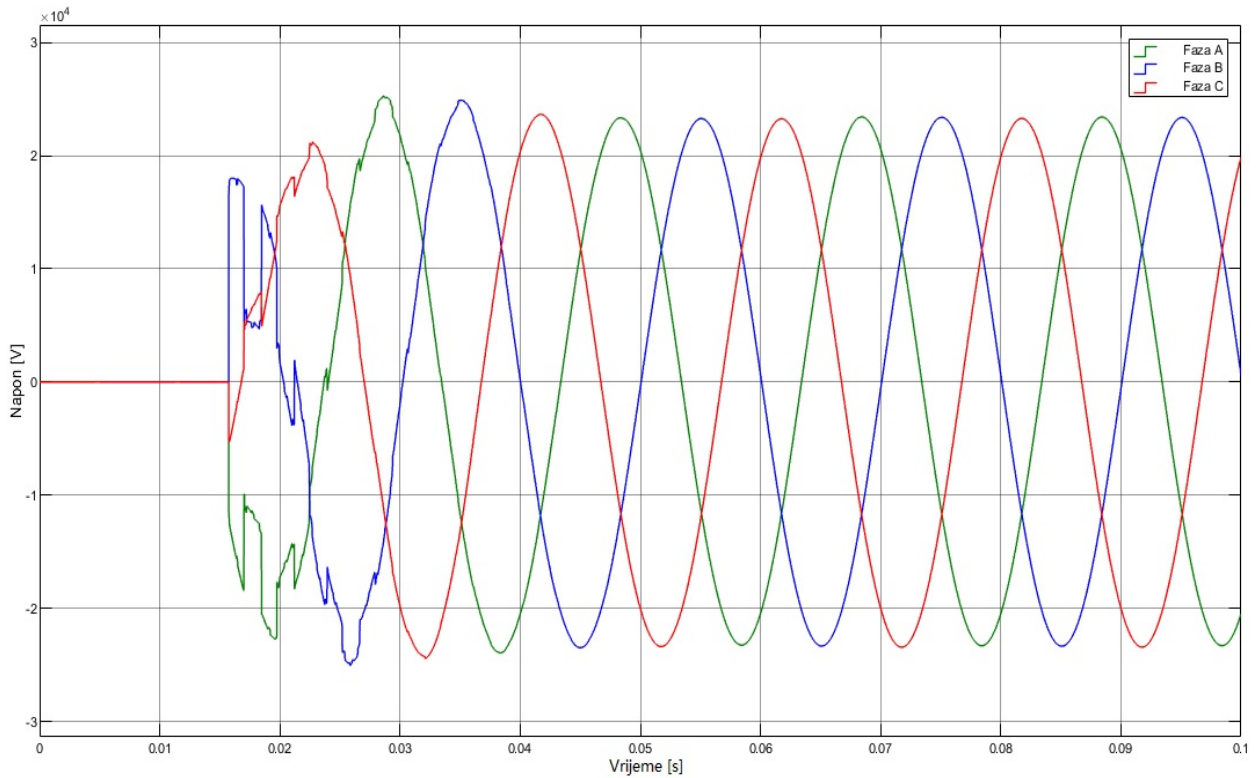
Simulacije broj 5.2 i 5.3 su vršene pri zatvorenom prekidaču izvoda „TS Smokovac“ na čijem kraju je uklonjeno opterećenje. Manipulacija prekidačem izvoda „TS Vjeternik“ se vrši pod opterećenim vodom. Parametrizacija elemenata je definisana u podpoglavlju 5.2. Uklapanje prekidača izvoda „TS Vjeternik“ se vrši nakon 5 i 15 ms, odnosno:

Prekidač TS Vjeternik:

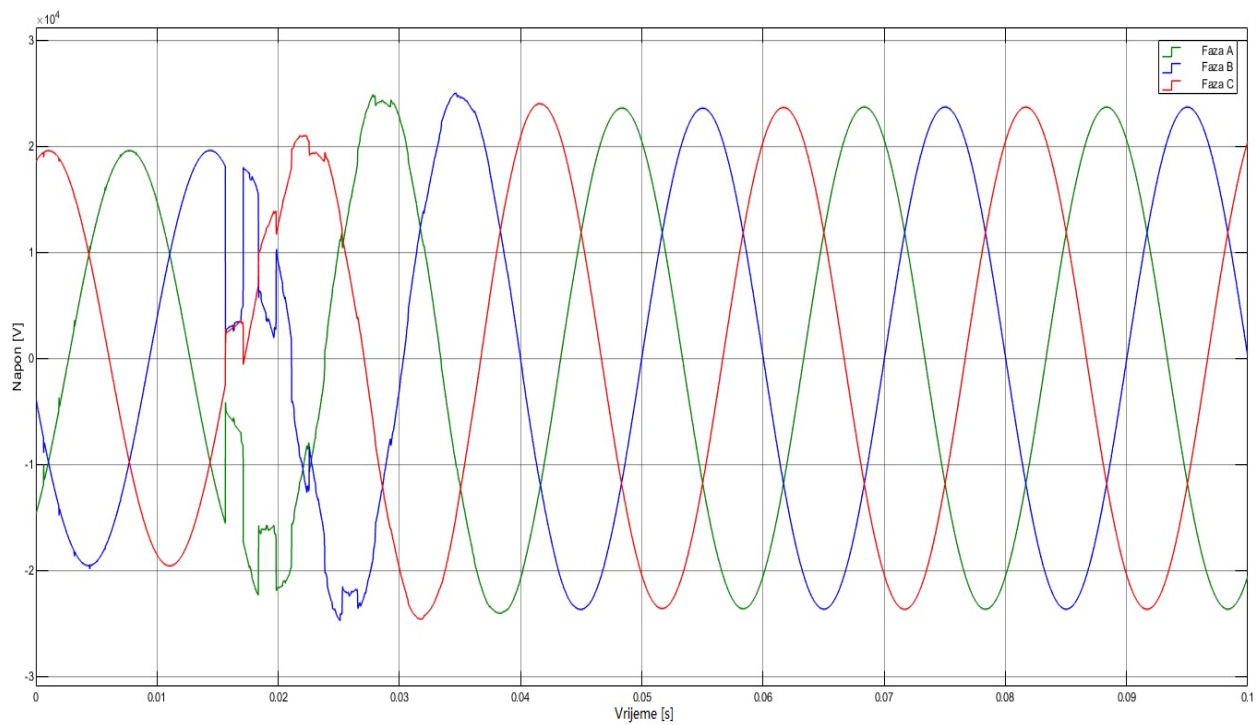
Initial status: open

Switching time: 5e-3; 15e-3 s.

Na slikama 5.17, 5.18 i 5.19 je prikazan sinusoidalni oblik napona za oba izvoda i 20 kV – nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV, dok su u tabeli 5.12 prikazane karakteristike maksimalnog napona, koji je isti za simulacije 5.2 i 5.3.

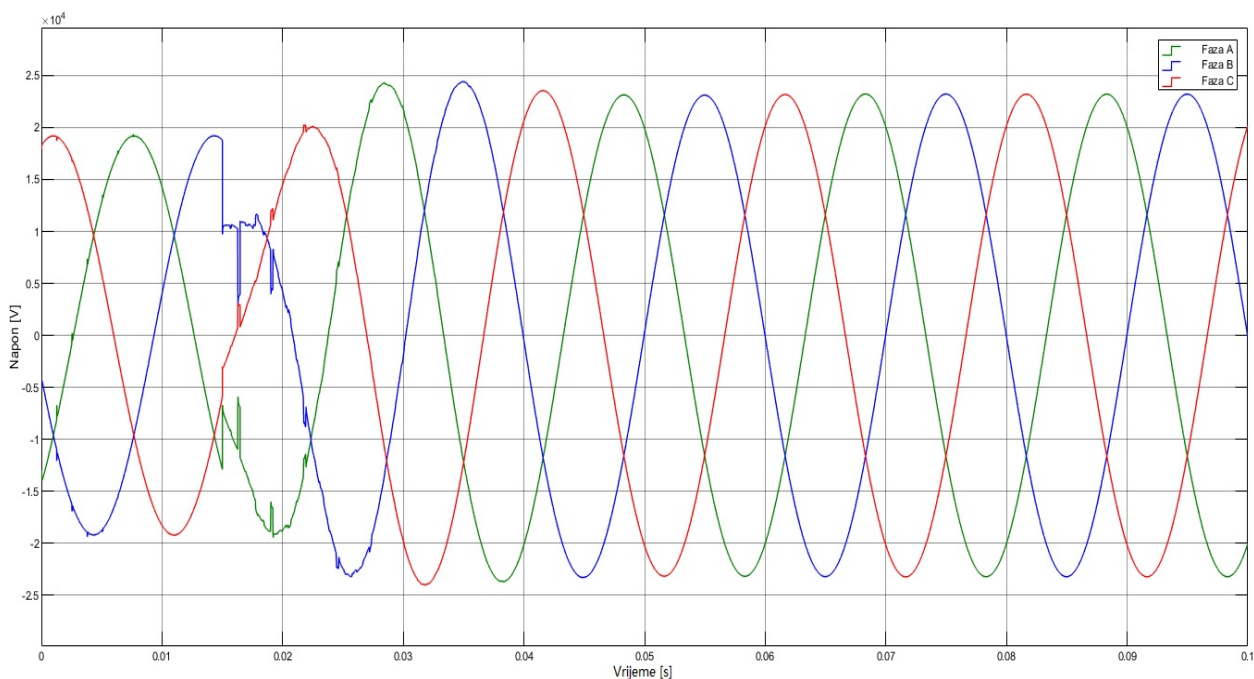


Slika 5. 17: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik“ (simulacije broj 5.2 i 5.3)



Slika 5. 18: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac“ (simulacije broj 5.2 i 5.3)





Slika 5. 19: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacije broj 5.2 i 5.3)

Tabela 5. 12.: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik“ – simulacije 5.2 i 5.3

Broj simulacije	Amplituda prenapona (kV)	Amplituda prenapona (r.j.)	Strmina porasta napona (kV/ $\mu$ s)	Vrijeme čela talasa T1 (ms)	Vrijeme začelja talasa T2 (ms)	Vrijeme trajanja maksimuma Td (ms)	Vrijeme do prolaska kroz nulu T0 (ms)
5.2	25,265	1,55	0,0055	4,549	7,810	1,896	9,430
5.3							

#### 5.3.2.4 Slučaj rada VNRP – a pri neopterećenom izvodu „TS Vjeternik“

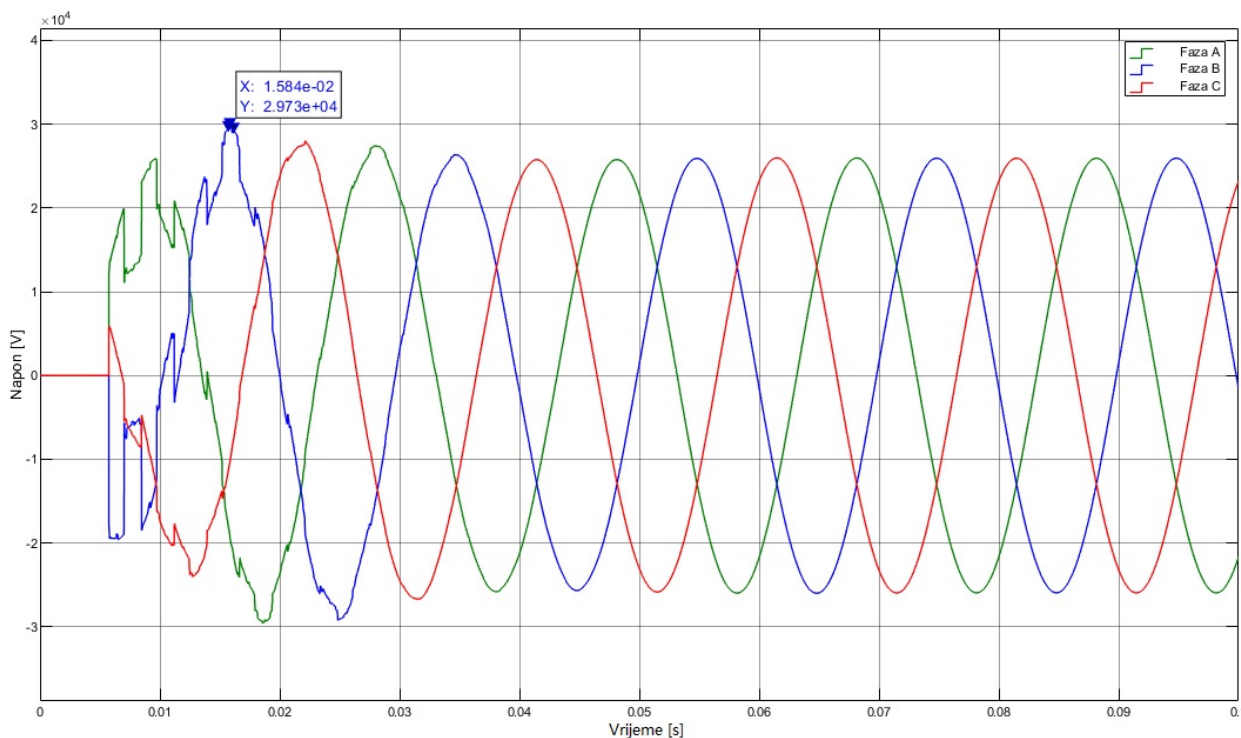
U simulacijama 6.2 i 6.3 izvod „TS Vjeternik“ je neopterećen, dok je izvod „TS Smokovac“ opterećen. Uklapanje prekidača izvoda „TS Vjeternik“ se vrši nakon 5 i 15 ms, odnosno:

Prekidač TS Vjeternik:

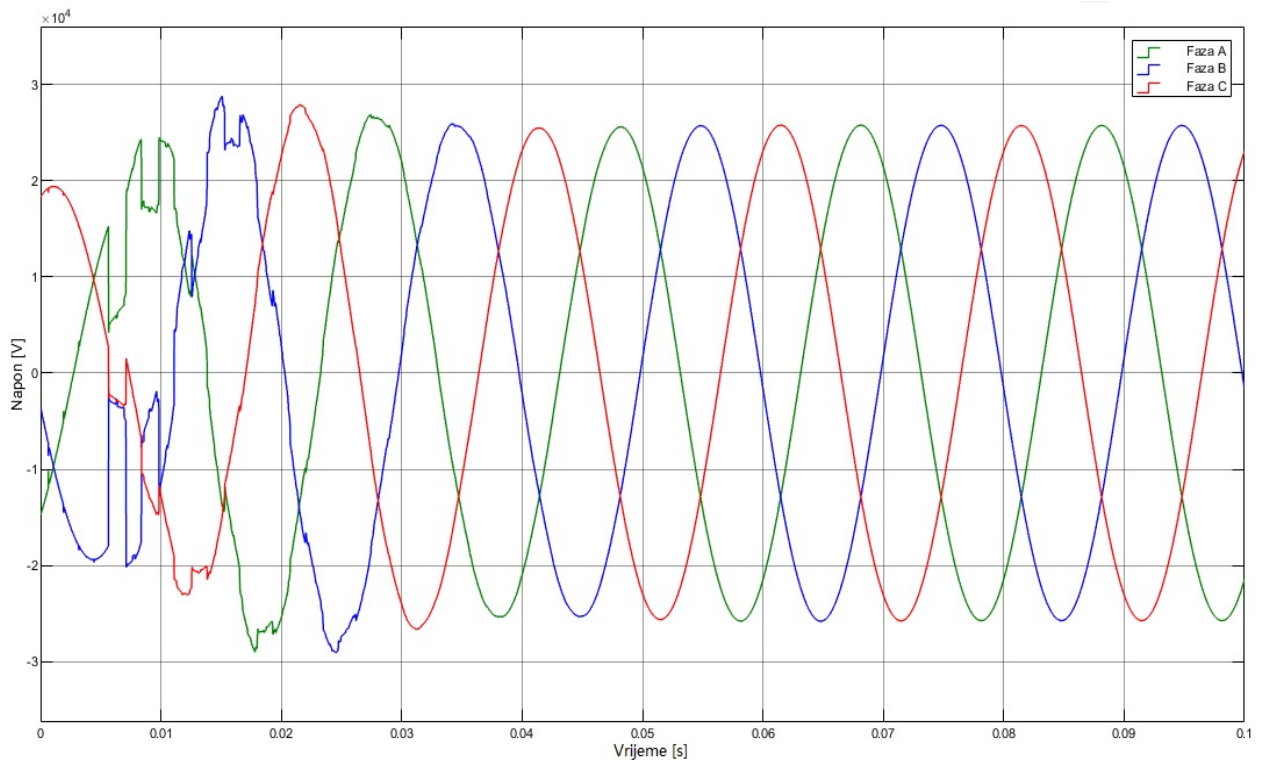
Initial status: open

Switching time: 5e-3; 15e-3 s.

