

# SKLOPNI PRENAPONI U ELEKTROENERGETSKIM MREŽAMA

---

Vinković, Petar

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:189532>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-12**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni studij**

**SKLOPNI PRENAPONI U ELEKTROENERGETSKIM  
MREŽAMA**

**Završni rad**

**Petar Vinković**

**Osijek, 2019.**

<b>1. Uvod.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Zadatak završnog rada.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Prenaponi.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1. Podjela prenapona prema obliku i trajanju.....</b>	<b>2</b>
<b>2.2. Karakteristike prenapona.....</b>	<b>3</b>
<b>2.3. Udarni napon.....</b>	<b>6</b>
<b>2.4. Koeficijent prenapona.....</b>	<b>8</b>
<b>3. Sklopni prenaponi.....</b>	<b>10</b>
<b>3.1. Električni luk.....</b>	<b>10</b>
<b>3.2. Prekidanje struje.....</b>	<b>15</b>
<b>3.3. Povratni napon .....</b>	<b>21</b>
<b>4. Primjeri nastajanja sklopnih prenapona.....</b>	<b>23</b>
<b>4.1. Jednofazno isklapanje opterećenog voda.....</b>	<b>23</b>
<b>4.2. Trofazno isklapanje opterećenog voda.....</b>	<b>25</b>
<b>4.3. Uklapanje neopterećenog voda preko transformatora.....</b>	<b>27</b>
<b>4.4. Uklapanje neopterećenog voda preko većeg broja dugih kabela ili vodova.....</b>	<b>28</b>
<b>4.5. Uklapanje neopterećenog voda preko kompleksnog izvora.....</b>	<b>28</b>
<b>4.6. Isklapanje malih kapacitivnih struja.....</b>	<b>28</b>
<b>4.7. Isklapanje malih induktivnih struja.....</b>	<b>34</b>
<b>4.8. Isklapanje kvarova.....</b>	<b>35</b>
<b>4.9. Povratni napon s dvije frekvencije.....</b>	<b>41</b>
<b>5. Zaključak.....</b>	<b>44</b>
<b>Literatura.....</b>	<b>45</b>
<b>Sažetak.....</b>	<b>46</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>47</b>
<b>Životopis.....</b>	<b>48</b>

## 1. UVOD

### 1.UVOD

Elektroenergetski sustav je složena ljudska tvorevina čija je osnovna zadaća opskrbljivanje električnom energijom. Pripada kategoriji dinamičkih sustava gdje se fokus stavlja na prilagodbu krajnjem korisniku. U tom sustavu postoje sklopni aparati koji služe za stavljanje u beznaponsko, odnosno naponsko stanje jednog dijela sustava. Kod takvih sklopnih operacija, dolazi do pojave sklopnih prenapona na kontaktima sklopnih aparata. Sklopni prenaponi su neželjena povećanja napona koja mogu dovesti do ispada sustava, oštećenja izolacije i slično te ih je važno proučavati i analizirati kako bi sustav bio funkcionalan.

#### 1.1. Zadatak završnog rada

U završnom radu potrebno je definirati sklopne prenapone. Potrebno je objasniti uvjete prilikom uklapanja i isklapanja elemenata elektroenergetsko sustava koji imaju različit reaktivni karakter. Nadalje, potrebno je objasniti nastanak prenapona kod isklapanja kvarova. Na jednostavnom računalnom modelu prikazati nastajanje sklopnog prenapona u različitim uvjetima u elektroenergetskoj mreži.

### 2. PRENAPONI

Svaka pojedina zemlja ima standardima definiran nazivni i najviši napon mreže. Nazivna vrijednost napona je ona vrijednost po kojoj je nazvana mreža, a poznata je i pod nazivnom pogonska vrijednost. Najviši napon je najviša vrijednost napona koja se pojavljuje na bilo kojoj točki mreže i u bilo kojem trenutku u normalnim pogonskim uvjetima. No, u mreži se zbog sklapanja, atmosferskih pražnjenja i sličnoga pojavljuju naponi viši od najviših napona definiranih za mrežu te nose zajednički naziv prenaponi. Prenapon je napon koji se kratkotrajno pojavljuje između vodiča i zemlje ili dvaju vodiča, a vršna mu je vrijednost veća od nazivnog napona mreže.

#### 2.1. Podjela prenapona prema obliku i trajanju

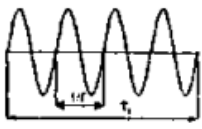
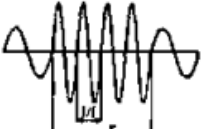
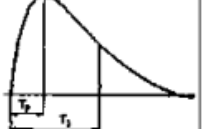
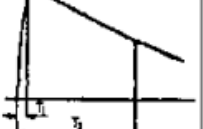
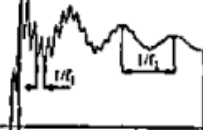
Naponi i prenaponi se klasificiraju prema svojem obliku i trajanju pa odatle dolazi podjela koju donosi međunarodna elektrotehnička komisija (IEC) 71 - 1:

1. Trajni napon pogonske frekvencije – napon konstantne efektivne vrijednosti koji je trajno priključen na stezaljke sklopnih aparata, uređaja i ostalih dijelova postrojenja.
2. Privremeni prenapon – prenapon nazivne frekvencije i relativno dugog trajanja. Pojavljuje se kao slabo prigušeni ili neprigušeni.
3. Prijelazni prenapon - prenapon kratkog trajanja (do nekoliko milisekundi ili manje). Mogu biti oscilirajući ili neoscilirajući i najčešće su jako prigušeni. Prenaponi prijelaznog karaktera dijele se na:
  - a) Prenapon polaganog porasta čela – prenaponi uobičajeno jednog polariteta s vremenom trajanja hrpta od 20 milisekundi, te trajanja čela 20 – 5000 mikrosekundi.
  - b) Prenapon brzog porasta čela – prenaponi uobičajeno jednog polariteta s vremenom trajanja hrpta od 300 mikrosekundi, te trajanja čela 0,1 – 20 mikrosekundi.
  - c) Prenapon vrlo brzog porasta čela - prenaponi uobičajeno jednog polariteta s vremenom trajanja čela manjim od 0,1 mikrosekundi, a ukupnim trajanjem manjim od 3 milisekunde. Najčešće su superponirani oscilacijama vrlo visoke frekvencije.
4. Kombinirani prenaponi su prenaponi koji sačinjavaju dvije ili više komponenti, a klasificirani su prema komponenti više vršne vrijednosti. Mogu se pojaviti između dvije

## 2. PRENAPONI

faze ili na jednoj fazi između različitih dijelova sustava. Od svih prenapona, kombinirani se najčešće pojavljuju.