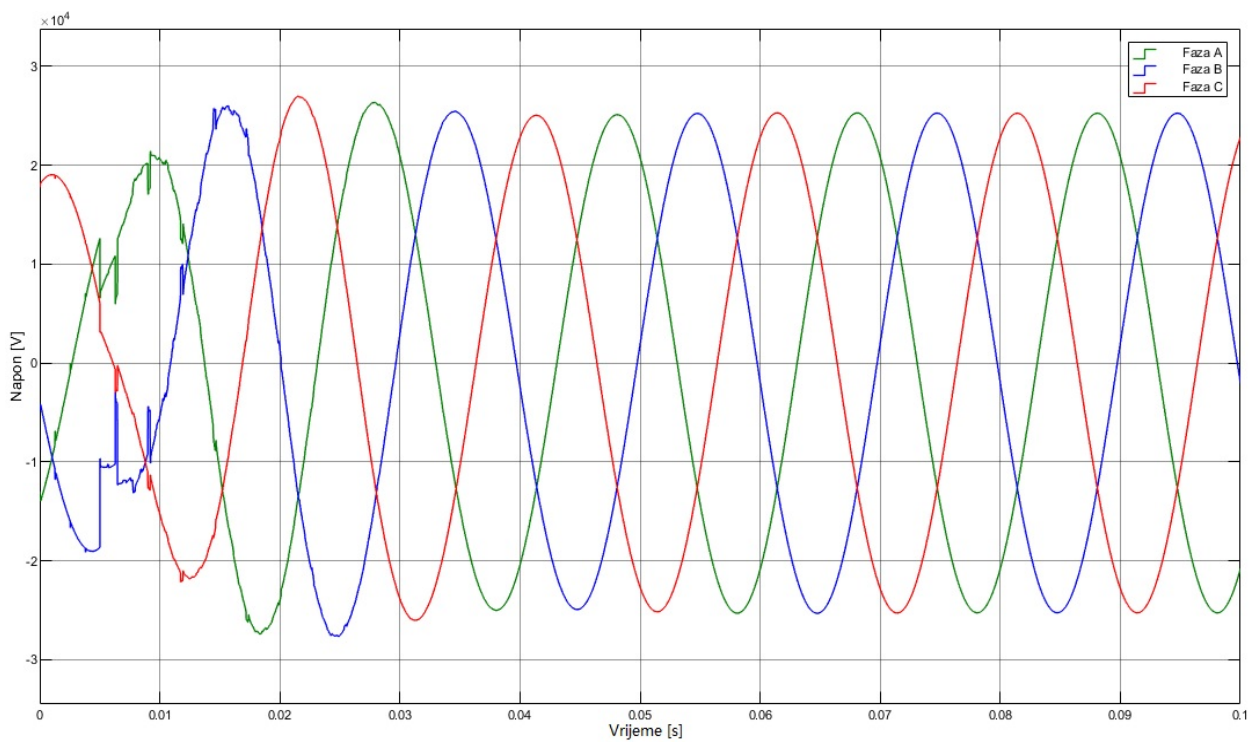
Na slikama 5.20, 5.21 i 5.22 je prikazan sinusoidalni oblik napona za oba izvoda i 20 kV – nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV, dok su u tabeli 5.13 prikazane karakteristike maksimalnog napona, koji je isti za simulacije 6.2 i 6.3.



Slika 5. 20: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik“ (simulacije broj 6.2 i 6.3)



Slika 5. 21: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac“ (simulacije broj 6.2 i 6.3)



Slika 5. 22: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacije broj 6.2 i 6.3)

Tabela 5. 13.: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik“ – simulacije 6.2 i 6.3

Broj simulacije	Amplituda prenapona (kV)	Amplituda prenapona (r.j.)	Strmina porasta napona (kV/ $\mu$ s)	Vrijeme čela talasa T1 (ms)	Vrijeme začelja talasa T2 (ms)	Vrijeme trajanja maksimuma Td (ms)	Vrijeme do prolaska kroz nulu T0 (ms)
6.2	29,731	1,82	0,0069	4,291	7,175	1,437	8,143
6.3							

### 5.3.3 Analiza uticaja manipulacije trofaznim prekidačem izvoda „TS Vjeternik“ na visinu i trajanje sklopnog prenapona pri zatvaranju prekidača izvoda „TS Smokovac“

Analiza uticaja manipulacije prekidačem izvoda „TS Vjeternik“ vršiće se za slučajeve kada se prekidač izvoda „TS Smokovac“ zatvara nakon 25 ms. Podešavanje prekidača „TS Smokovac“ se vrši na sljedeći način:

#### Prekidač TS Smokovac:

Initial status: open

Switching time: 25e-3 s

Za potrebe analize vršene su simulacije visokonaponskog razvodnog postrojenja u praznom hodu, pod opterećenjem, i kada je jedan od izvoda pod opterećenjem, a drugi izvod bez opterećenja. Parametrizacija elemenata postrojenja je prikazana u tabelama podpoglavlja 5.2.

#### 5.3.3.1 Slučaj rada VNRP – a u praznom hodu i zatvaranju prekidača oba izvoda

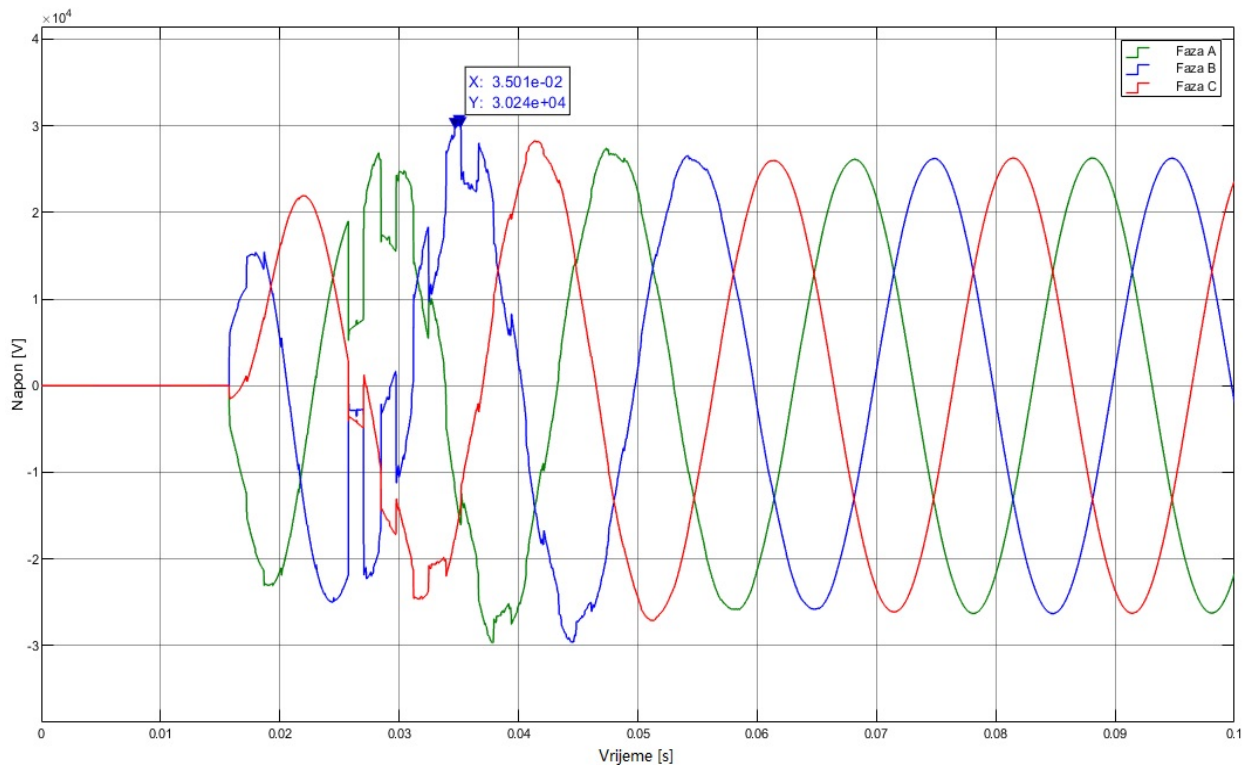
U simulaciji 1.4 VNRP radi u praznom hodu, tj oba izvoda su neopterećena. Uklapanje prekidača izvoda „TS Vjeternik“ se vrši nakon 15 ms, odnosno:

#### Prekidač TS Vjeternik:

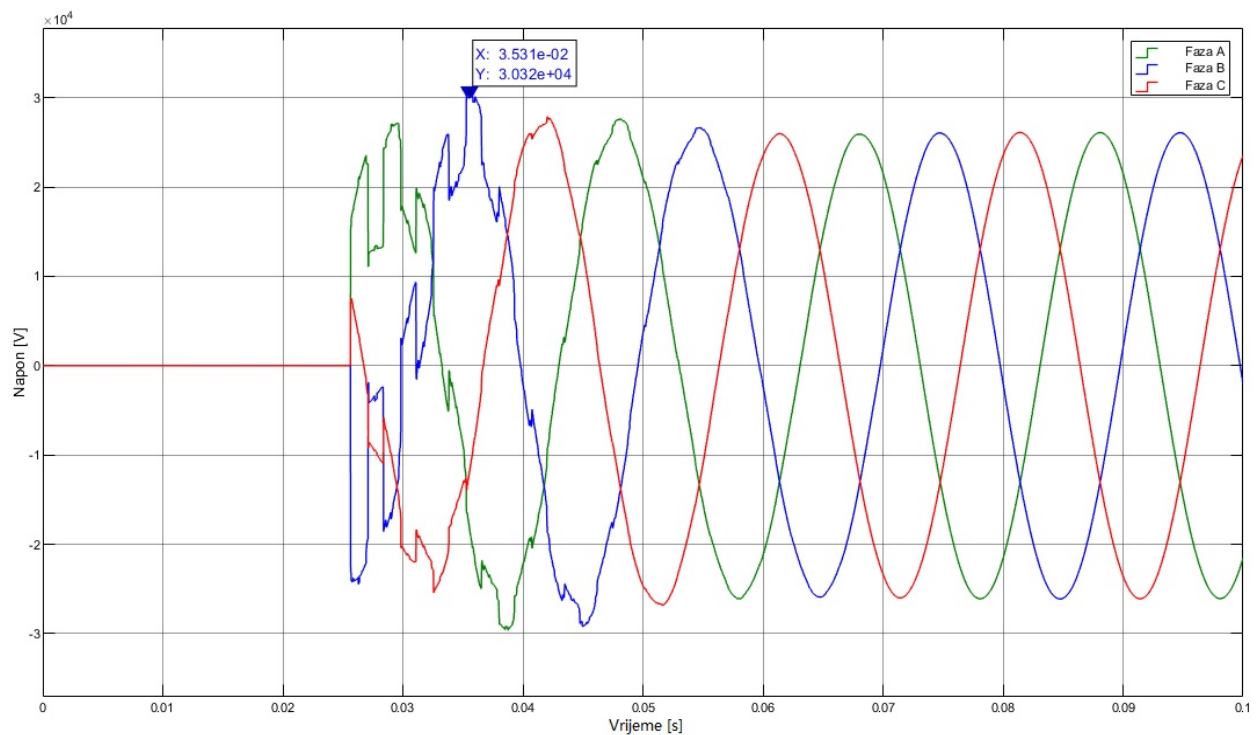
Initial status: open

Switching time: 15e-3 s.

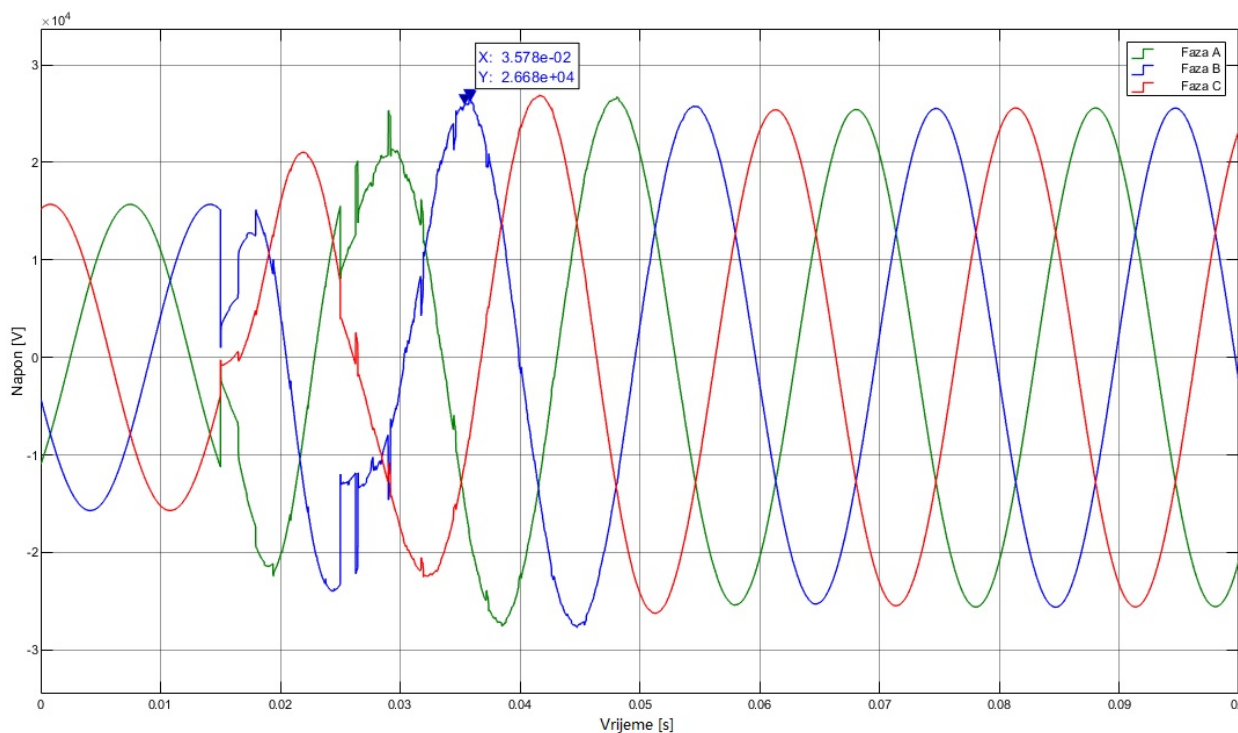
Na slikama 5.23, 5.24 i 5.25 je prikazan sinusoidalni oblik napona za oba izvoda i 20 kV – nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV, dok su u tabeli 5.14 prikazane karakteristike maksimalnog napona za navedeni slučaj.



Slika 5. 23: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik“ (simulacija broj 1.4)



Slika 5. 24: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac“ (simulacija broj 1.4)



Slika 5. 25: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacija broj 1.4)

Tabela 5. 14: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik” – simulacija 1.4

Broj simulacije	Amplituda prenapona (kV)	Amplituda prenapona (r.j.)	Strmina porasta napona (kV/ $\mu$ s)	Vrijeme čela talasa T1 (ms)	Vrijeme začelja talasa T2 (ms)	Vrijeme trajanja maksimuma Td (ms)	Vrijeme do prolaska kroz nulu T0 (ms)
1.4	30,237	1,85	0,0078	3,889	6,994	2,700	9,075

### 5.3.3.2 Slučaj rada VNRP – a pod opterećenjem i zatvaranju prekidača oba izvoda

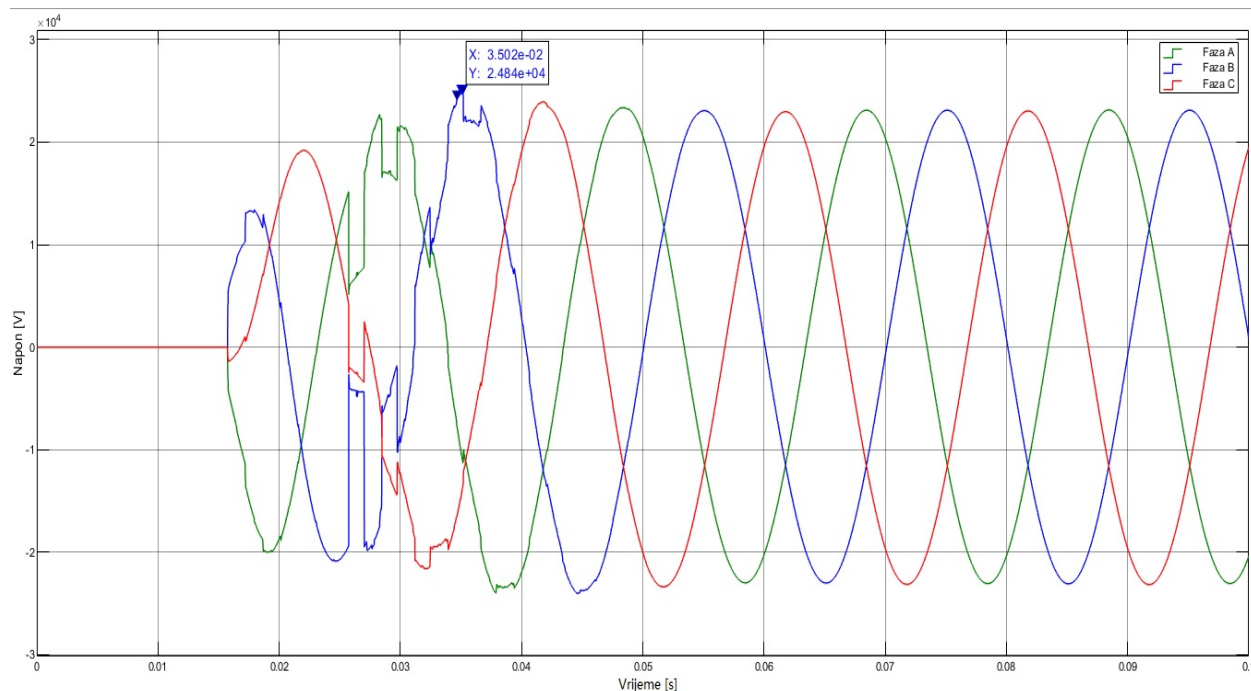
U simulaciji 3.4 VNRP radi pod opterećenjem tj na kraju oba izvoda je priključen trofazni potrošač čiji su parametri definisani u tabeli 5.7. Uklapanje prekidača izvoda „TS Vjeternik” se vrši nakon 15 ms, odnosno:

Prekidač TS Vjeternik:

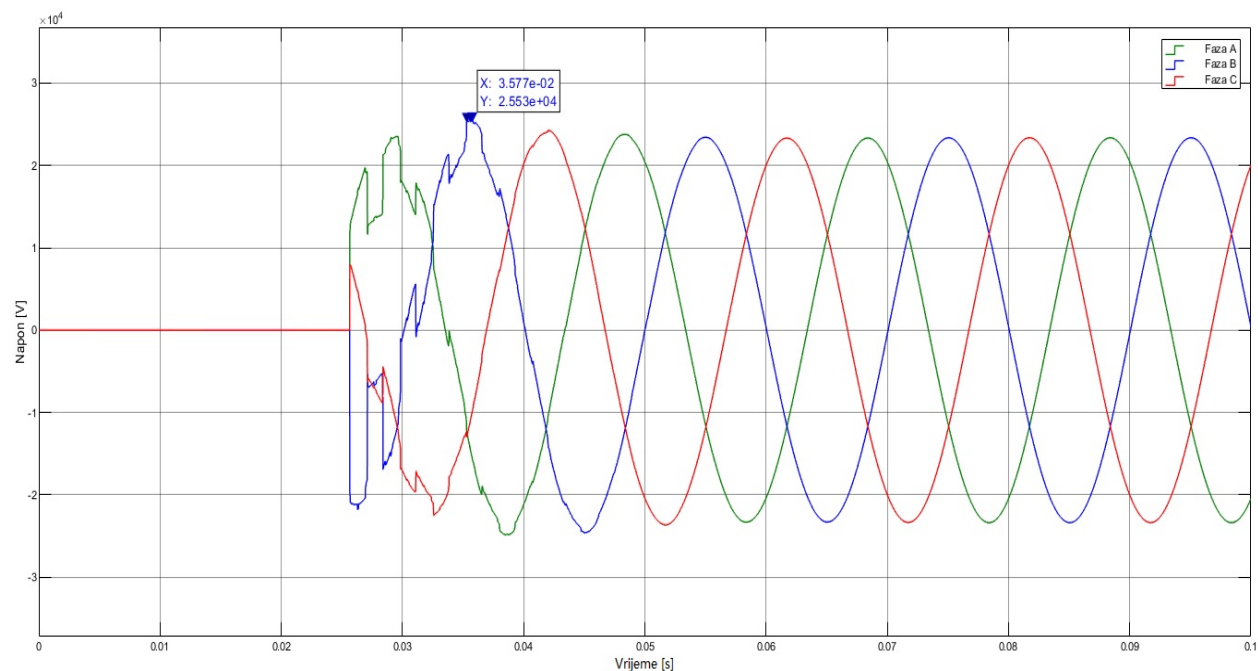
Initial status: open

Switching time:  $15e-3$  s.