Istosmjerni napon je također naponski poremećaj u izmjeničnim sustavima. IEC ga ne definira, ali valja ga spomenuti jer u kombinaciji s prethodno definiranim prenaponima može imati utjecaj na izolaciju. Istosmjerni napon nastaje zbog naboja uzrokovanog tijekom isklapanja kondenzatora.

VRSTE NAPONA	NISKA FREKVENCIJA		PRIJELAZNI		
	TRAJNI	PRIVREMENI	POLAGANI (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 $\geq T_2$
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	(*)

Sl. 2.1. Prikaz vrsta napona i načina ispitivanja podnosivosti. [11]

## 2.2. Karakteristike prenapona

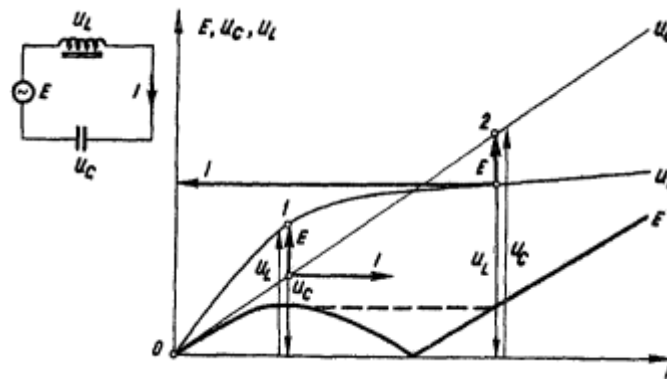
### 2.2.1. Privremeni prenaponi

Privremeni prenaponi su prenaponi relativno dugog trajanja. Najčešće su neprigušeni ili jako slabo prigušeni, za razliku od prijelaznih koji su većinom jako prigušeni i kratkog trajanja. Vrijeme trajanja prenapona je važno jer proboj izolacijskih plinova, tekućina ili krutina ovisi o duljini trajanja naponskog opterećenja. Izvori nastanka su: ferrantijev efekt, ferorezonancija, poremećaji uslijed kvarova ili kombinacije istih.

## 2. PRENAPONI

Ferrantijev efekt je pojava gdje se na kraju neopterećenog voda pojavljuje viši napon negoli na početku. To se događa jer kapacitivne struje poprečnih grana tvore negativan pad napona na uzdužnim induktivitetima.

Ferorezonancija je nagla promjena stanja koja izaziva prijelazne pojave s njihanjem energije u strujnom krugu te tako nastaju prenaponi. Mogu je izazvati kapaciteti vodova i nelinearni induktiviteti. Promjena napona nelinearnog induktiviteta s povećanjem struje određena je krivuljom magnetiziranja željeza, dok je napon na kapacitetu linearno proporcionalan struji. Pri malim strujama napon na induktivitetu veći je od napona na kapacitetu, dok je kod većih struja situacija obratna. Slika 2.2. prikazuje da ako se iz stanja označenog s brojem jedan malo poveća napon izvora, dolazi do naglog prijelaza u stanje točke dva gdje su naponi na induktivitetu i kapacitetu znatno veći.



Sl. 2.2. Prikaz ferorezonancije i naglog povećanja napona na induktivitetu i kapacitetu. [11]

Kod prenapona uslijed kvarova primjeri su zemljospoj i privremeni prenaponi uzrokovani ispadom tereta. Zemljospoj je slučaj prilikom kojeg dođe do spoja jedne od faza sa zemljom te tada u ostale dvije faze napon poraste s faze na linijsku vrijednost. Privremeni prenaponi uzrokovani ispadom tereta značajniji su za slabije razvijene mreže i obično ne prelaze 20% nazivne vrijednosti mreže.

### 2.2.2. Prenaponi vrlo brzog porasta čela

Vrlo brzi prenaponi posljedica su razvoja tehnologije visokonaponskih rasklopnih postrojenja koja su oklopljena metalom, a izolirana plinom sumporovim heksafluoridom ( $\text{SF}_6$ ). Na engleskom jeziku ta postrojenja poznata su pod nazivom Gas Insulated Switchgear. Prednost takvih rasklopnih postrojenja je što uz dobra izolacijska svojstva zauzimaju malo prostora, pa svoju primjenu pronalaze od krovova zgrada do hidroelektrana. U proizvodnji i instalaciji takvih

## 2. PRENAPONI

postrojenja važan fokus stavlja se na čistoću, jer nečistoće u plinu rezultiraju izobličenjem i porastom gradijenta električnog polja. Istraživanja o vrlo brzim prenaponima donose zaključak da su uzrokovani poremećajima poput:

- a) proboja između vodiča i oklopa ili dviju faza,
- b) sklopnih operacija.