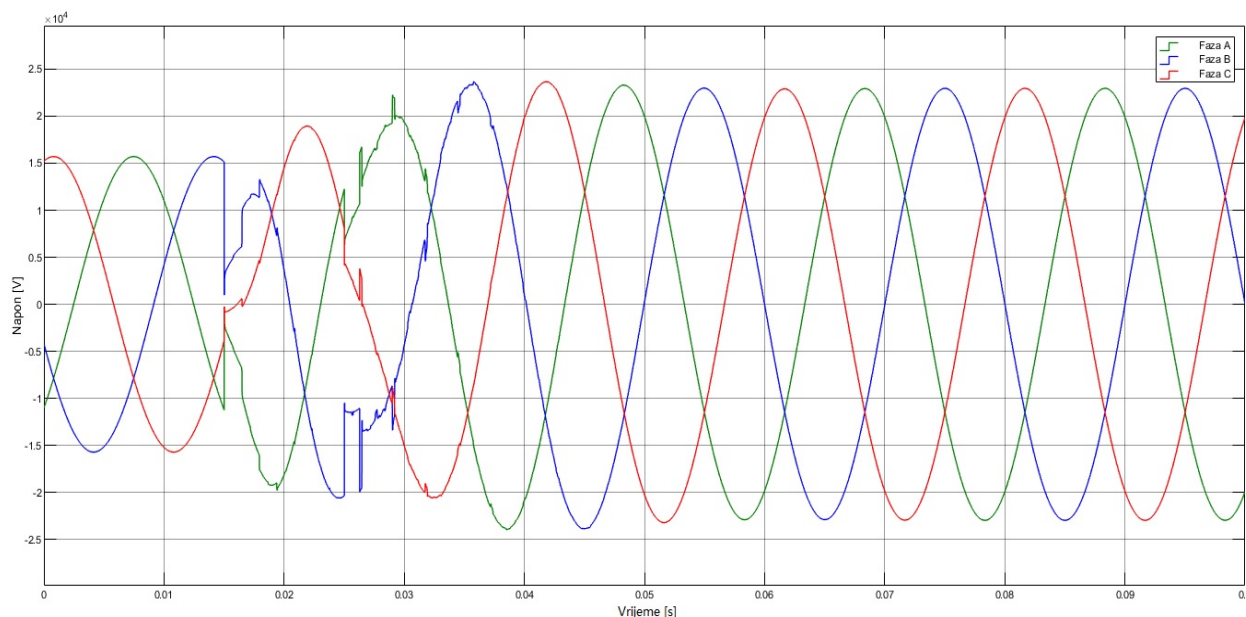
Na slikama 5.26, 5.27 i 5.28 je prikazan sinusoidalni oblik napona za oba izvoda i 20 kV – nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV, dok su u tabeli 5.15 prikazane karakteristike maksimalnog napona za navedeni slučaj.



Slika 5.26: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik“ (simulacija broj 3.4)



Slika 5.27: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac“ (simulacija broj 3.4)



Slika 5.28: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacija broj 3.4)

Tabela 5. 15: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik” – simulacija 3.4

Broj simulacije	Amplituda prenapona (kV)	Amplituda prenapona (r.j.)	Strmina porasta napona (kV/ $\mu$ s)	Vrijeme čela talasa T1 (ms)	Vrijeme začelja talasa T2 (ms)	Vrijeme trajanja maksimuma Td (ms)	Vrijeme do prolaska kroz nulu T0 (ms)
3.4	24,839	1,52	0,0064	3,880	7,351	2,900	9,168

### 5.3.3.3 Slučaj rada VNRP – a pri opterećenom izvodu „TS Vjeternik” u trenutku uklapanja prekidača oba izvoda

U simulaciji 5.1 VNRP radi pod opterećenim izvodom „TS Vjeternik”, dok je izvod „TS Smokovac” neopterećen. Parametri trofaznog opterećenja definisani su u tabeli 5.7. Uklapanje prekidača izvoda „TS Vjeternik” se vrši nakon 15 ms, odnosno:

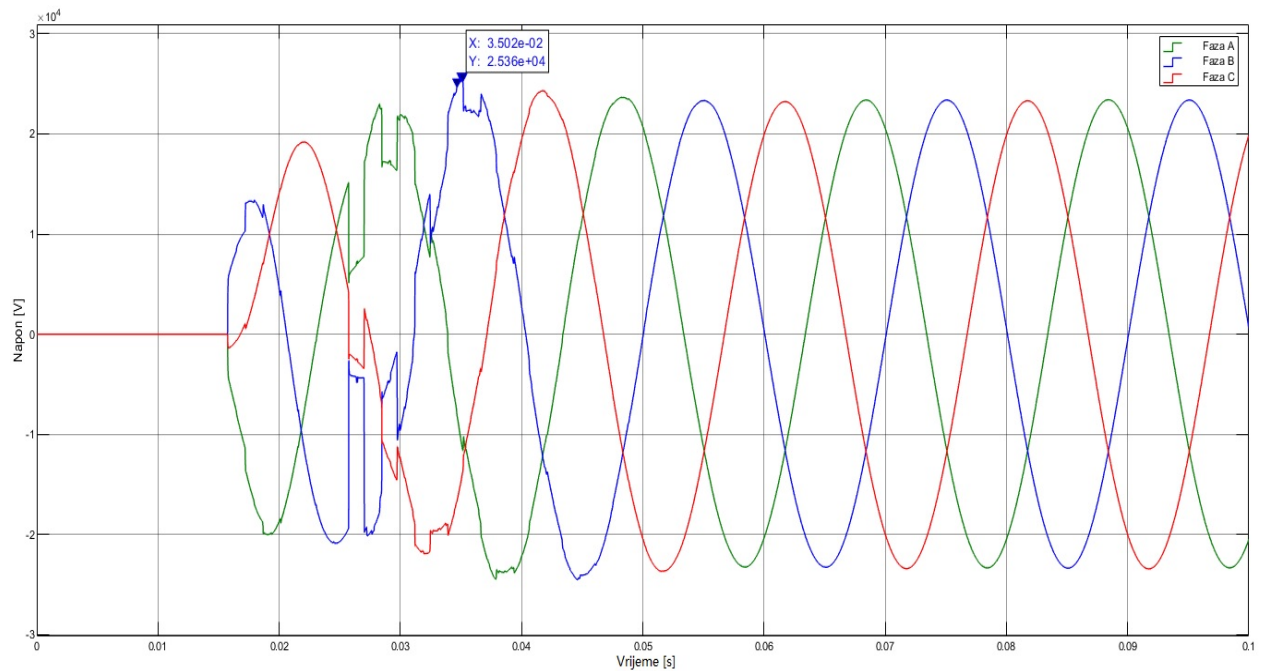
Prekidač TS Vjeternik:

Initial status: open

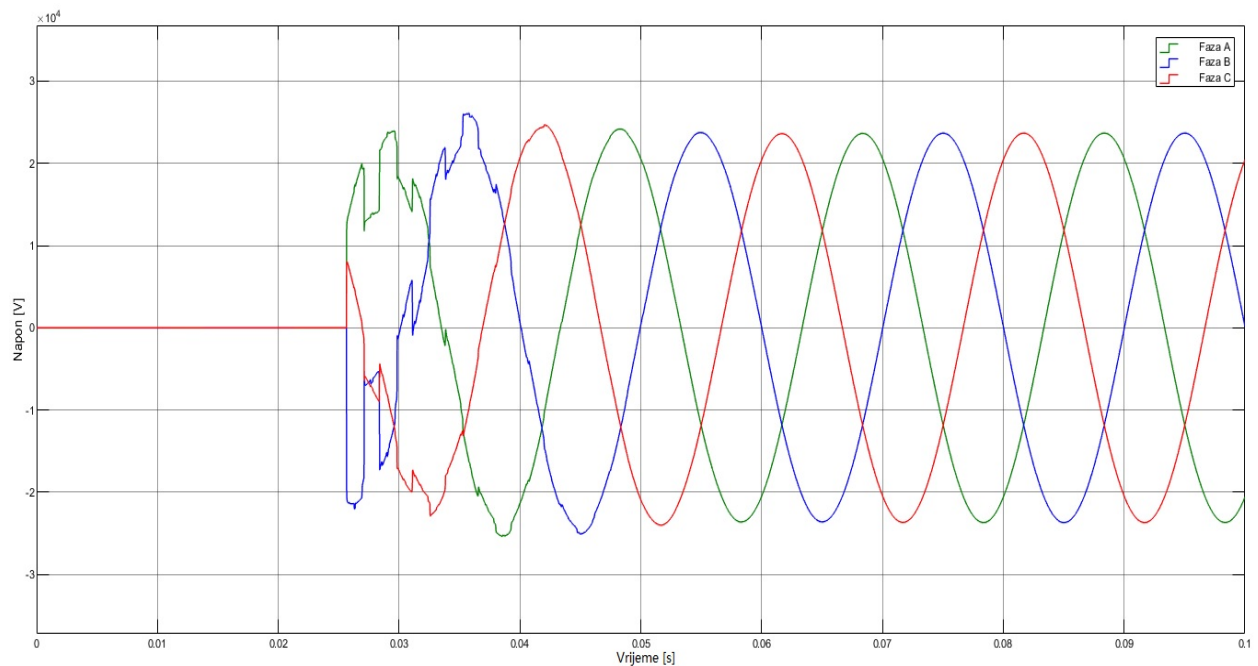
Switching time: 15e-3 s.



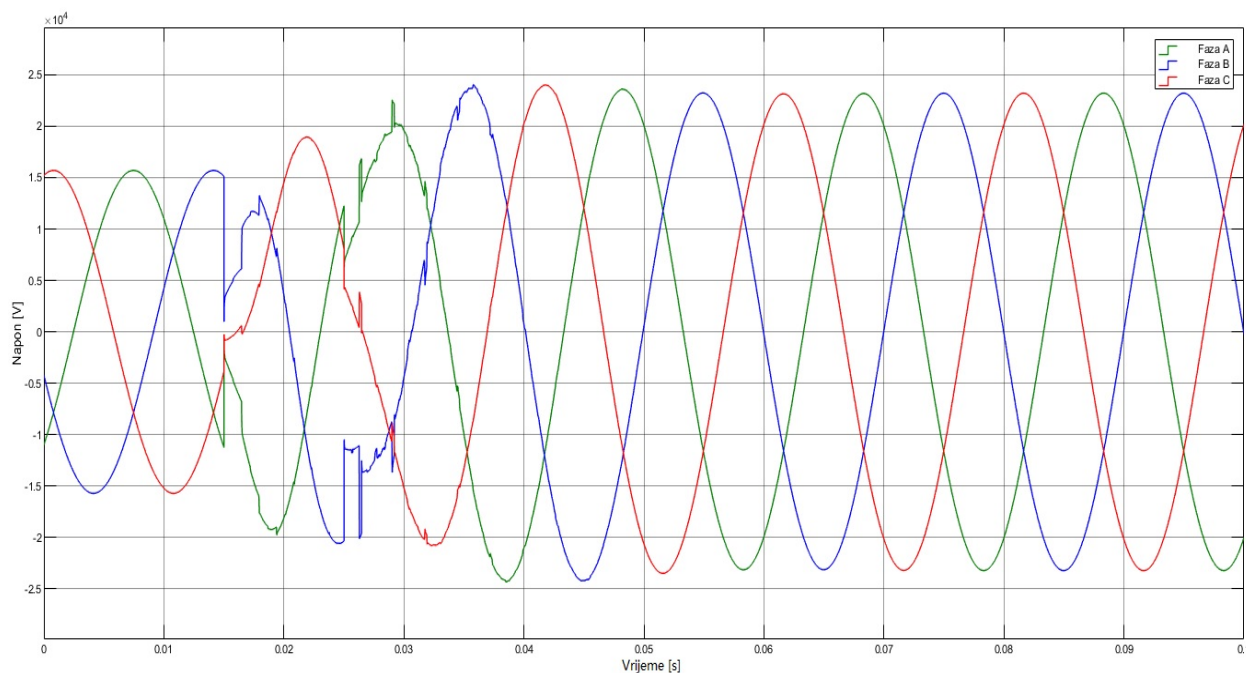
Na slikama 5.29, 5.30 i 5.31 je prikazan sinusoidalni oblik napona za oba izvoda i 20 kV – nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV, dok su u tabeli 5.16 prikazane karakteristike maksimalnog napona za navedeni slučaj.



*Slika 5.29: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik“ (simulacija broj 5.1)*



*Slika 5.30: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac“ (simulacija broj 5.1)*



Slika 5.31: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacija broj 5.1)

Tabela 5. 16: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik” – simulacija 5.1

Broj simulacije	Amplituda prenapona (kV)	Amplituda prenapona (r.j.)	Strmina porasta napona (kV/ $\mu$ s)	Vrijeme čela talasa T1 (ms)	Vrijeme začelja talasa T2 (ms)	Vrijeme trajanja maksimuma Td (ms)	Vrijeme do prolaska kroz nulu T0 (ms)
5.1	25,360	1,55	0,0065	3,888	7,369	2,843	9,168

#### 5.3.3.4 Slučaj rada VNRP – a pri opterećenom izvodu „TS Smokovac” u trenutku uklapanja prekidača oba izvoda

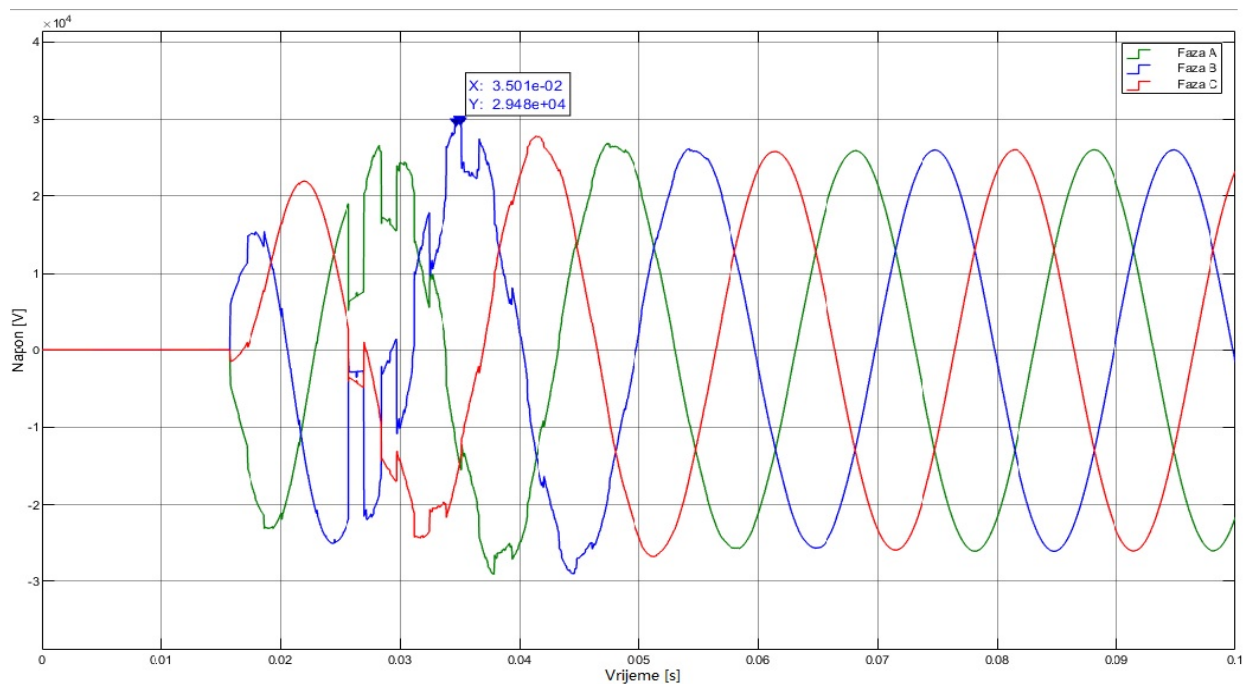
U simulaciji 6.1 VNRP radi pod opterećenim izvodom „TS Smokovac”, dok je izvod „TS Vjeternik” neopterećen. Parametri trofaznog opterećenja definisani su u tabeli 5.7. Uklapanje prekidača izvoda „TS Vjeternik” se vrši nakon 15 ms, odnosno:

Prekidač TS Vjeternik:

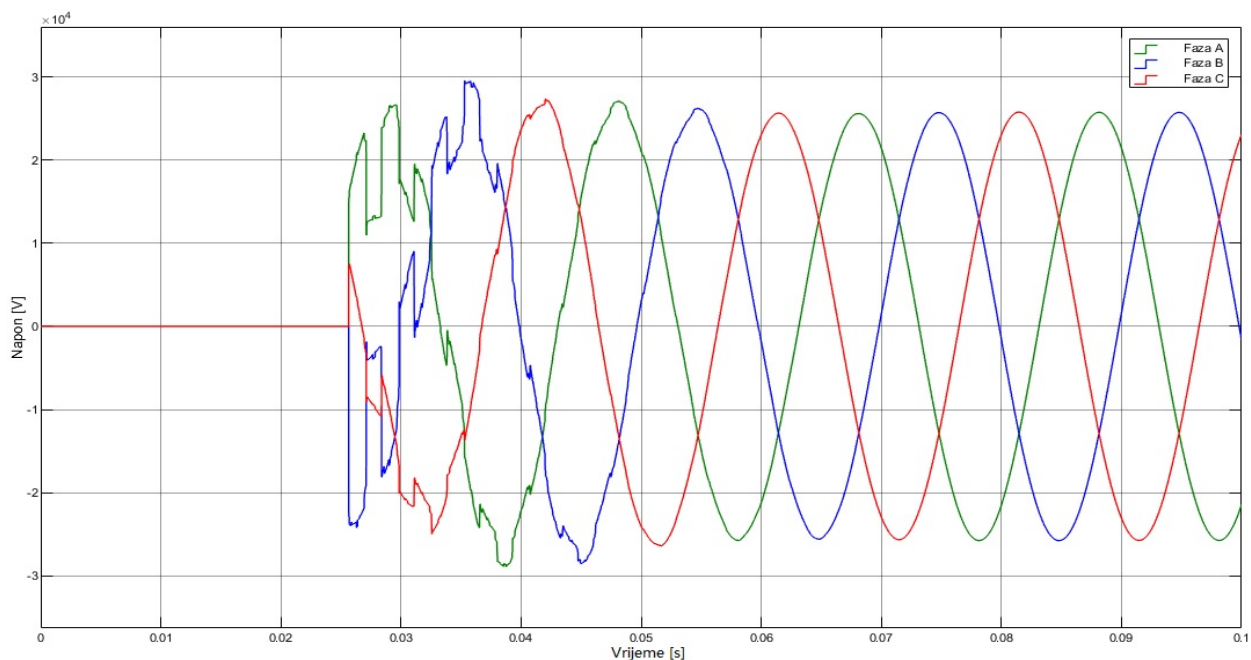
Initial status: open

Switching time: 15e-3 s.

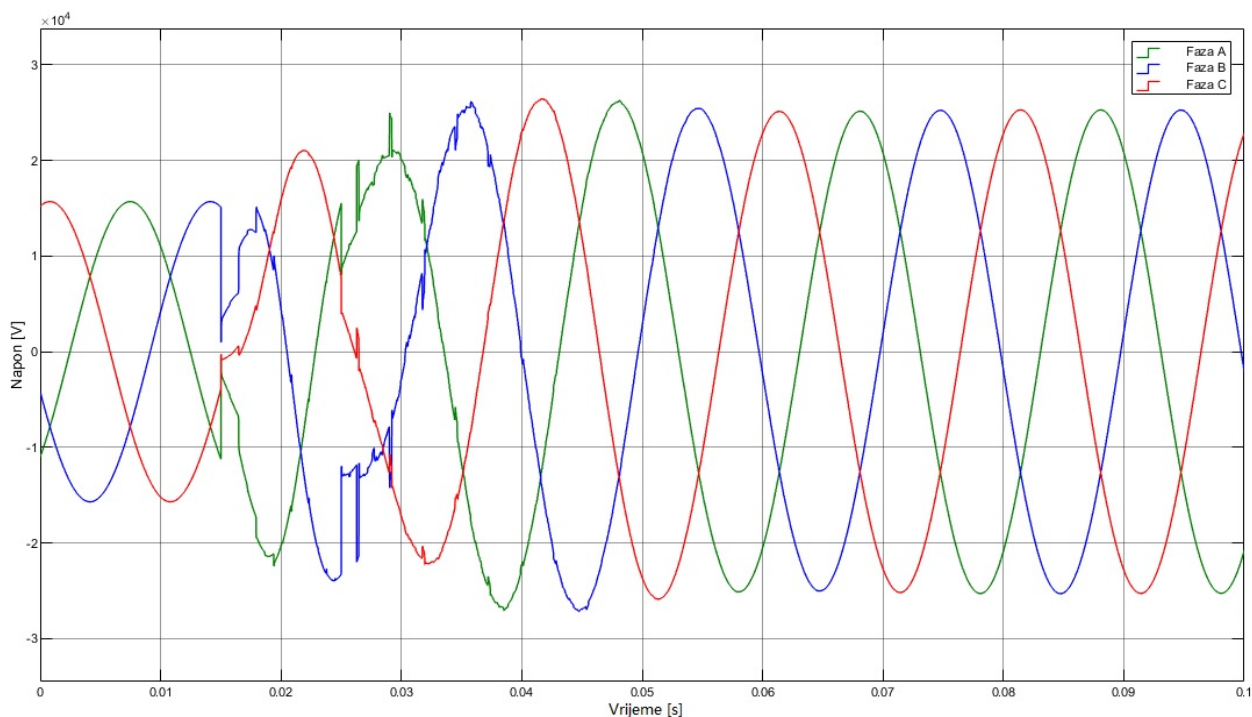
Na slikama 5.32, 5.33 i 5.34 je prikazan sinusoidalni oblik napona za oba izvoda i 20 kV – nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV, dok su u tabeli 5.17 prikazane karakteristike maksimalnog napona za navedeni slučaj.



Slika 5. 32: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik“ (simulacija broj 6.1)



Slika 5. 33: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac“ (simulacija broj 6.1)



Slika 5.34: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacija broj 6.1)

Tabela 5. 17: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik” – simulacija 6.1

Broj simulacije	Amplituda prenapona (kV)	Amplituda prenapona (r.j.)	Strmina porasta napona (kV/ $\mu$ s)	Vrijeme čela talasa T1 (ms)	Vrijeme začelja talasa T2 (ms)	Vrijeme trajanja maksimuma Td (ms)	Vrijeme do prolaska kroz nulu T0 (ms)
6.1	29,484	1,81	0,0076	3,888	7,015	1,112	9,112

## 5.4 Simulacije VN postrojenja „Autoput 1 - Mrke” pri zaostalom naponu

Posmatra se 20 kV – ni izvod „TS Vjeternik”, na kom se dogodi jednofazni kratki spoj (slika 5.51). Analizirani su slučajevi kada je kvar neprolaznog i prolaznog karaktera. Kada se u modelu vrše simulacije za neprolazni i prolazni kvar, prekidač izvoda „TS Smokovac” i posmatranog izvoda „TS Vjeternik” su podešeni na sljedeći način:

### Prekidač TS Smokovac:

Initial status: open or close

Switching time: 10 s

## 1. Neprolazni kvar

### Prekidač TS Vjeternik:

Initial status: close

Switching time:  $15e-3 + 0.14$  s

### Prekidač TS Smokovac:

Initial status: open or close

Switching time: 10 s

## 2. Prolazni kvar

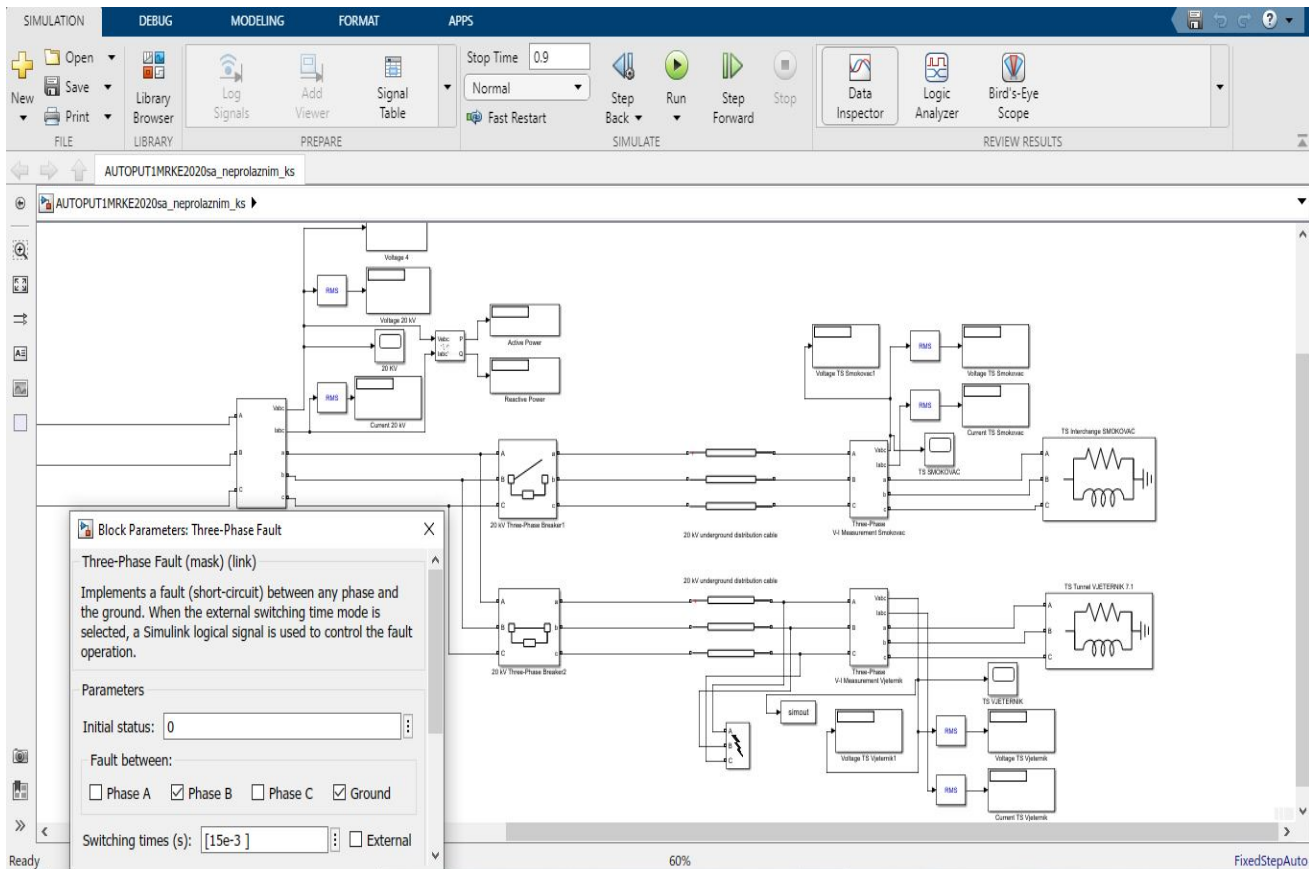
### Prekidač TS Vjeternik:

Initial status: close

Switching time: [ $15e-3 + 0.14$ ;  $15e-3 + 0.7$ ] s

Osim podešenja prekidača, shodno tome da li se radi simulacija za neprolazni ili prolazni kvar, kao i podešenja parametara bloka „Fault“, izvršena su podešavanja opterećenja na 20 kV-nim izvodima. Parametrizacija bloka „Fault“ prikazana je na slici 2.26. Jednofazni kratki spoj je simuliran između faze B i zemlje. S hodno tome, imamo 4 posmatrane situacije: oba izvoda opterećena, izvod „TS Smokovac“ neopterećen, izvod „TS Vjeternik“ neopterećen i prazan hod.

Nakon testiranja simulacija dobijene su 6 karakterističnih vrijednosti maksimalnih prenapona, koje su u nastavku prikazane grafički i tabelarno.

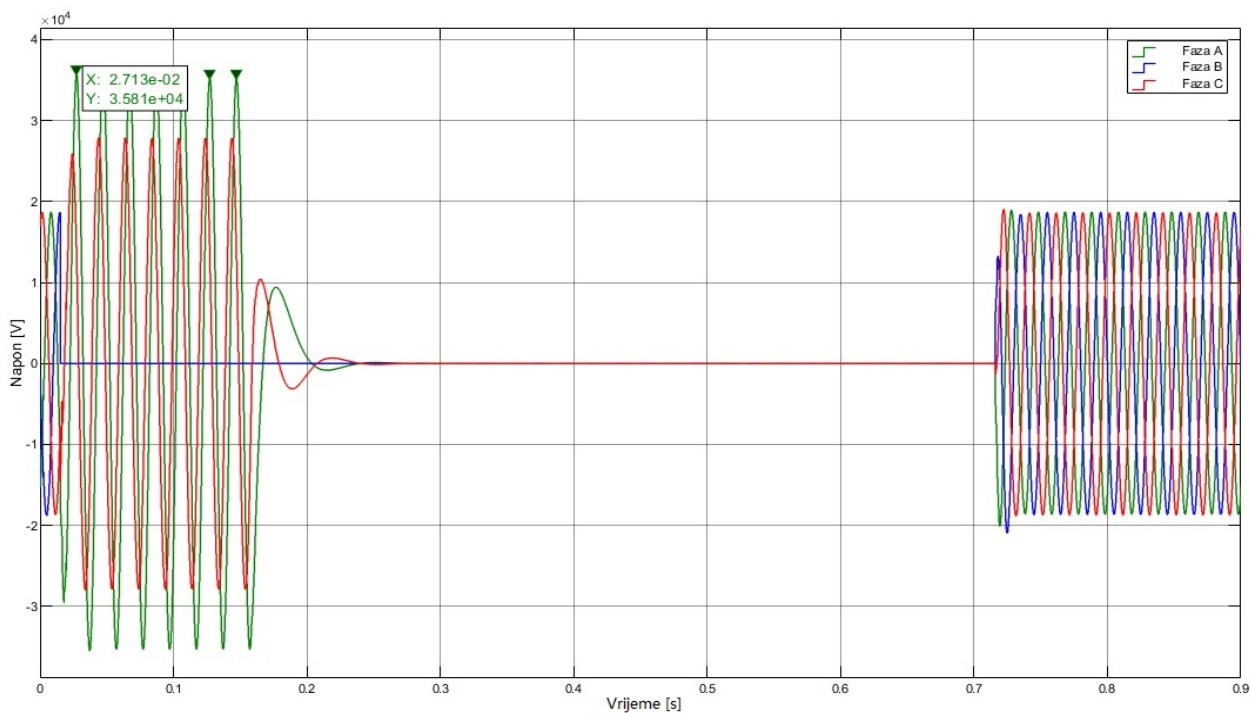


Slika 5.35: Model VN postrojenja „Autoput 1 – Mrke” – Simulink; zaostali napon

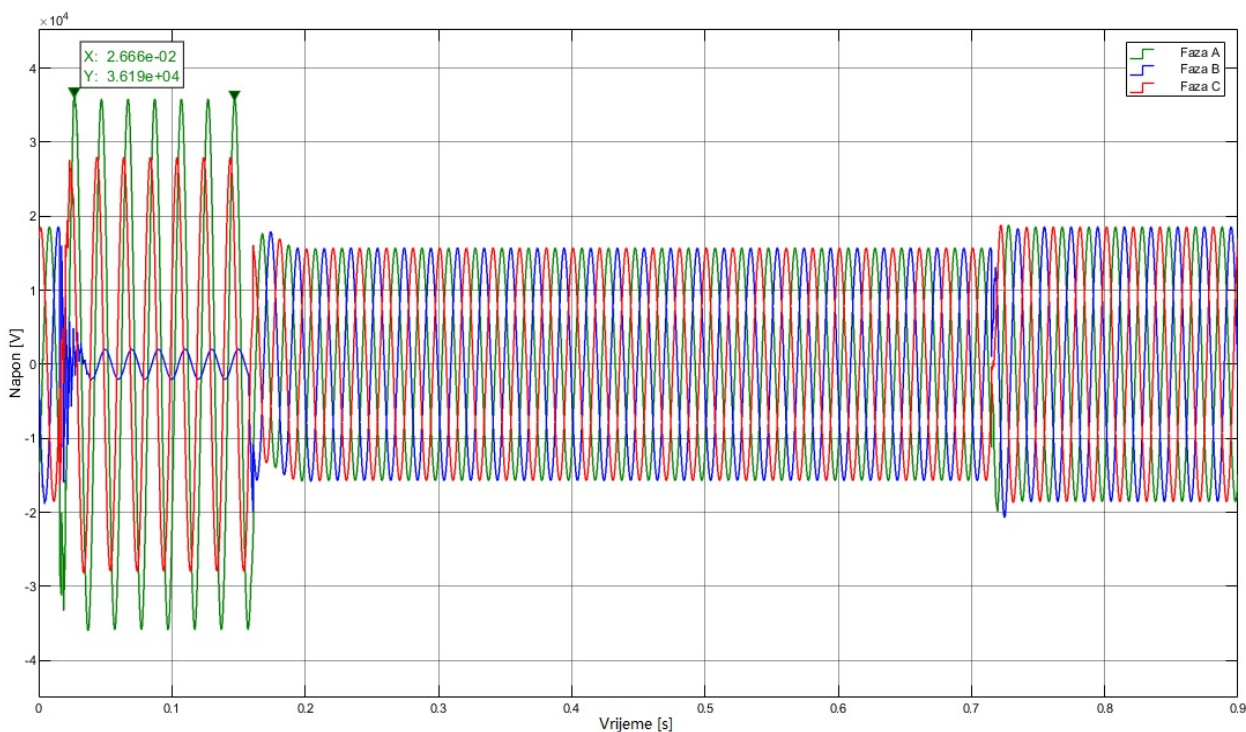
#### 5.4.1 Slučaj rada VNRP – a pod opterećenjem pri neprolaznom i prolaznom kvaru na izvodu „TS Vjeternik” i otvorenom prekidaču izvoda „TS Smokovac”

Za simulacije označene brojevima 7.1 i 7.2 važi da su oba izvoda VN postrojenja „Autoput 1 – Mrke” pod opterećenjem. Simulacija pod brojem 7.1 označava situaciju kada se na izvodu „TS Vjeternik” javlja neprolazni kvar, dok je simulacija 7.2 sa prolaznim kvarom. Prekidač izvoda „TS Smokovac” je tokom trajanja simulacije otvoren (10 sekundi).