Sumporov heksafluorid ( $\text{SF}_6$ ) spada u skupinu vrlo stabilnih plinova. Nije otrovan, korozivan niti zapaljiv te je bez boje i mirisa. Pri sobnoj temperaturi i tlaku nalazi se u plinovitom stanju. Također, unutar prekidača je u plinovitom stanju, jer u tekućem gubi svoja dielektrična svojstva. U tekuće stanje se dovodi kompresijom te se tako skladišti. Ima nekoliko puta veću dielektričnu čvrstoću od zraka, no to nije jedini razlog njegove primjene u visokonaponskim prekidačima, već pokazuje zavidne karakteristike pri kontroli i gašenju luka. Pri velikim temperaturama uslijed gašenja luka,  $\text{SF}_6$  se raspada, no uslijed tog procesa dolazi do nastanka iona koji hvataju elektrone i tvore negativne ione. Tim procesom se povećava dielektrična čvrstoća.

### 2.2.3. Prenaponi brzog porasta čela

Prenaponi brzog porasta čela najčešće nastaju uslijed pražnjenja električnih naboja u elemente mreže ili njihovu blizinu. Pražnjenje električnog naboja dolazi uz svjetlosni prasak te grmljavinu, a najčešće je praćeno kišom ili gradi. Prenaponi brzog porasta čela, zbog svog uzroka nastanka, poznatiji su pod nazivom atmosferski prenaponi. Atmosferski prenaponi spadaju u skupinu vanjskih prenapona, prijelaznog su karaktera, najčešće jako prigušeni i vrlo kratkog trajanja. Amplituda atmosferskih prenapona ovisi o energiji atmosferskog pražnjenja. Važno je analizirati ih, jer su u usporedbi sa sklopnim prenaponima mnogo veće amplitude. Gotovo 50% svih kvarova na mreži uzrokovano je atmosferskim pražnjenjima. Uporabom odgovarajućih zaštitnih mjera ograničavaju se te vrijednosti.

Tri su osnovna slučaja kada se pojavljuje atmosferski prenapon:

- a) Bliski udar s preskokom – pri udaru groma u stup ili zaštitno uže uz preskok na fazni vodič
- b) Bliski udar u fazni vodič bez preskoka – vrlo je opasan jer se u sustavu pojavljuju velike struje, a s tim i visoki naponi od kojih se sustav mora štititi
- c) Udaljeno mjesto udara – u ovom slučaju dolazi do induciranja prenapona, a mogu biti opasni za mreže niskog i srednjeg napona



## 2. PRENAPONI

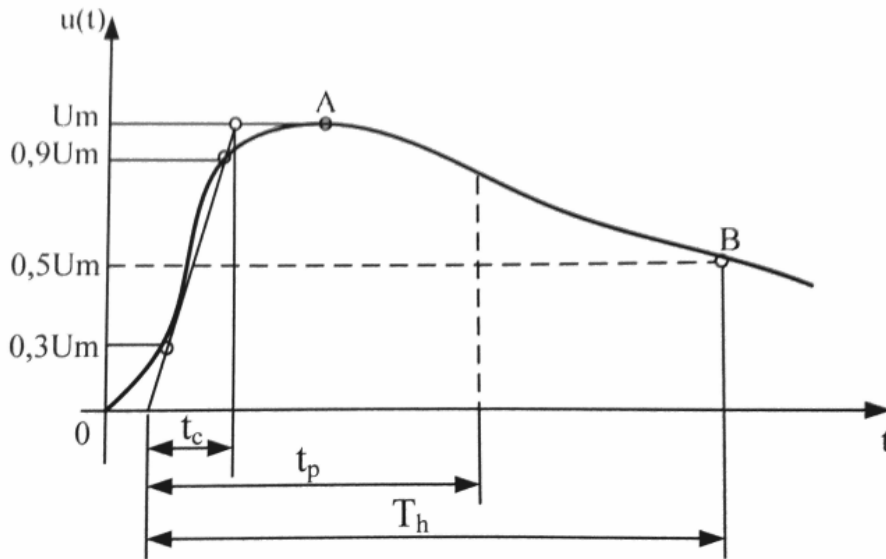
### 2.2.4. Prenaponi sporog porasta čela

Prenaponi sporog porasta čela su poznatiji pod nazivom sklopni prenaponi. Spadaju u skupinu unutrašnjih prenapona jer nastaju uslijed poremećaja u samom sustavu. Amplituda sklopnih prenapona ovisi isključivo o karakteristikama mreže. U daljnjem dijelu teksta bit će detaljnije objašnjeni.

### 2.3. Udarni napon

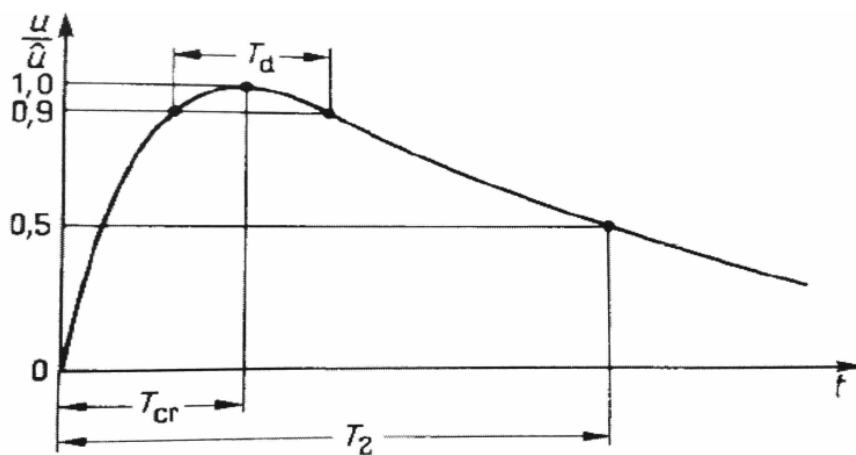
Svaka vrsta prenapona napreže izolaciju opreme na poseban način. Stoga je važno naglasiti da izolacija mora izdržati i znatno više napone od pogonskih, u protivnom bi svaka prijelazna pojava, poput sklapanja, izazvala kvarove na postrojenju. Koordinacija izolacije je skup mjera u cilju prevencije štete zbog povišenja napona te predstavlja pravovaljan izbor dielektrične čvrstoće opreme s obzirom na napone koji se mogu pojaviti, a provodi se tako da se preskoci lokaliziraju onamo gdje neće zadati štetu, ako se na ekonomičan način ne mogu otkloniti. Potrebno je odrediti stupanj izolacije opreme, a ono je određeno vrijednošću podnosivih napona, te vrijednošću i trajanju udarnih napona. Podnosivi napon je najviši napon koji uređaj može izdržati u trajanju od jedne minute i pri frekvenciji 50 Hz. Udarni napon su naponi koji se proizvode u ispitne svrhe. Vrlo kratkog su vremenskog trajanja i visoke vrijednosti s pomoću kojih se simulira utjecaj vanjskih (atmosferski prenaponi) i unutarnjih (sklopni prenaponi) prenapona na opremu u sustavu. Oblik udarnog vala prikazan na Slici 2.3. karakterističan je za ispitivanje atmosferskih prenapona. Strmi porast napona naziva se čelo, a njegovo trajanje  $t_c$  označeno je spojnicom točaka pri tjemenoj vrijednosti napona od 30% odnosno 90%. Vremensko razdoblje  $t_p$  označava vremensko zatezanje koje se sastoji od vremena potrebnog za početak, razvitak i pojačanje ionizacije. Hrbat predstavlja smanjenje napona do 50% vršne vrijednosti. Trajanje hrpta  $T_h$  počinje s početkom trajanja čela pa sve do smanjenja udarnog napona na 50% tjemene vrijednosti. Prema atmosferskim prenaponima propisan je, međunarodnim standardima, oblik udarnog napona 1,2/50  $\mu$ s, gdje 1,2  $\mu$ s označava vrijeme trajanja čela, a 50 $\mu$ s hrpta.

## 2. PRENAPONI



Sl. 2.3. Oblik udarnog napona karakterističan za atmosferske prenapone. [10]

Nešto drugačije izgleda udarni napon za ispitivanje naprezanja nastalih uslijed sklopnih prenapona koji je prikazan na Slici 2.4. Karakterizira ga vrijeme maksimuma  $T_{cr}$  koje označava vrijeme između početne i maksimalne vrijednosti i vrijeme trajanja hrpta  $T_2$  čiji je iznos jednak trajanja od početka udarnog vala do smanjenja na 50% tjemene vrijednosti. Valja spomenuti i veličinu  $T_d$  koja kazuje vrijeme u kojem napon prelazi 90% tjemene vrijednosti. Međutim, uz amplitudu, glavna je razlika između atmosferskih i sklopnih prenapona vrijeme trajanja čela i hrpta. Kod sklopnih ono je mnogo duže pa je međunarodnim standardnim propisan oblik udarnog napona 250/2500  $\mu s$ , gdje 250  $\mu s$  označava vrijeme porasta čela odnosno vrijeme maksimuma napona, dok druga brojka stoji za trajanje hrpta.



Sl. 2.4. Udarni napon karakterističan za sklopne prenapone. [11]

## 2. PRENAPONI

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

Udarni naponi, za laboratorijsko ispitivanje opreme, proizvode se s pomoću udarnih generatora. Udarni generatori sastoje se od kaskadno spojenih kondenzatora i kuglastih iskrišta. Uz svoju svrhu za ispitivanje sigurnosti elektroenergetskih mreža i postrojenja, od iznimne su važnosti u zrakoplovstvu gdje je nužno provjeriti izdržljivost opreme aviona pri djelovanju atmosferskih prenapona.

### 2.4. Koeficijent prenapona

Radi lakšeg uvida u visinu prenapona uvedem je pojam koeficijent prenapona  $K_P$ . Koeficijent prenapona je broj koji kazuje kolika je visina nastalog prenapona uspoređujući ga s maksimalnom odnosno vršnom vrijednošću faznog napona. Nema mjerne jedinice, najčešće se iskazuje samo brojem ili rjeđe postotkom.