Na slikama 5.36 i 5.37 je prikazan sinusoidalni oblik napona izvoda „TS Vjeternik” i 20 kV – nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV, dok su u tabeli 5.18 prikazane karakteristike maksimalnog napona, koji je isti za simulacije 7.1 i 7.2.



Slika 5.36: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik“ (simulacije broj 7.1 i 7.2)



Slika 5. 37: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacije broj 7.1 i 7.2)

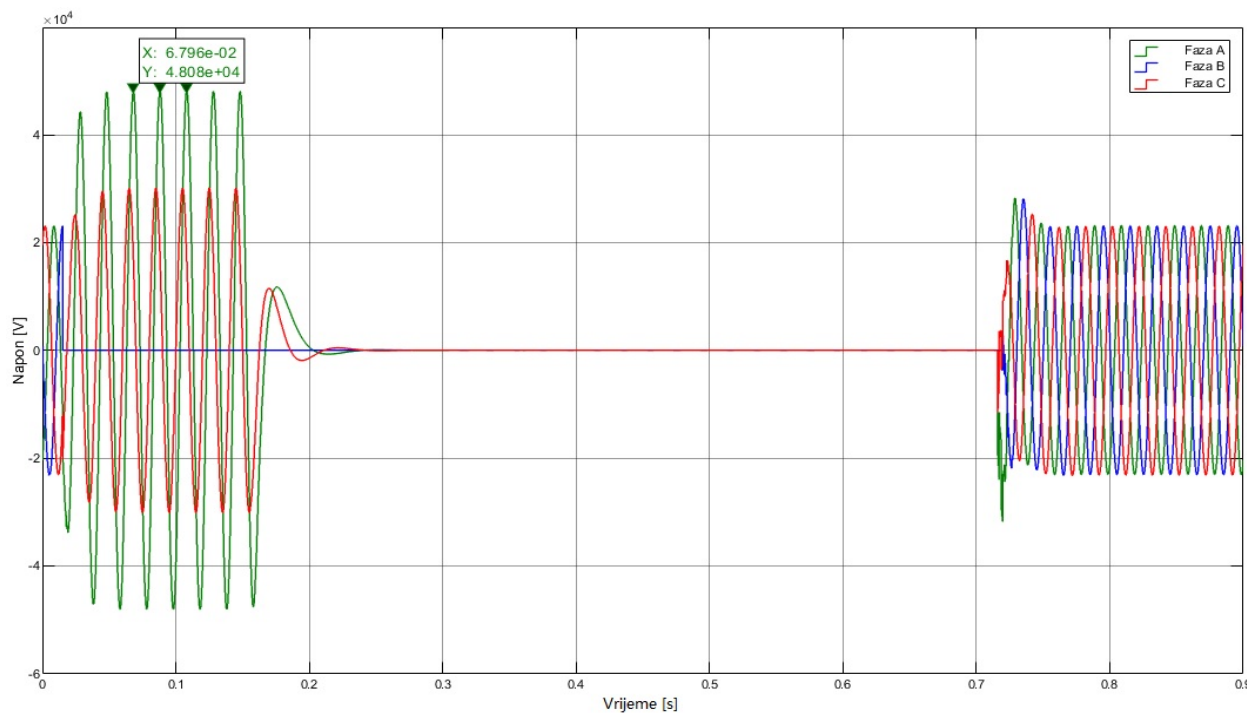
Tabela 5. 18: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik“ – simulacije 7.1 i 7.2

Broj simulacije	Amplituda prenapona (kV)	Amplituda prenapona (r.j.)	Strmina porasta napona (kV/ $\mu$ s)	Vrijeme čela talasa T1 (ms)	Vrijeme začetja talasa T2 (ms)	Vrijeme trajanja maksimuma Td (ms)	Vrijeme do prolaska kroz nulu T0 (ms)
7.1	38,805	2,38	0,008	4,810	8,113	2,695	9,408
7.2							

#### 5.4.2 Slučaj rada VNRP – a pod opterećenjem pri neprolaznom i prolaznom kvaru na izvodu „TS Vjeternik“ i zatvorenom prekidaču izvoda „TS Smokovac“

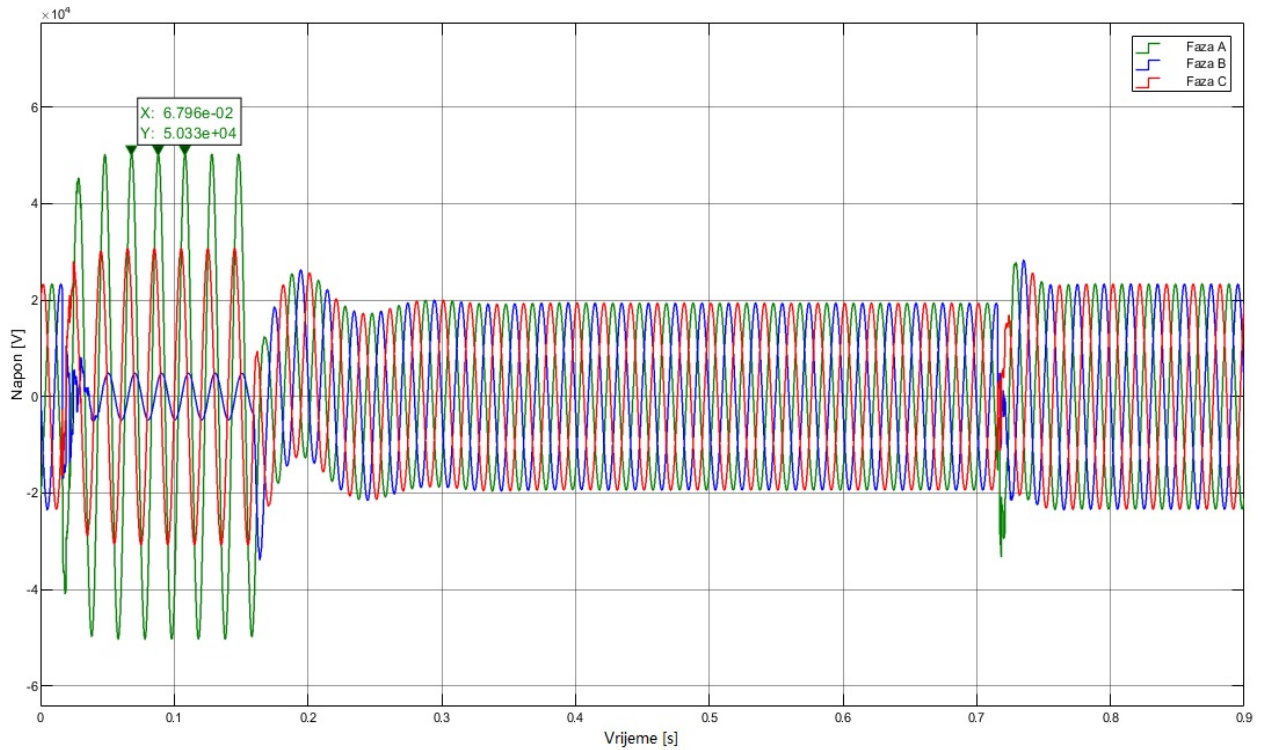
Za simulacije označene brojevima 7.3 i 7.4 važi da su oba izvoda VN postrojenja „Autoput 1 – Mrke“ pod opterećenjem. Simulacija pod brojem 7.3 označava situaciju kada se na izvodu „TS Vjeternik“ javlja neprolazni kvar, dok je simulacija 7.4 sa prolaznim kvarom. Prekidač izvoda „TS Smokovac“ je tokom trajanja simulacije zatvoren (10 sekundi).

Na slikama 5.38, 5.39 i 5.40 je prikazan sinusoidalni oblik napona oba izvoda i 20 kV – nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV, dok su u tabeli 5.19 prikazane karakteristike maksimalnog napona, koji je isti za simulacije 7.3 i 7.4.

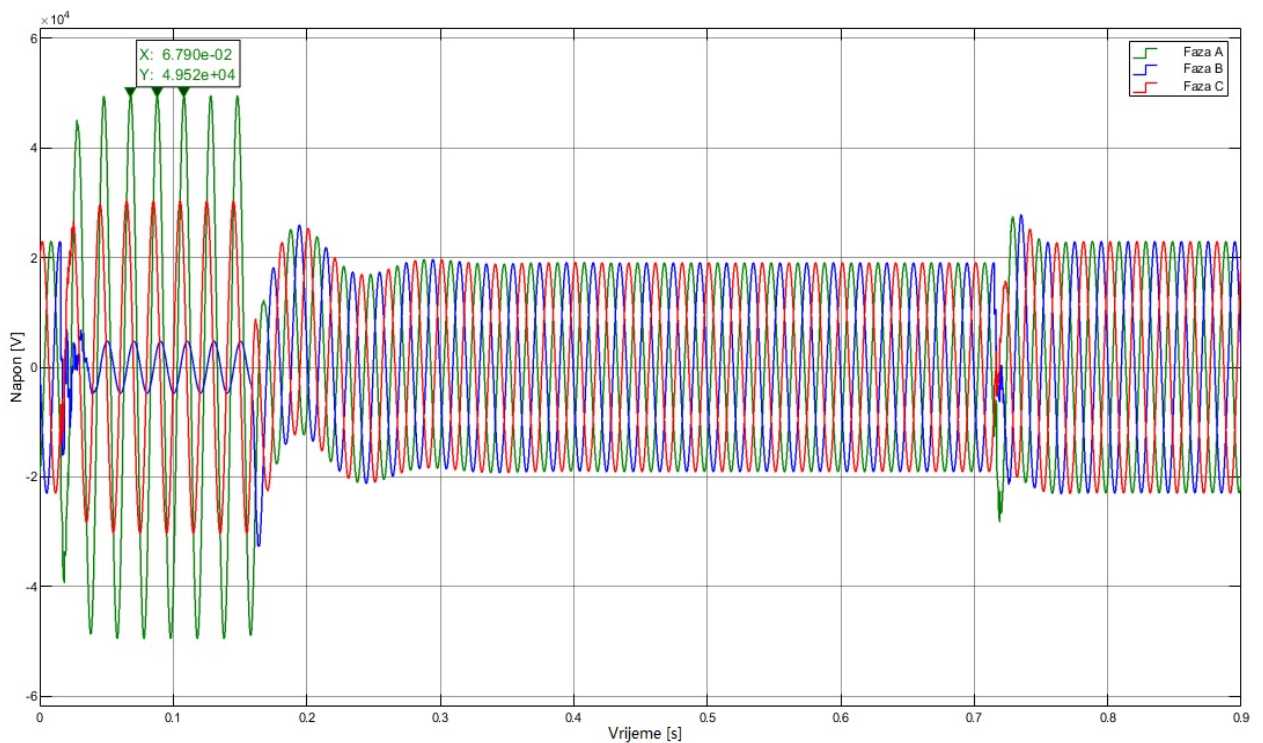


Slika 5.38: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik“ (simulacija broj 7.4)





Slika 5.39: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac“ (simulacija broj 7.4)



Slika 5.40: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacija 7.4)

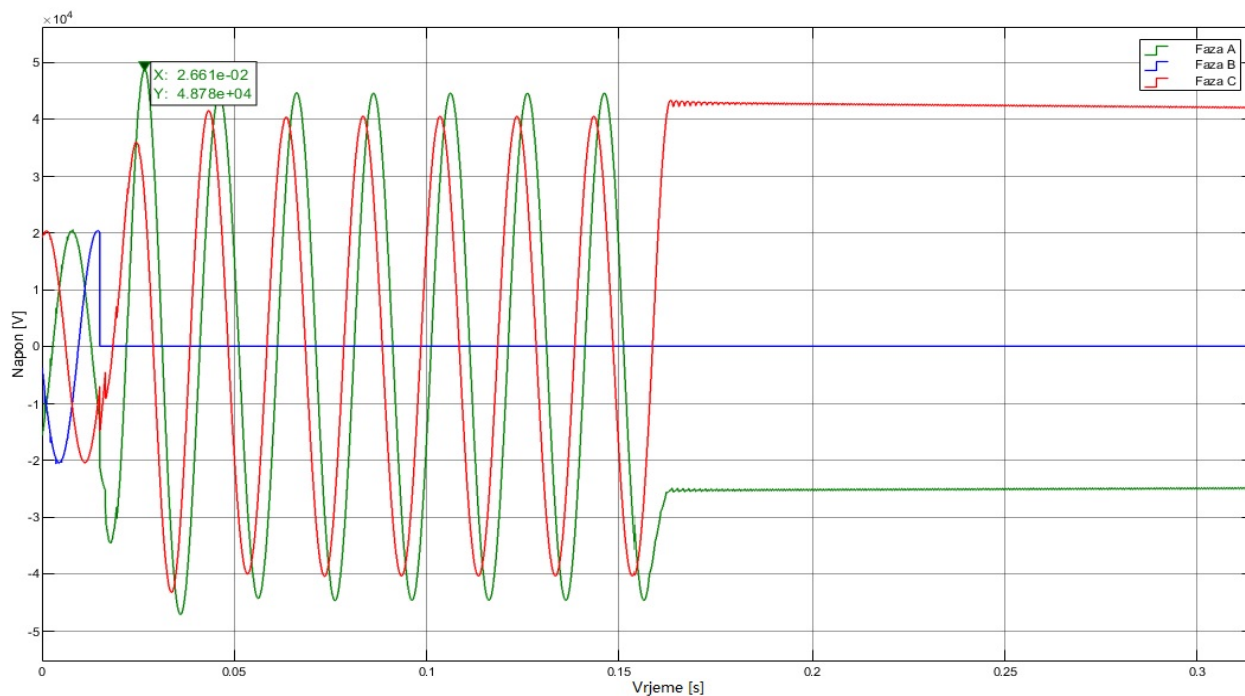
Tabela 5. 19: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik“ – simulacije 7.3 i 7.4

Broj simulacije	Amplituda prenapona (kV)	Amplituda prenapona (r.j.)	Strmina porasta napona (kV/ $\mu$ s)	Vrijeme čela talasa T1 (ms)	Vrijeme začelja talasa T2 (ms)	Vrijeme trajanja maksimuma Td (ms)	Vrijeme do prolaska kroz nulu T0 (ms)
7.3	48,808	2,94	0,0097	4,947	8,276	2,874	9,682
7.4							

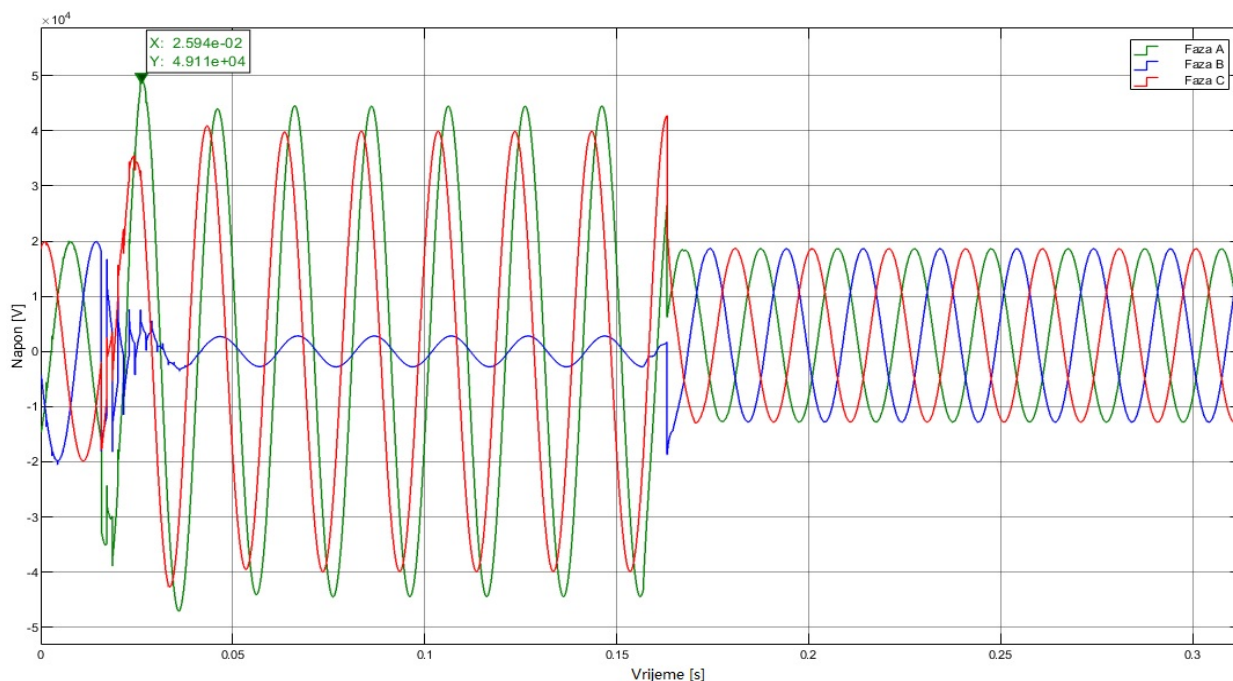
#### 5.4.3 Slučaj rada VNRP – a u praznom hodu pri neprolaznom i prolaznom kvaru na izvodu „TS Vjeternik“ i otvorenom prekidaču izvoda „TS Smokovac“

Za simulacije označene brojevima 8.1 i 8.2 važi da su oba izvoda VN postrojenja „Autoput 1 – Mrke“ bez opterećenja tj VNRP radi u praznom hodu. Simulacija pod brojem 8.1 označava situaciju kada se na izvodu „TS Vjeternik“ javlja neprolazni kvar, dok je simulacija 8.2 sa prolaznim kvarom. Prekidač izvoda „TS Smokovac“ je tokom trajanja simulacije otvoren (10 sekundi).