$$K_P = \frac{U_P}{\sqrt{2} U_l} = 1.225 \frac{U_P}{U} \quad (2-1)$$

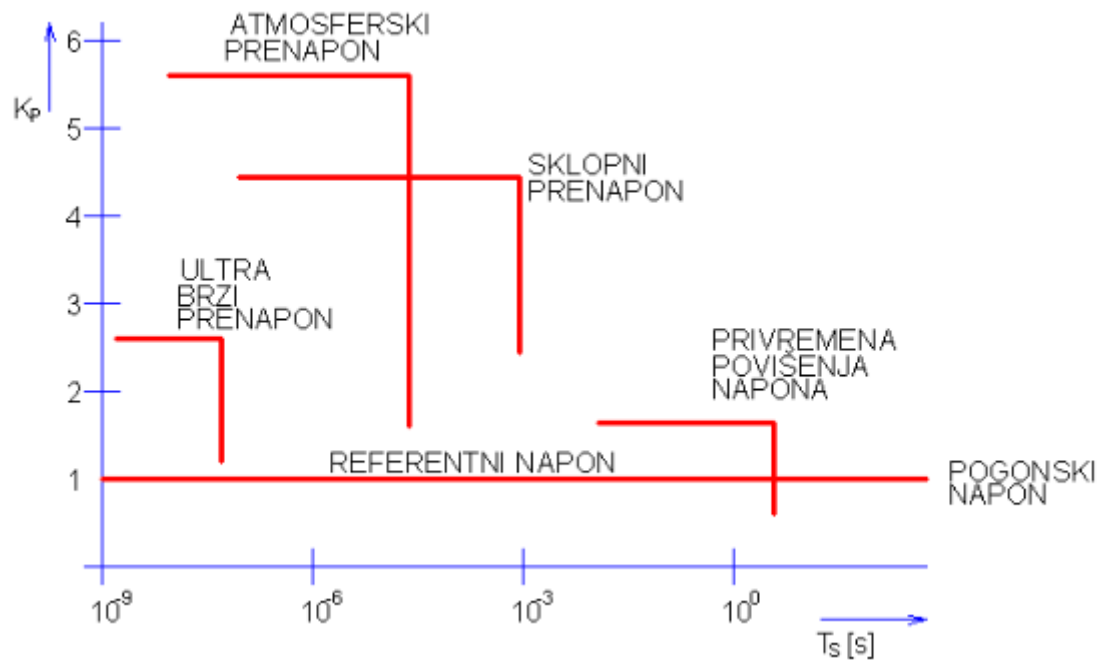
Gdje je:  $U_P$  – amplituda prenapona

$U_l$  – efektivna vrijednost linijskog napona

$U$  – efektivna vrijednost faznog napona

Za kraće vodove  $K_P$  približno iznosi 1.5-1.8, dok je za duže vodove i razvijenije mreže manjeg iznosa. Koeficijent prenapona je važno promatrati jer cilj je modelirati efikasan, ali i ekonomičan sustav.

## 2. PRENAPONI



Sl. 2.5. Podjela prenapona prema koeficijentu prenapona i trajanju.

## 3. SKLOPNI PRENAPONI

Elektroenergetski sustav (EES) je složeni tehničko-tehnološki sustav čija je svrha opskrba električnom energijom. Funkcionalno se može podijeliti u tri dijela: proizvodnja, prijenos i distribucija električne energije. U prijenosu i distribuciji važno je osigurati sigurnu i pouzdanu isporuku električne energije korisnicima. Katkad je potrebno da određeni dijelovi EES-a budu izvan pogona dok ostatak normalno radi. Ovo se ostvaruje galvanskim odvajanjem dijela sustava, odnosno fizičkim odvajanjem čvorova, što je ujedno i glavna zadaća sklopnih aparata.

Električni sklopni aparati obavljaju funkciju sklapanja u nekom elektroenergetskom postrojenju, mreži ili pak sustavu. Definicija sklapanja je uklapanje ili isklapanje strujnog kruga električne mreže, odnosno stavljanje u naponsko ili beznaponsko stanje. Prilikom prekidanja struje dolazi do povećanja vrijednosti napona u mreži u usporedbi s nazivnim vrijednostima napona, a pri prekidanju kratkog spoja i do mnogo većih povećanja struje u odnosu na nazivnu vrijednost struje mreže. Ovo je vrlo važno proučavati jer povišene vrijednosti struja i napona mogu uzrokovati oštećenja elemenata EES-a. Stoga, za ispravno projektiranje zaštite EES-a nužno je poznavati maksimalne pojavne vrijednosti struja i napona. Zaštita je važna jer sprječava nenadane ispade sustava, smanjuje novčane izdatke u vidu kvarova, a i što je najvažnije štiti osoblje.

Dakle, sklopni prenaponi posljedica su sklapanja uređaja, gubitka tereta, uklapanja ili nastanka kvara. Učestalost nastanka sklopnih prenapona ovisi o broju sklopnih operacija i kvarova u sustavu, dok je visina istih ovisna o konfiguraciji mreže, snazi kratkog spoja te karakteristikama opreme. Općenito, može se reći da su sklopni prenaponi manje vrijednosti u razvijenim EES-ima.

### 3.1. Električni luk

Sklopnim prenaponima prethodi električni luk. Električni je luk kratkotrajna pojava uzrokovana samostalnim izbijanjem elektriciteta između dvije elektrode. Fizikalna je osnova djelovanja sklopnih aparata, stoga je poznavanje svojstava luka vrlo važno da bi se njegove prednosti iskoristile, a mane ograničile. I dan danas nisu dani svi odgovori o teoriji luka, iako se s proučavanjem počelo početkom 19. stoljeća.

### 3. SKLOPNI PRENAPONI

#### 3.1.1. Nastanak

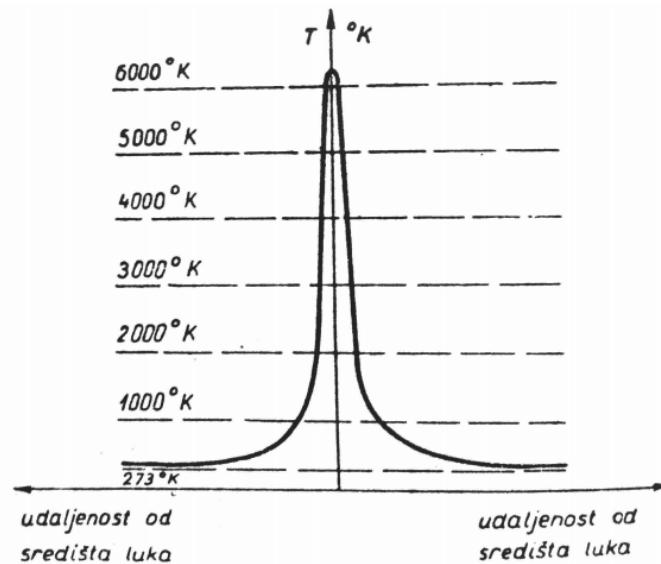
Zrak i drugi plinovi obično se smatraju vrlo dobrim izolatorima. Međutim, u električnom polju pokazuju malu vodljivost struje. Razlog tomu je djelovanje vanjskog ionizatora (radioaktivno zračenje, atmosfersko zračenje i slično). Ionizator je uzrok nastanka nosioca naboja među elektrodama. Između dvije elektrode na malom razmaku postupno se povećava napon. Povećanjem napona jača električno polje, a s njim se povećava broj nosioca naboja orijentiranih prema elektrodama. U početnoj fazi struja raste približno proporcionalno s naponom. Daljnjim povećanjem napona dolazi do približno konstantnog iznosa struje jer iznos novih slobodnih nosioca naboja ostaje konstantan. S daljnjim povećanjem napona dolazi do dodatnog povećanja brzine manjeg dijela nosioca naboja, što za posljedicu ima vlastiti mehanizam udarne ionizacije. Do ovog dijela govori se o nesamostalnom izbijanju koje se može prekinuti uklanjanjem vanjskog ionizatora. Daljnjim povećanjem vodljivosti započinje samostalno izbijanje. Samostalno izbijanje je stanje u kojem se vođenje struje može nastaviti bez prisustva nove energije izvana. Kod samostalnog izbijanja prvo dolazi do pojave titnjavog izbijanja koje se očituje po plavoj mjestimičnoj svjetlosti uz površinu elektroda uz tiho zujanje i miris ozona. Daljnjim povećanjem napona dolazi do pramenastog izbijanja. Pramenasto izbijanje je pojava vlaknastih pramenova oko površine elektrode koji ne dosežu susjednu elektrodu. Pri još većem porastu dolazi do preskoka među elektrodama koje se prepoznaje po iskri ili električnom luku, praćeno praskom. Električni luk predstavlja trajni proboj dielektrika pri kojemu gustoća struje jako poraste, a pad se napona na katodi mnogo smanji.

Dakle, električni luk je samostalno izbijanje elektriciteta u plinovima, praćeno visokom temperaturom i velikom gustoćom struje te pojavom usijane katodne mrlje. Uz to, karakteristična je jaka fotoelektronska i termoelektronska emisija. Otpor električnog luka omskog je karaktera, odnosno, nul-točke napona i struje vremenski se podudaraju. Za razliku od standardnih metalnih otpora kod kojih s porastom struje raste pad napona, kod električnog luka to nije slučaj. Pad napona na električnom luku smanjuje se povećanjem struje jer povećanjem struje intenzivnija je ionizacija, a tako i opadanje otpora luka.

Isklapanjem odnosno uklapanjem sklopke kroz koju teče struja dolazi do pojave kratkotrajnog električnog luka među kontaktima sklopke. Pojava električnog luka ima za posljedicu grijanje kontakata u toj mjeri da dolazi do taljenja i isparavanja, a razlog je velika gustoća struje na dodirnoj površini netom prije sklapanja. Zbog toga prostor među kontaktima postaje vodljiv pa struja nastavlja protjecati iako je sklopka isklopila te shodno tomu kontakti rastavili. Vodljivost

### 3. SKLOPNI PRENAPONI

raste zbog termoionizacije koja je ishod visokih temperatura. Najviše temperature vladaju u jezgri tj. središtu luka dok se s udaljavanjem od jezgre naglo smanjuju (Slika 3.1.). Presjek luka proporcionalan je s jačinom struje.



Sl. 3.1. Temperatura električnog luka u ovisnosti o udaljenosti od jezgre. [7]

Kao što je ranije rečeno, električni luk je neizostavna pojava. No, teoretski gledano, ako se struja prekine trenutno, to znači da ni luk nije nastao, što isto dovodi do beskonačno velike vrijednosti prenapona. Električni luk omogućava da se magnetska energija akumulirana u induktivitetima kruga dijelom potroši u toplinsku energiju luka.

#### 3.1.2. Utjecaj otpora aparata

Uz pretpostavku da se vodljivost sklopnog aparata  $\frac{1}{R_{SA}}$  linearno mijenja od početne vrijednosti  $\frac{1}{R_0}$  do konačne tj. teoretske vrijednosti  $\infty$  za vrijeme T, dobiva se sljedeća relacija:

$$\frac{1}{R_{SA}} = \frac{1}{R_0} \left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad (3-1)$$

Istom odgovara promjena otpora od vrijednosti  $R_0$  do  $\infty$  vrijednosti (kada je  $t=T$ ):

$$R_{SA} = R_0 \frac{T}{T-t} \quad (3-2)$$

Iz ravnoteže napona za čisto induktivni strujni krug dobiva se relacija:

$$U = iR_0 \frac{T}{T-t} + L \frac{di}{dt} \quad (3-3)$$

### 3. SKLOPNI PRENAPONI

Rješenjem derivacije dolazi se do izraza za konstantu K, koja je osnova gašenja luka:

$$K = \frac{R_0 T}{L} \quad (3-4)$$

U trenutku gašenja na kontaktima se javlja napon gašenja  $U_g = p_A(t = T)$ . Kako je njegova vrijednost ovisna o vremenu prekidanja ovisna je i o veličini K:

$$U_g = \frac{U}{1 - \frac{1}{K}} \quad \text{uz } K > 1 \quad (3-5)$$

$$U_g = \infty \quad \text{uz } K \leq 1 \quad (3-6)$$

Kod sklopki i prekidača zbog velike brzine prekidanja, učestalo je  $T < \frac{L}{R_0}$ , a tako  $K < 1$  što rezultira beskonačnim naponom gašenja. Ovdje pomaže električni luk koji se pojavljuje na otvorenim kontaktima te smanjuje otpor  $R_{SA}$  i produljuje vrijeme prekidanja T.

Dosadašnje se razmatranje odnosilo na čisto induktivni strujni krug. Dodajući otpor u strujni krug dolazimo do sljedeće relacije za ravnotežu napona:

$$U = p_A + Ri + L \frac{di}{dt} \quad (3-7)$$

Daljnijim rješavanjem dolazi se do istog uvjeta za napon gašenja i zaključka da napon gašenja ne ovisi o otporu kruga R.

#### 3.1.3. Gašenje luka

Energija luka definirana je relacijom:

$$W_l = \int_0^{t_l} u_l i dt \quad (3-8)$$

gdje je:

- $W_l$  – energija luka [J]
- $u_l$  – napon među kontaktima [V]
- $i$  – struja protjecana među kontaktima [A]
- $t_l$  – vrijeme trajanja luka [s]

Proširivši prethodnu relaciju, dolazi se do sljedeće relacije za energiju luka:

$$W_l = \int_0^{t_l} u_l i dt + \frac{Li_t^2}{2} \quad (3-9)$$



### 3. SKLOPNI PRENAPONI

Gdje je:

- $u_i$  – napon izvora [V]
- $L$  – induktivitet mreže [H]
- $i_t$  – struja taljenja [A]

Lijevi pribrojnik označava energiju koju daje generator, a desni predstavlja magnetsku energiju mreže. Zbroj je jednak energiji gašenja luka. Što je veća energija gašenja luka, teže ga je ugaziti jer se razvija više topline.