Na slikama 5.41 i 5.42 je prikazan sinusoidalni oblik napona izvoda „TS Vjeternik“ i 20 kV – nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV, dok su u tabeli 5.20 prikazane karakteristike maksimalnog napona, koji je isti za simulacije 8.1 i 8.2.



Slika 5. 41: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik“ (simulacija broj 8.1)



Slika 5. 42: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacija broj 8.1)

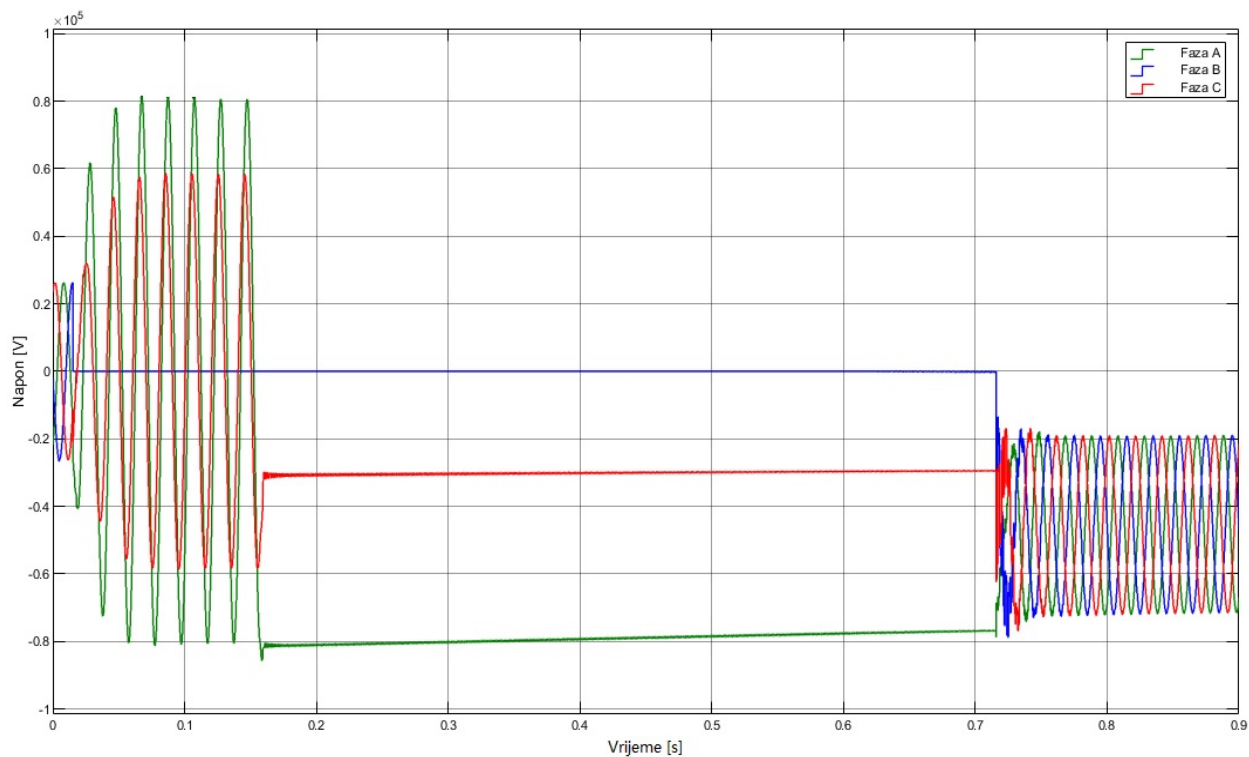
Tabela 5. 20: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik“ – simulacije 8.1 i 8.2

Broj simulacije	Amplituda prenapona (kV)	Amplituda prenapona (r.j.)	Strmina porasta napona (kV/ $\mu$ s)	Vrijeme čela talasa T1 (ms)	Vrijeme začelja talasa T2 (ms)	Vrijeme trajanja maksimuma Td (ms)	Vrijeme do prolaska kroz nulu T0 (ms)
8.1	48,777	2,99	0,01	4,734	7,769	2,590	8,968
8.2							

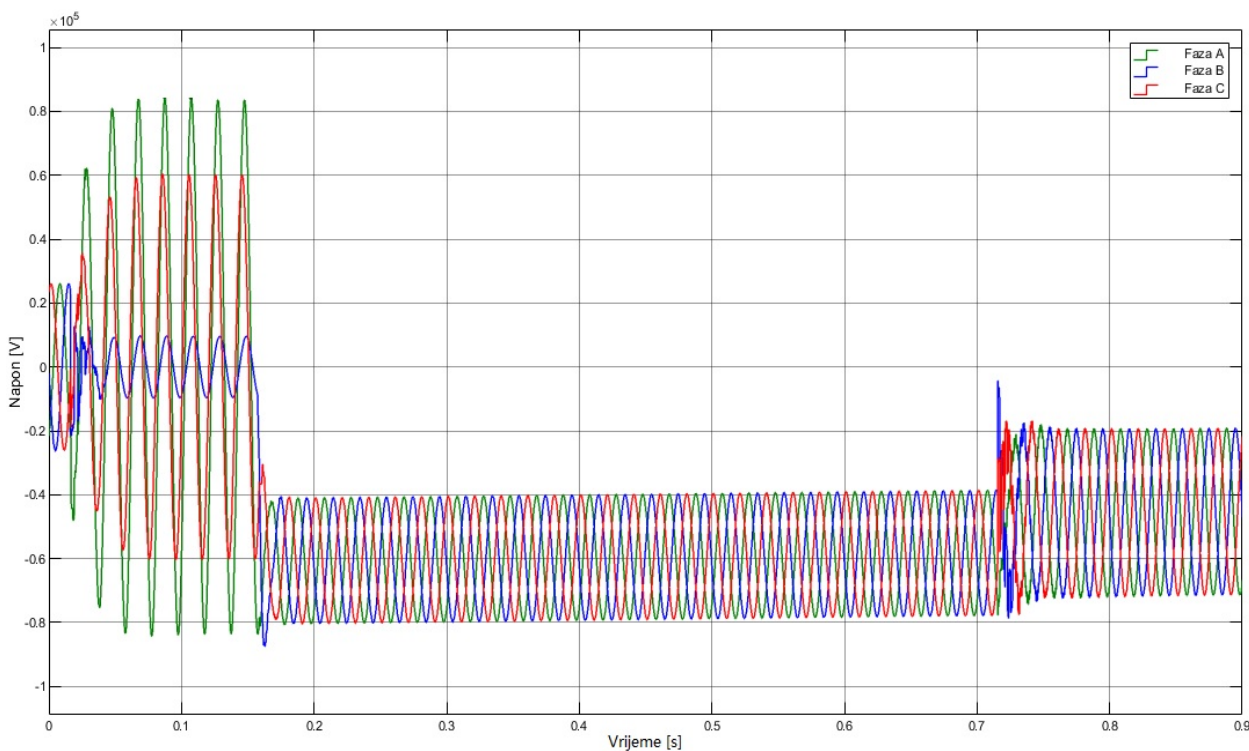
#### 5.4.4 Slučaj rada VNRP – a u praznom hodu pri neprolaznom i prolaznom kvaru na izvodu „TS Vjeternik“ i zatvorenom prekidaču izvoda „TS Smokovac“

Za simulacije označene brojevima 8.3 i 8.4 važi da su oba izvoda VN postrojenja „Autoput 1 – Mrke“ bez opterećenja tj VNRP radi u praznom hodu. Simulacija pod brojem 8.3 označava situaciju kada se na izvodu „TS Vjeternik“ javlja neprolazni kvar, dok je simulacija 8.4 sa prolaznim kvarom. Prekidač izvoda „TS Smokovac“ je tokom trajanja simulacije zatvoren (10 sekundi).

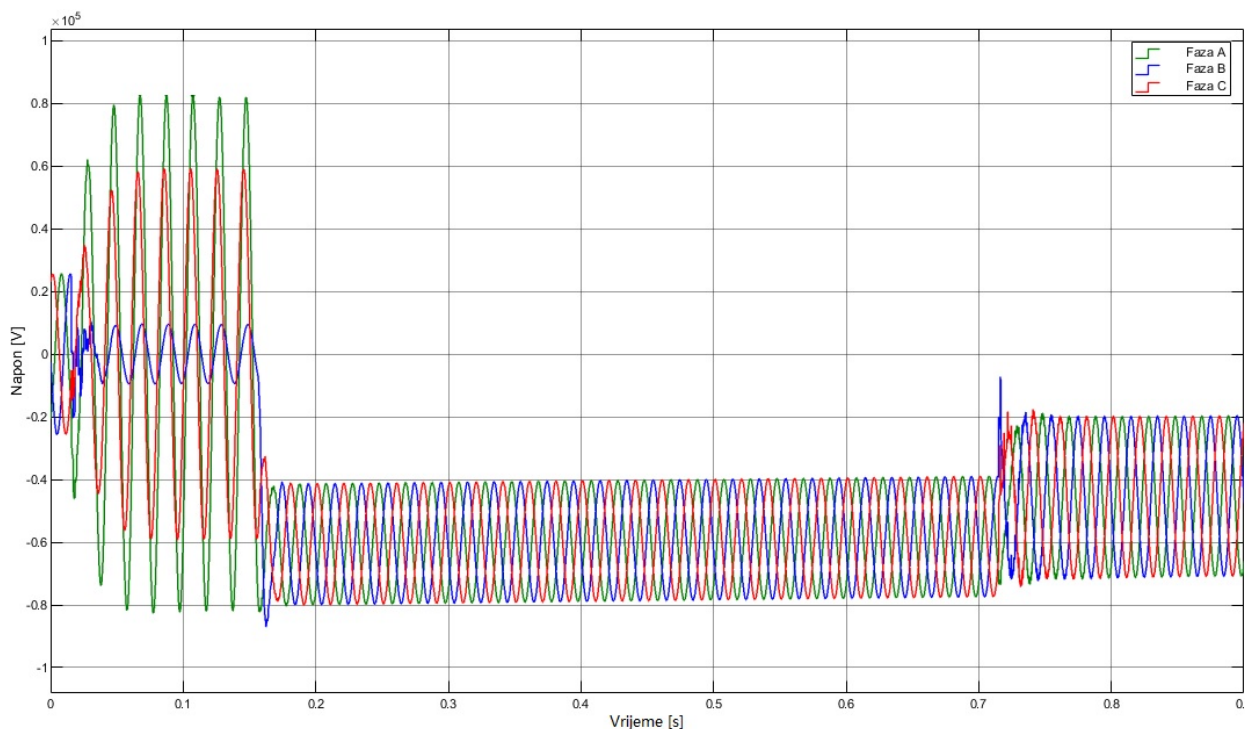
Na slikama 5.43, 5.44 i 5.45 je prikazan sinusoidalni oblik napona oba izvoda i 20 kV – nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV, dok su u tabeli 5.21 prikazane karakteristike maksimalnog napona, koji je isti za simulacije 8.3 i 8.4.



Slika 5. 43: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik“ (simulacija broj 8.4)



Slika 5. 44: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac“ (simulacija broj 8.4)



Slika 5. 45: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacija broj 8.4)

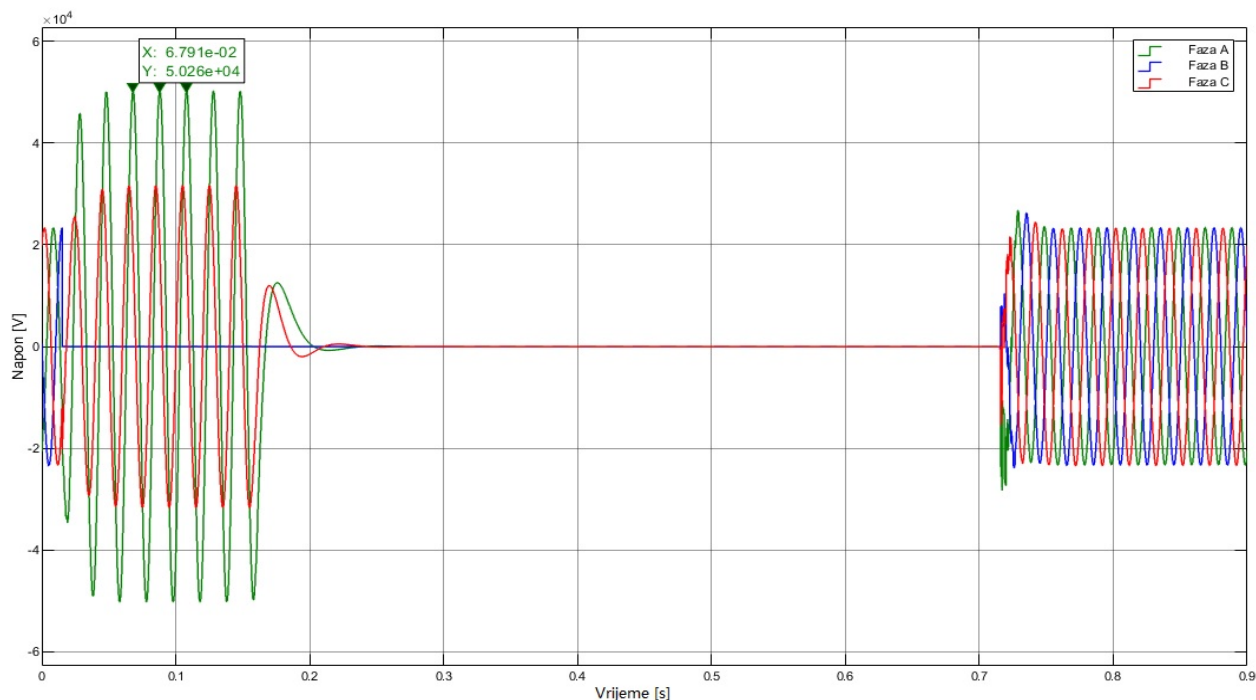
Tabela 5. 21: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik” – simulacije 8.3 i 8.4

Broj simulacije	Amplituda prenapona (kV)	Amplituda prenapona (r.j.)	Strmina porasta napona (kV/ $\mu$ s)	Vrijeme čela talasa T1 (ms)	Vrijeme začelja talasa T2 (ms)	Vrijeme trajanja maksimuma Td (ms)	Vrijeme do prolaska kroz nulu T0 (ms)
8.3	85,705	5,25	0,0134	6,377	8,291	2,854	9,605
8.4							

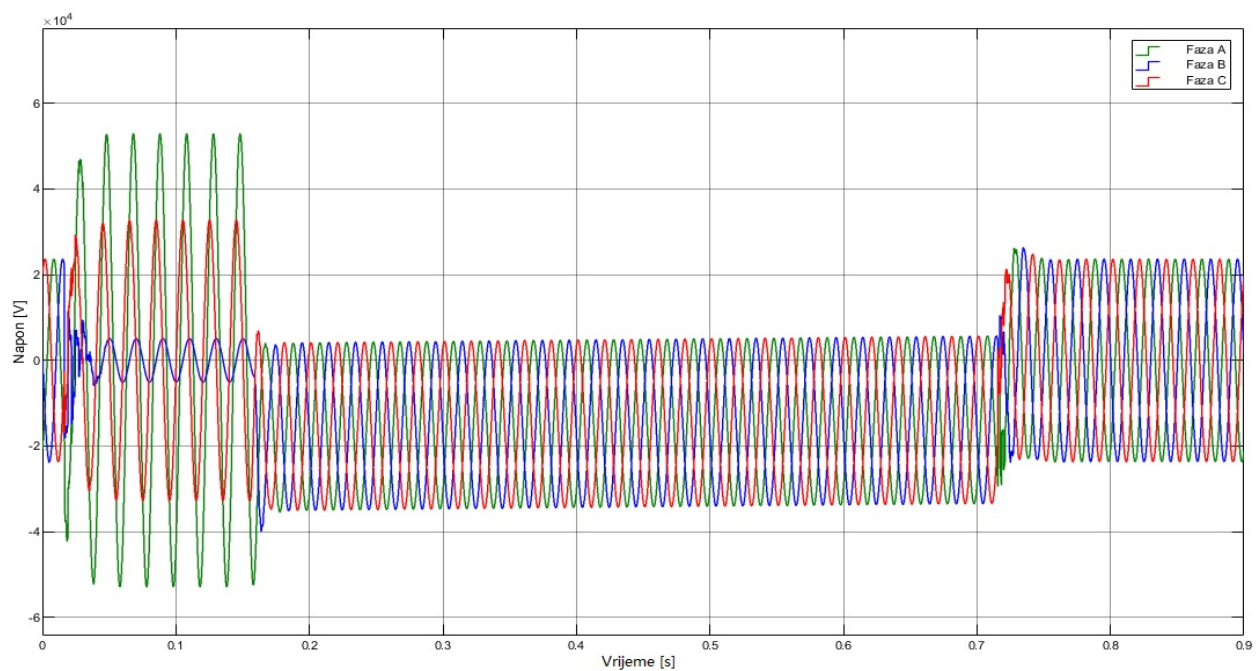
#### 5.4.5 Slučaj rada VNRP – a pri neprolaznom i prolaznom kvaru na opterećenom izvodu „TS Vjeternik” i pri zatvorenom prekidaču neopterećenog izvoda „TS Smokovac”

Za simulacije označene brojevima 9.1 i 9.2 važi da je izvod „TS Smokovac” bez opterećenja, dok je izvod „TS Vjeternik” pod opterećenjem. Parametri trofaznog opterećenja prikazani su u tabeli 5.7. Simulacija pod brojem 9.1 označava situaciju kada se na izvodu „TS Vjeternik” javlja neprolazni kvar, dok je simulacija 9.2 sa prolaznim kvarom. Prekidač izvoda „TS Smokovac” je tokom trajanja simulacije zatvoren (10 sekundi).

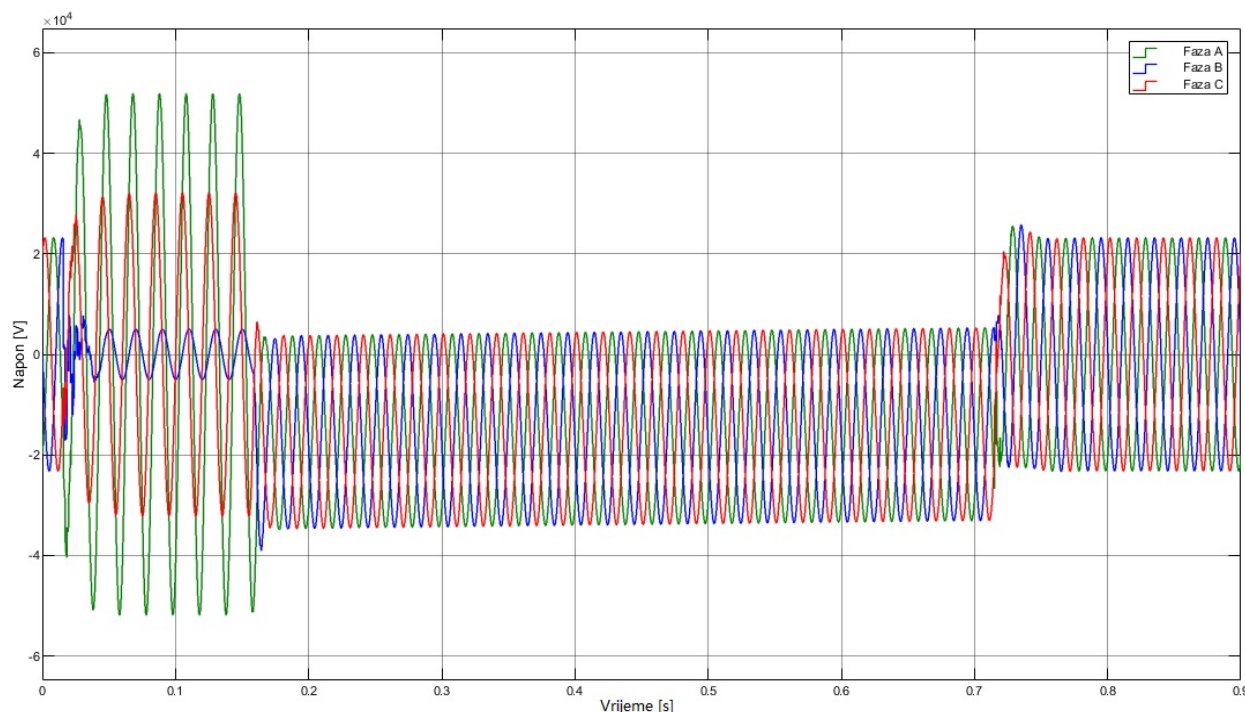
Na slikama 5.46, 5.47 i 5.48 je prikazan sinusoidalni oblik napona oba izvoda i 20 kV – nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV, dok su u tabeli 5.22 prikazane karakteristike maksimalnog napona, koji je isti za simulacije 9.1 i 9.2.



Slika 5. 46: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik“ (simulacija broj 9.2)



Slika 5. 47: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac“ (simulacija broj 9.2)



Slika 5.48: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacija broj 9.2)

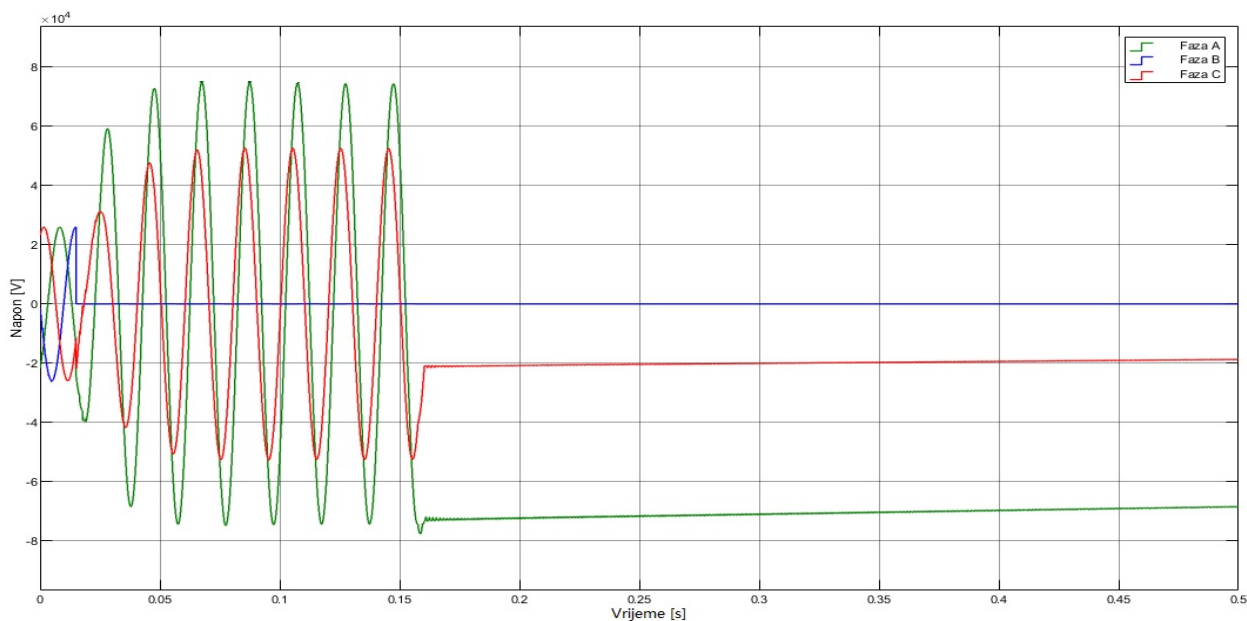
Tabela 5. 22: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik” – simulacije 9.1 i 9.2

Broj simulacije	Amplituda prenapona (kV)	Amplituda prenapona (r.j.)	Strmina porasta napona (kV/ $\mu$ s)	Vrijeme čela talasa T1 (ms)	Vrijeme začelja talasa T2 (ms)	Vrijeme trajanja maksimuma Td (ms)	Vrijeme do prolaska kroz nulu T0 (ms)
9.1	50,264	3,08	0,01	5,004	8,323	2,844	9,640
9.2							

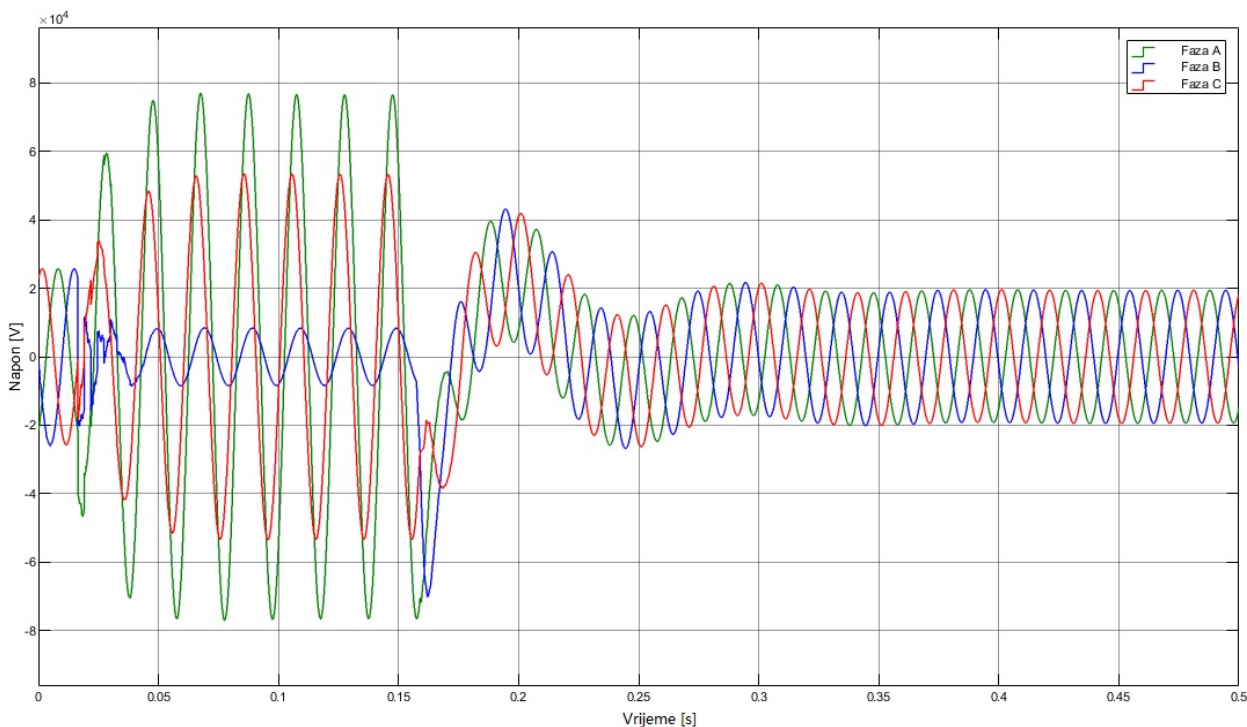
#### 5.4.6 Slučaj rada VNRP – a pri neprolaznom i prolaznom kvaru na neopterećenom izvodu „TS Vjeternik” i pri zatvorenom prekidaču opterećenog izvoda „TS Smokovac”

Za simulacije označene brojevima 10.1 i 10.2 važi da je izvod „TS Vjeternik” bez opterećenja, dok je izvod „TS Smokovac” pod opterećenjem. Parametri trofaznog opterećenja prikazani su u tabeli 5.7. Simulacija pod brojem 10.1 označava situaciju kada se na izvodu „TS Vjeternik” javlja neprolazni kvar, dok je simulacija 10.2 sa prolaznim kvarom. Prekidač izvoda „TS Smokovac” je tokom trajanja simulacije zatvoren (10 sekundi).

Na slikama 5.49, 5.50 i 5.51 je prikazan sinusoidalni oblik napona oba izvoda i 20 kV – nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV, dok su u tabeli 5.23 prikazane karakteristike maksimalnog napona, koji je isti za simulacije 10.1 i 10.2.

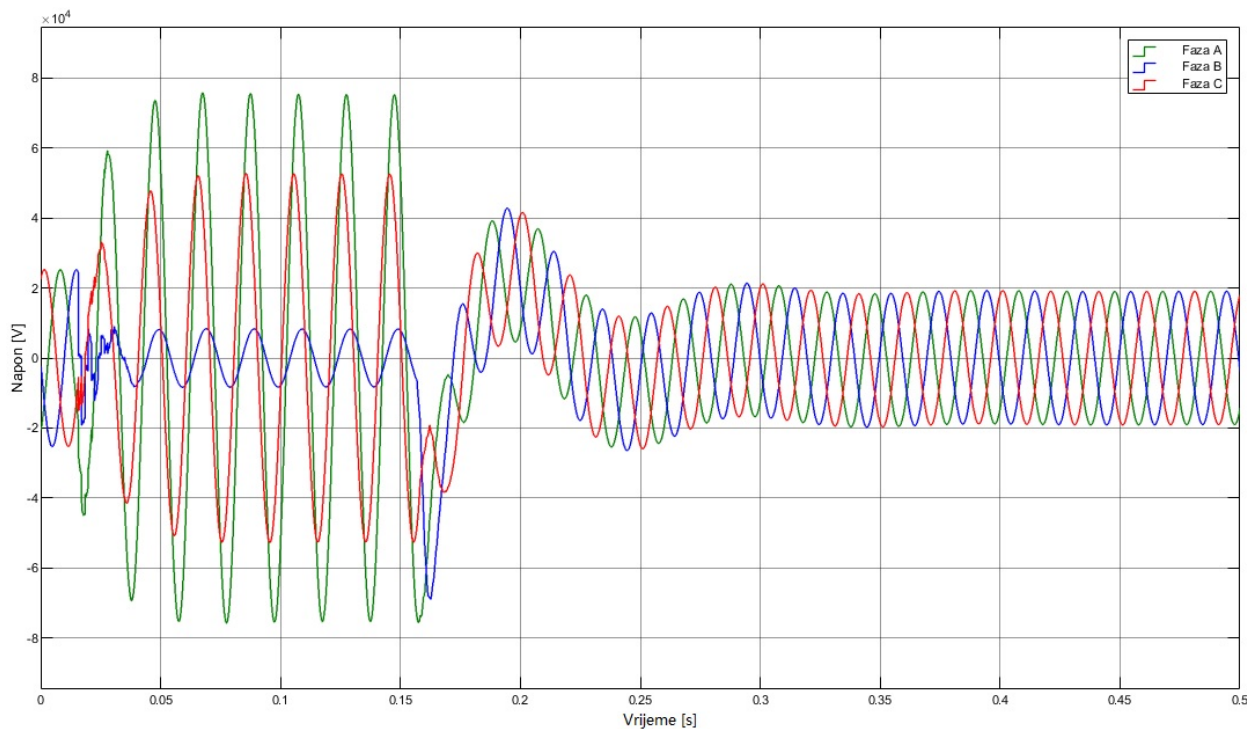


Slika 5. 49: Sinusoidalni oblik napona „TS Vjeternik“ (simulacija broj 10.1)



Slika 5. 50: Sinusoidalni oblik napona „TS Smokovac“ (simulacija broj 10.1)





Slika 5. 51: Sinusoidalni oblik napona 20 kV- nog prekidača u trafo polju transformatora 110/20 kV (simulacija broj 10.1)

Tabela 5. 23: Vremenske karakteristike napona izvoda „TS Vjeternik“ – simulacije 10.1 i 10.2

Broj simulacije	Amplituda prenapona (kV)	Amplituda prenapona (r.j.)	Strmina porasta napona (kV/ $\mu$ s)	Vrijeme čela talasa T1 (ms)	Vrijeme začelja talasa T2 (ms)	Vrijeme trajanja maksimuma Td (ms)	Vrijeme do prolaska kroz nulu T0 (ms)
10.1	77,625	4,75	0,012	6,471	8,289	2,859	9,618
10.2							

## 5.5 Analiza rezultata i grafički prikaz simulacija VN postrojenja „Autoput 1 - Mrke“

Sistematizacija podešenja rada prekidača u prethodno prikazanim simulacijama data je u tabeli 5.27.

Dobijene relativne vrijednosti sklopnih prenapona za ove simulacije prikazane su u tabeli 5.28, i grafički na slici 5.52.

Tabela 5. 24: Simulacije VN postrojenja „Autoput 1 – Mrke“

<b>PRAZAN HOD</b>	Broj simulacije			<b>1.1</b>	<b>1.2</b>	<b>1.3</b>
	Prekidač TS Smokovac <b>OTVOREN</b>	Prekidač TS Smokovac	Initial status	open	open	open
			switching time	10 s	10 s	10 s
		Prekidač TS Vjeternik	Initial status	open	open	open
			switching time	5 ms	15 ms	25 ms
	Broj simulacije			<b>2.1</b>	<b>2.2</b>	<b>2.3</b>
	Prekidač TS Smokovac <b>ZATVOREN</b>	Prekidač TS Smokovac	Initial status	close	close	close
			switching time	10 s	10 s	10 s
		Prekidač TS Vjeternik	Initial status	open	open	open
			switching time	5 ms	15 ms	25 ms
	Broj simulacije			<b>1.4</b>		
	Prekidač TS Smokovac <b>OTVOREN</b>	Prekidač TS Smokovac	Initial status	open		
			switching time	25 ms		
		Prekidač TS Vjeternik	Initial status	open		
switching time			15 ms			

<b>Oba izvoda pod opterećenjem</b>	Broj simulacije			<b>3.1</b>	<b>3.2</b>	<b>3.3</b>
	Prekidač TS Smokovac <b>OTVOREN</b>	Prekidač TS Smokovac	Initial status	open	open	open
			switching time	10 s	10 s	10 s
		Prekidač TS Vjeternik	Initial status	open	open	open
			switching time	5 ms	15 ms	25 ms
	Broj simulacije			<b>4.1</b>	<b>4.2</b>	<b>4.3</b>
	Prekidač TS Smokovac <b>ZATVOREN</b>	Prekidač TS Smokovac	Initial status	close	close	close
			switching time	10 s	10 s	10 s
		Prekidač TS Vjeternik	Initial status	open	open	open
			switching time	5 ms	15 ms	25 ms
	Broj simulacije			<b>3.4</b>		
	Prekidač TS Smokovac <b>OTVOREN</b>	Prekidač TS Smokovac	Initial status	open		
			switching time	25 ms		
		Prekidač TS Vjeternik	Initial status	open		
switching time			15 ms			

<b>Izvod TS Smokovac neopterećen</b>	Broj simulacije			<b>5.1</b>	<b>5.2</b>
	Prekidač TS Smokovac <b>ZATVOREN</b>	Prekidač TS Smokovac	Initial status	close	close
			switching time	10 s	10 s
		Prekidač TS Vjeternik	Initial status	open	open
			switching time	5 ms	15 ms
	Broj simulacije			<b>5.3</b>	
	Prekidač TS Smokovac <b>OTVOREN</b>	Prekidač TS Smokovac	Initial status	open	
			switching time	25 ms	
		Prekidač TS Vjeternik	Initial status	open	
			switching time	15 ms	

<b>Izvod TS Vjeternik neopterećen</b>	Broj simulacije			<b>6.1</b>	<b>6.2</b>
	<b>Prekidač TS Smokovac ZATVOREN</b>	Prekidač TS Smokovac	Initial status	close	close
			switching time	10 s	10 s
		Prekidač TS Vjeternik	Initial status	open	open
			switching time	5 ms	15 ms
	Broj simulacije			<b>6.3</b>	
	<b>Prekidač TS Smokovac OTVOREN</b>	Prekidač TS Smokovac	Initial status	open	
			switching time	25 ms	
		Prekidač TS Vjeternik	Initial status	open	
			switching time	15 ms	