Gašenje luka složen je proces na kojeg utječu magnetske, električne, kemijske, hidrodinamičke i termodinamičke pojave. Koja će pojava odigrati glavnu ulogu tj. imati najveći utjecaj zavisi o vrsti sklopke te mediju za gašenje luka. Osnovni uvjet za gašenje luka je odvođenje te topline jer o toplini ovisi temperatura, dok o temperaturi ovisi vodljivost materijala. Kraće vrijeme trajanja luka znači povoljniji uvjeti i prilike u sklopki. Općenito, za sve slučajeve vrijedi da je za gašenje luka potrebno:

- a) U kratkom vremenskom razdoblju povećati udaljenost među kontaktima zbog smanjenja energije luka
- b) Smanjiti presjek luka, što je posebice važno za gašenje luka kod istosmjernih struja jer smanjenjem presjeka povećava se pad napona luka
- c) Osigurati učinkovito odvođenje topline

Visina i frekvencija prekidnog napona utječu na konačno gašenje luka. Veći prekidni napon i veća frekvencija znače teže postizanje konačnog gašenja. Frekvencija prekidnog napona određena je karakteristikama mreže i naziva se vlastitom frekvencijom mreže. Ovisna je o veličini mreže, izvedbi generatora te radi li se o nadzemnim vodovima ili kabelima (kod kabela je produkt LC veći nego kod nadzemnih vodova).

Za uspješno gašenje luka od ključne je važnosti izabrati onaj medij u kojem luk ima što veći pad napona. Tu svoju primjenu pronalaze ulje i voda zbog velikih količina vodika u sebi. Vodik ima 13,5 puta veći koeficijent relativnog pada napona u odnosu na zrak.

### 3. SKLOPNI PRENAPONI

**Tab. 3.1.** Relativni pad napona u ovisnosti o mediju. [7]

	Relativni pad napona po jedinici duljine luka
Zrak	1
Dušik	1
Ugljik-dioksid	1,7
Kisik	2,3
Vodena para	4,4
Vodik	13,5

#### 3.2. Prekidanje struje

Povratni napon nastoji ponovno uspostaviti kontakt među djelomično deioniziranim medijem otvorenih kontakata. No, uz povratni napon glavni je činilac i prekidna struja koja prolazi lukom. O njenom iznosu ovisi stupanj ionizacije među otvorenim kontaktima, kojima je nužno u što kraćem vremenskom razdoblju vratiti dielektrična svojstva. Prekidna se struja je iznosa efektivne struje simetrične komponente u trenutku javljanja luka, a najveća vrijednost iste za koju je aparat dimenzioniran naziva se prekidna moć. Da bi iznos prekidne moći imao smisao treba u razmatranje uzeti uz kakav maksimalan povratni napon se pojavljuje te uz koju najveću aperiodičku komponentu struje. Budući da povratni napon i prekidna struja zajedno utječu na prekidanje luka njihov se umnožak može smatrati mjerilom naprezanja sklopnih aparata. Na ovaj se način uvodi novi pojam koji nosi naziv prekidna snaga. Kod trofaznih sustava uz navedena dva faktora, relacija se množi s  $\sqrt{3}$ .

Kako je ranije rečeno, prekidanje struje strujnog kruga ima za posljedicu povišene vrijednosti napona u mreži, dok prekidanje struje kratkog spoja ima za posljedicu jako povišene vrijednosti struja. Kako povišene vrijednosti struja i napona mogu uzrokovati neželjene pojave na mreži, važno i nužno je proučavanje i analiziranje istih.

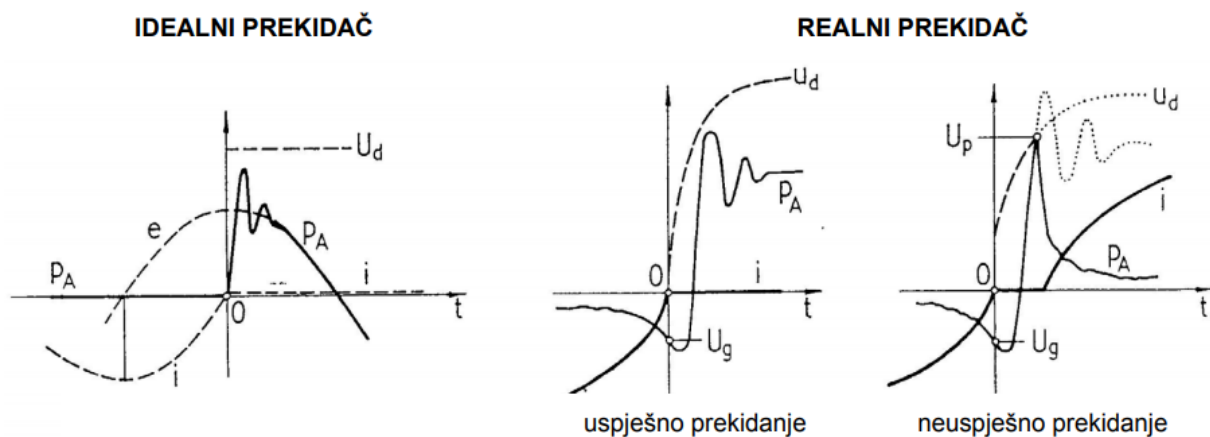
Metoda gašenja električnog luka izmjenične i istosmjerne struje značajno se razlikuje. Kod izmjenične struje slučaj je jednostavniji jer napon mreže i struja luka prirodno tj. po sinusoidi zauzmu vrijednost nula nakon svake poluperiode ( $\pi$ ). U trenutku kada struja zauzme vrijednost

### 3. SKLOPNI PRENAPONI

nula, luk se sam gasi, nužno je jedino osigurati da se ponovno ne upali. Slučaj istosmjernje struje kompliciraniji je jer struja nikada sama ne zauzima vrijednost nula. Stoga je nužno stalno povećavati vrijednost otpora luka. Povećanjem otpora, smanjuje se struja kruga. Isto je potrebno činiti sve dok struja ne zauzme neku minimalnu vrijednost gdje je luk stabilan. Kod izmjeničnih struja potrebno je osigurati da se luk ponovno ne upali. To se događa, ako je napon mreže veći od napona potrebnog za paljenje luka odnosno probojnog napona. Stoga je nužno osigurati suprotnu situaciju tj. da je probojni napon veći od napona mreže.