<b>Oba izvoda pod opterećenjem</b>	Tip kvara			<b>neprolazni kvar</b>	<b>prolazni kvar</b>
	Broj simulacije			<b>7.1</b>	<b>7.2</b>
	<b>Prekidač TS Smokovac OTVOREN</b>	Prekidač TS Smokovac	Initial status	open	open
			switching time	10 s	10 s
		Prekidač TS Vjeternik	Initial status	closed	closed
			switching time	$15e-3+0.14$	$15e-3+0.14; 15e-3+0.7$
	Broj simulacije			<b>7.3</b>	<b>7.4</b>
	<b>Prekidač TS Smokovac ZATVOREN</b>	Prekidač TS Smokovac	Initial status	close	close
			switching time	10 s	10 s
		Prekidač TS Vjeternik	Initial status	closed	closed
switching time			$15e-3+0.14$	$15e-3+0.14; 15e-3+0.7$	

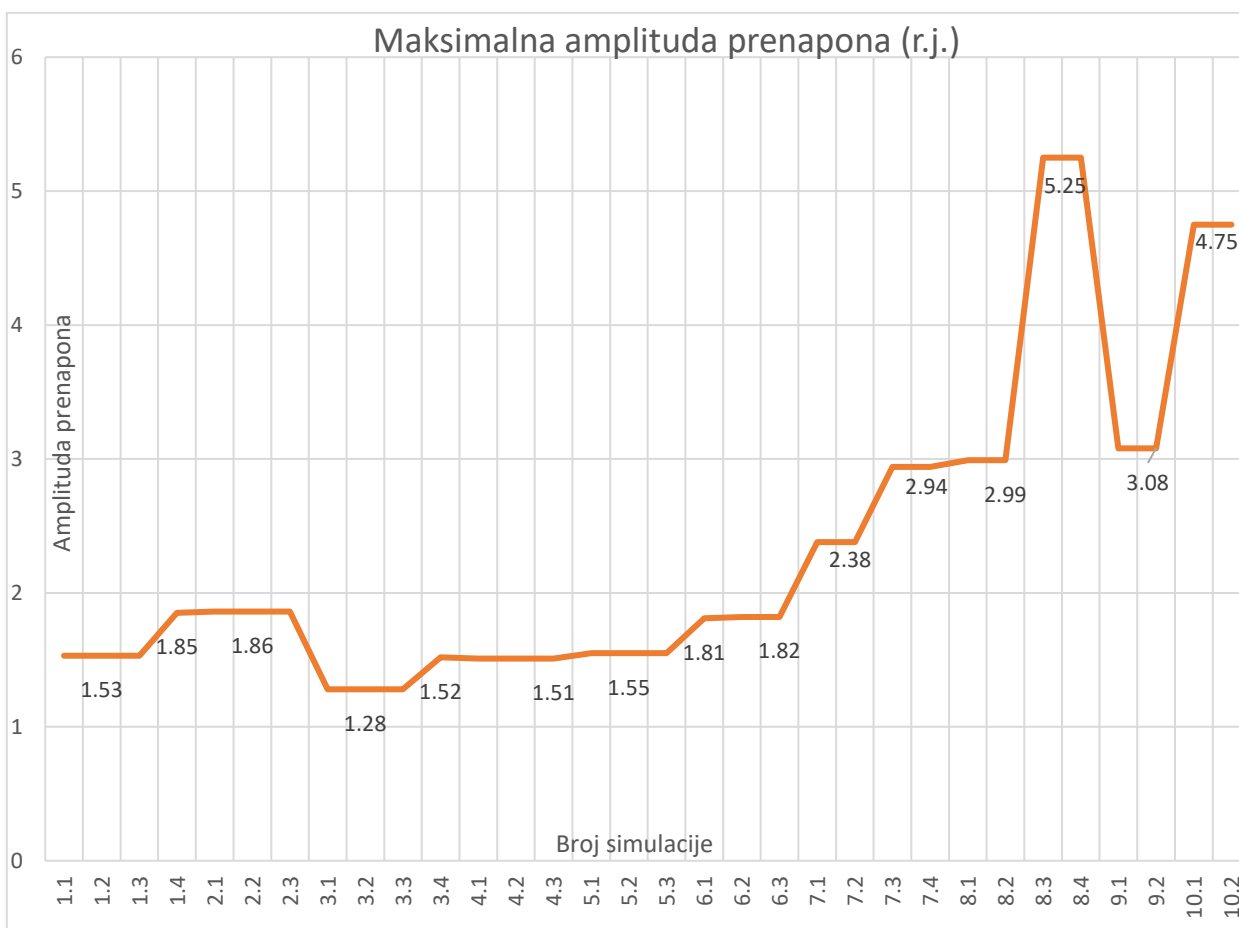
<b>PRAZAN HOD</b>	Tip kvara			<b>neprolazni kvar</b>	<b>prolazni kvar</b>
	Broj simulacije			<b>8.1</b>	<b>8.2</b>
	<b>Prekidač TS Smokovac OTVOREN</b>	Prekidač TS Smokovac	Initial status	open	open
			switching time	10 s	10 s
		Prekidač TS Vjeternik	Initial status	closed	closed
			switching time	$15e-3+0.14$	$15e-3+0.14; 15e-3+0.7$
	Broj simulacije			<b>8.3</b>	<b>8.4</b>
	<b>Prekidač TS Smokovac ZATVOREN</b>	Prekidač TS Smokovac	Initial status	close	close
			switching time	10 s	10 s
		Prekidač TS Vjeternik	Initial status	closed	closed
switching time			$15e-3+0.14$	$15e-3+0.14; 15e-3+0.7$	

Izvod TS Smokovac neopterećen	Tip kvara		neprolazni kvar	prolazni kvar
	Broj simulacije		<b>9.1</b>	<b>9.2</b>
	Prekidač TS Smokovac <b>ZATVOREN</b>	Prekidač TS Smokovac	Initial status	close
switching time			10 s	10 s
Prekidač TS Vjeternik		Initial status	closed	closed
		switching time	15e-3+0.14	15e-3+0.14; 15e-3+0.7

Izvod TS Vjeternik neopterećen	Tip kvara		neprolazni kvar	prolazni kvar
	Broj simulacije		<b>10.1</b>	<b>10.2</b>
	Prekidač TS Smokovac <b>ZATVOREN</b>	Prekidač TS Smokovac	Initial status	close
switching time			10 s	10 s
Prekidač TS Vjeternik		Initial status	closed	closed
		switching time	15e-3+0.14	15e-3+0.14; 15e-3+0.7

Tabela 5. 25: Maksimalne vrijednosti amplitude prenapona simulacija VN postrojenja „Autoput 1 – Mrke“

Broj simulacije	Maksimalna amplituda prenapona (r.j.)		
<b>1.1</b>	1.53	<b>6.1</b>	1.81
<b>1.2</b>		<b>6.2</b>	1.82
<b>1.3</b>		<b>6.3</b>	
<b>1.4</b>	1.85	<b>7.1</b>	2.38
<b>2.1</b>	1.86	<b>7.2</b>	
<b>2.2</b>		<b>7.3</b>	2.94
<b>2.3</b>		<b>7.4</b>	
<b>3.1</b>	1.28	<b>8.1</b>	2.99
<b>3.2</b>		<b>8.2</b>	
<b>3.3</b>		<b>8.3</b>	5.25
<b>3.4</b>	1.52	<b>8.4</b>	
<b>4.1</b>	1.51	<b>9.1</b>	3.08
<b>4.2</b>		<b>9.2</b>	
<b>4.3</b>		<b>10.1</b>	4.75
<b>5.1</b>	1.55	<b>10.2</b>	
<b>5.2</b>	1.55		
<b>5.3</b>			



Slika 5. 52: Grafički prikaz maksimalnih amplituda prenapona

Iz tabele 5.25 i grafika prikazanog na slici 5.52 može se uočiti da su najnepovoljniji slučajevi pojave sklopnih prenapona u visokonaponskom postrojenju, odnosno situacije kada se javljaju najveće vrijednosti amplitude sklopnih prenapona pri uključanju sa zaostalim naponom nakon jednofaznog kratkog spoja. U konkretnom slučaju to važi za simulacije 8.3 i 8.4 kada vrijednost sklopnog prenapona dostiže 5.25 r.j., pri kojima su oba izvoda u praznom hodu, trofazni prekidač „TS Smokovac“ zatvoren dok se na izvodu „TS Vjeternik“ javljaju neprolazni i prolazni kvar.

## **6. Zaključak**

U elektroenergetskim sistemima pojava sklopnih prenapona ima veoma izražene negativne efekte koji mogu ozbiljno ugroziti njihovu eksploataciju. Sklopni prenaponi dovode do velikih prenaponskih naprezanja elektroenergetske opreme, kako u ustaljenom tako i u havarijskom režimu rada.

Sklopni prenaponi se javljaju pri gotovo svakoj manipulaciji sklopnom opremom, tj. pri operaciji uključanja ili operaciji isključenja. Sa aspekta izolacije, procjena maksimalne vrijednosti sklopnih prenapona do kojih može doći pri komutacijama prekidača, čime se doprinosi povećanju pouzadnosti rada elektroenergetskog sistema. Maksimalna vrijednost sklopnih prenapona koji se mogu javiti u sistemu treba da bude manja od podnosivog napona elemenata zaštite, kako ne bi došlo do oštećenja izolacije. Ukoliko je vrijednost sklopnog prenapona veća od podnosive, potrebno je primijeniti određene mjere zaštite.

Provjera sposobnosti izolacije elemenata elektroenergetskog sistema da izdrži određene vrijednosti i karakteristike sklopnih prenapona koji se mogu javiti u sistemu vrši se ispitivanjem opreme reprezentativnim sklopnim prenaponima. Reprezentativni sklopni prenaponi i njihove karakteristike (amplituda, strmina, vrijeme čela, vrijeme začelja, itd.) su definisane preko standardizovanih talasnih oblika ovih prenapona. S tim u vezi, sklopni prenaponi predstavljaju najvažniji kriterijum pri projektovanju izolacije opreme elektroenergetskih sistema.

Najčešći kvarovi koji se javljaju u elektroenergetskim sistemima su prolaznog karaktera, tkzv prolazni kvarovi. Značajan uticaj na visinu vrijednosti sklopnih prenapona imaju zaostali naponi na provodnicima, koji se javljaju pri jednofaznom kratkom spoju, koji čini 90 % svih kvarova u elektroenergetskom sistemu.

U cilju dobijanja konkretnih rezultata pri ispitivanju savremenih visokonaponskih postrojenja na uticaj sklopnih prenapona, sprovedena je simulacija na konkretnom primjeru. Korištenjem simulacijskih metoda na primjeru dijela realnog sistema tj. VNRP – a "Autoput 1 – Mrke" omogućena je analiza sklopnih prenapona, odnosno njegovih parametara. Nakon sprovedenog istraživanja i analize dobijenih rezultata, zaključeno je da se najveće vrijednosti amplitude sklopnih prenapona javljaju pri uključanju prekidača sa zaostalim naponom nakon jednofaznog kratkog spoja, kada VNRP radi u praznom hodu. Najmanja vrijednost amplitude sklopnih prenapona u konkretnom primjeru se javlja kada VNRP radi pod opterećenjem, a prekidač izvoda „TS Smokovac" je tokom trajanja simulacije i zatvaranja prekidača posmatranog izvoda „TS Vjeternik" konstantno otvoren.

Rezultati koji se odnose na visinu amplitude, kao i ostale karakteristike sklopnih prenapona, dobijenih simuliranjem mogućih situacija realnog sistema tj. TS – a 110/20 kV "Autoput 1 – Mrke" omogućavaju nam da se donese zaključak da je potrebno vršiti zaštitu opreme i elemenata sistema primjenom odvodnika prenapona, kao i kontrolisanjem operacija prekidača. Tako je moguće izvršiti odabir karakteristika odvodnika prenapona, odrediti prenaponsko naprezanje izolacije, ili vršiti analizu efikasnosti uređaja za kontrolisano zatvaranje prekidača.



Na osnovu prethodne analize rezultata dobijenih u magistarskom radu mogu se sagledati i dati predlozi za korekciju postojećih ili primjenu novih ispitnih talasnih oblika. Samim tim se praktična primjena rezultata istraživanja ogleda u unapređenju ispitnih uslova za provjeru sposobnosti opreme i elemenata savremenih mreža i postrojenja da izdrže sklopne prenapone. Upotrebom simulacionih modela za analizu karakteristika sklopnih prenapona doprinosi se procesu održivog planiranja stabilnosti i pouzdanosti elektroenergetskih sistema.

## **7. Literatura**

- [1] Pravila za funkcionisanje prenosnog sistema električne energije – Službeni list CG 80/2017 i 90/2017;
- [2] Poboljšana analiza i predviđanje sklopnih prenapona u elektroenergetskoj mreži razvojem grafičkog sučelja, Krešimir Miklošević, doktorska disertacija, Osijek 2017;
- [3] Tehnika visokog napona – Milan Savić, Zlatan Stojković, Beograd 2001;
- [4] International standard IEC 60071 – 1 – Insulation co – ordination, 1993 – 12;
- [5] Visokonaponska rasklopna postrojenja – Sreten Škuletić, Nikolija Kaljević, Podgorica 2019;
- [6] Tehnika visokog napona – Ivo Uglješić, Zagreb 2002;
- [7] Sklopni prenaponi u elektroenergetskim mrežama – Petar Vinković, završni rad – Osijek 2019;
- [8] Visokonaponska rasklopna postrojenja – Hrvoje Požar, Zagreb 1973;
- [9] Application of wavelet multi-resolution analysis & perceptron neural networks for classification of transients on transmission line – Farhan Mahmood, Suihalil Aftab, Muhammad Kamran - jan 2009;
- [10] Application of Controlled Switching for Limitation of Switching Overvoltages on 400 kV Transmission Line – B. Filipović – Grčić, I. Uglješić, S. Bojić, A. Župan ;
- [11] Investigation of Transmission Line Overvoltages and their Deduction Approach – Amir Hayati Soloot, Ahmad Gholami, Edris Agheb, Pozhhan Mokhtari – jul 2010;

[12] Simulation of Switching Overvoltages and Validation with Field Tests - *IEEE-PES Working Group on Field Measured Overvoltages and Their Analysis*;

[13] Simulation of switching overvoltages in the mine electric power supply system - D I Ivanchenko and N G Novozhilov 2017;

[14] Mitigation of switching overvoltage by application of surge arrester on capacitor bank - Dr. Mrs. Hina Chandwani, C. D. Upadhyay, Akil Vahora, Goutam Som, April 2013;

[15] Modeling and Mitigation for High Frequency Switching Transients Due to Energization in Offshore Wind Farms - Yanli Xin, Bo Liu, Wenhua Tang, Qinghua Wu, December 2016;

[16] Teorijski osvrt na proračun sklopnih prenapona u postrojenju – skripta, Elektrotehniki fakultet Univerziteta u Beogradu – Katedra za elektroenergetske sisteme;

[17] Uvod u teoriju električnih sklopnih aparata , Belin, B. i Kovačić, L. Zagreb 1978;

[18] Tehnička enciklopedija – T. Kelemen, Zagreb 1995;

[19] Uređaj za trolno automatsko ponovno uključenje APU 570 – [www.ied.rs](http://www.ied.rs);

[20] Insulation coordination – Demsew Mitiku, Fekadu Walle, February 2018;

[21] Prenaponi i koordinacija izolacije – Selma Grebović, Sarajevo, maj 2018;

[22] IEC 60060 – 1 – High Voltage test techniques, Part 1: General definitions and test requirements;

[23] Prenaponi i koordinacija izolacije – Zijad Bajramović, Selma Grebović, Muftić Dedović, Nermin Oprašić, Elektrotehnički fakultet - Univerzitet u Sarajevu;

[24] IEC 60060 – 2 - High Voltage test techniques, Part 1: Measuring system;

[25] International standard IEC 60071 – 3 – Phase to phase insulation co-ordination Principles, rules and application guide;

[26] Sklopni aparati i aparature visokog napona – Krešimir Meštrović, Tehničko veleučilište u Zagrebu, Elektrotehnički odjel;

[27] Modelovanje i simulacija električnih sistema u programskom jeziku Matlab/Simscape – Suzana Cvetković, Niš – septembar 2017;

[28] Prekidači – skripta, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu – Katedra za elektroenergetske sisteme;

[29] Transformatori – Osnovi elektroenergetike, Dr Ivana Vlajić – Naumovska;

[30] Transformatori – skripta, Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom;

[31] Modeling of Power Network System of the High Voltage substation - Turan Cakil, H.Feza Carlak, Sukru Ozen, Department of Electrical and Electronics Engineering, Akdeniz University - Antalya, december 2015.

[32] Autoput Bar – Boljare, Dionica Smokovac – Mateševo, Glavni projekat TS 110/20 kV „Autoput 1“;

[33] Autoput Bar – Boljare, Dionica Smokovac – Mateševo, Glavni projekat TS 20/0,4 kV 2x250 kVA „Naplatna rampa Smokovac“;

[34] Autoput Bar – Boljare, Dionica Smokovac – Mateševo, Glavni projekat elektroenergetskih instalacija transformatorske stanice TS 20/0,4 kV „7.1 Tunel Vjeternik“ 2x1000 kV;

[35] Autoput Bar – Boljare, Dionica Smokovac – Mateševo, Glavni projekat 20 kV razvod napajanja TS 20/0,4 kV – Elektro dio;

## **ETIČKA IZJAVA**

Ja, ispod potpisani Goran Čevriz, izjavljujem da sam magistarski rad pod nazivom „Analiza uticaja konfiguracije i pogona visokonaponskih razvodnih postrojenja na karakteristike sklopnih prenapona i opseg primjene reprezentativnih sklopnih prenapona” napisao sam, uz konsultacije sa mentorom, uz upotrebu pomoćnih sredstava navedenih u radu (softverski alati i literatura). Pojmovi koji su preuzeti iz drugih izvora, za potrebe pisanja rada, označeni su i adekvatno navedeni u popisu literature. Ovaj rad nije prethodno prezentovan u identičnoj ili sličnoj formi ni u jednoj crnogorskoj ili stranoj ispitnoj komisiji.

Podgorica, 26.10.2021.

Goran Čevriz, spec.sci.el.ing.