Prilikom prekidanja izmjenične struje idealnim prekidačem ne bi dolazilo do pojave električnog luka. Idealni prekidač trenutno otvara kontakte te osigurava potreban razmak. Otpor među kontaktima se trenutno mijenja s vrijednosti  $R_k = 0$  na vrijednost  $R_k = \infty$ .

U realnom slučaju, probojni napon se mijenja od vrijednosti  $u_d = 0$  na vrijednost  $u_d = U_d$  u trenutku prekidanja struje. Vrijednost  $U_d$  definirana je vrstom dielektrika i udaljenošću kontakata. Na Slici 3.3. objašnjena je Slepianova teorija utrke. Slepianova teorija utrke kazuje da je nužan tako brz porast probojnog napona  $u_d(t)$  da je krivulja probojnog napon neprestano iznad krivulje napona kontakata odnosno povratnog napona  $u_p(t)$ . U slučaju obratne situaciju dolazi do ponovno paljenja luka te električna struja ponovno počinje teći (na slici dolje skroz desna situacija).

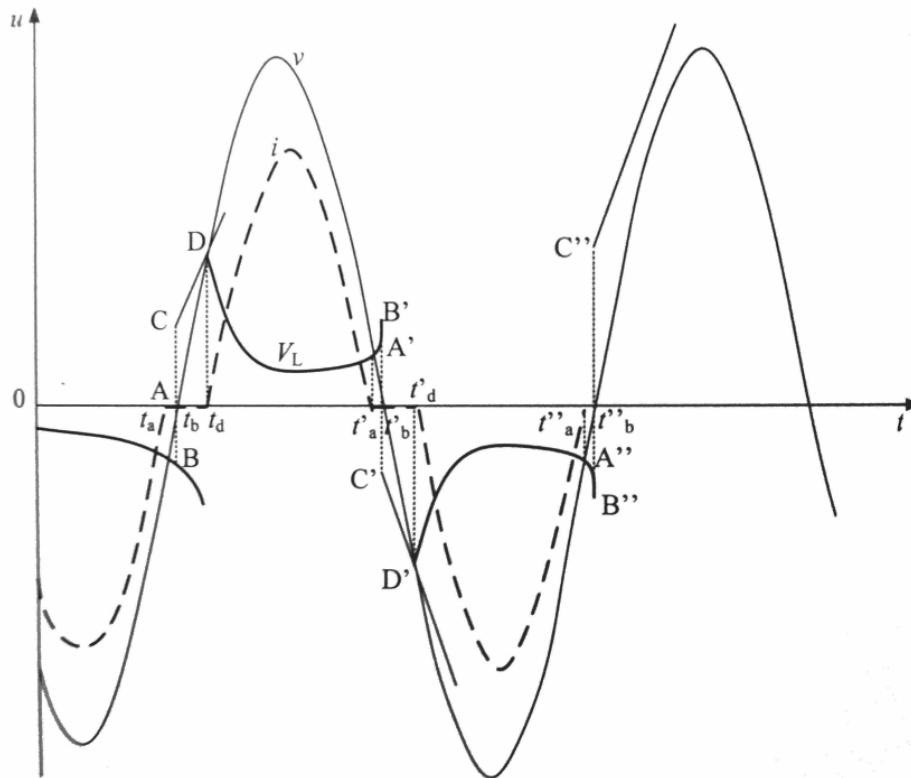


Sl. 3.3. Prekidanje struje realnim i idealnim prekidačem. [10]

### 3. SKLOPNI PRENAPONI

#### 3.2.2. Prekidanje struje u čisto omskom krugu

U čisto omskog omskom strujnom krugu ( $\cos\varphi = 1$ ) postoji samo djelatni otpor. Stoga, napon mreže i struja koja protječe lukom su u fazi. Napon luka je također u fazi sa strujom. Struja će teći krugom sve dok je napon mreže veći od napona luka. Sa smanjenjem struje napon luka raste te se izjednači s naponom mreže. Izjednačenje napona luka i napona mreže odgovara točki A, odnosno trenutku  $t_a$  kada se luk gasi, a struja prestaje teći. Daljnjim povećanjem razmaka među kontaktima te odvođenjem topline povećava se električna čvrstoća. Električna čvrstoća je ovisna o tlaku i razmaku među kontaktima. Smanjenjem temperature smanjuje se tlak (Gay-Lussacov zakon). Povećanjem električne čvrstoće raste napon luka. Povećanje električne čvrstoće opisano je pravcem kroz točke A i B. Točke B i C simetrične su s obzirom na os apscise, a pravac kroz točke C i D simetričan je pravcu kroz točke A i B. U trenutku  $t_d$ , električna čvrstoća se izjednači s naponom mreže pa se luk ponovno pali, a struja počinje teći. S povećanjem struje napon luka pada. Opadanjem napona mreže opada i struja te tako raste napon luka. U trenutku  $t'_a$  ponovno dolazi do gašenja luka i ponavljanja opisanog procesa. Daljnjim odvođenjem topline i povećavanjem razmaka električna čvrstoća poraste u toj mjeri da napon mreže nije dovoljan za uspostavu luka.

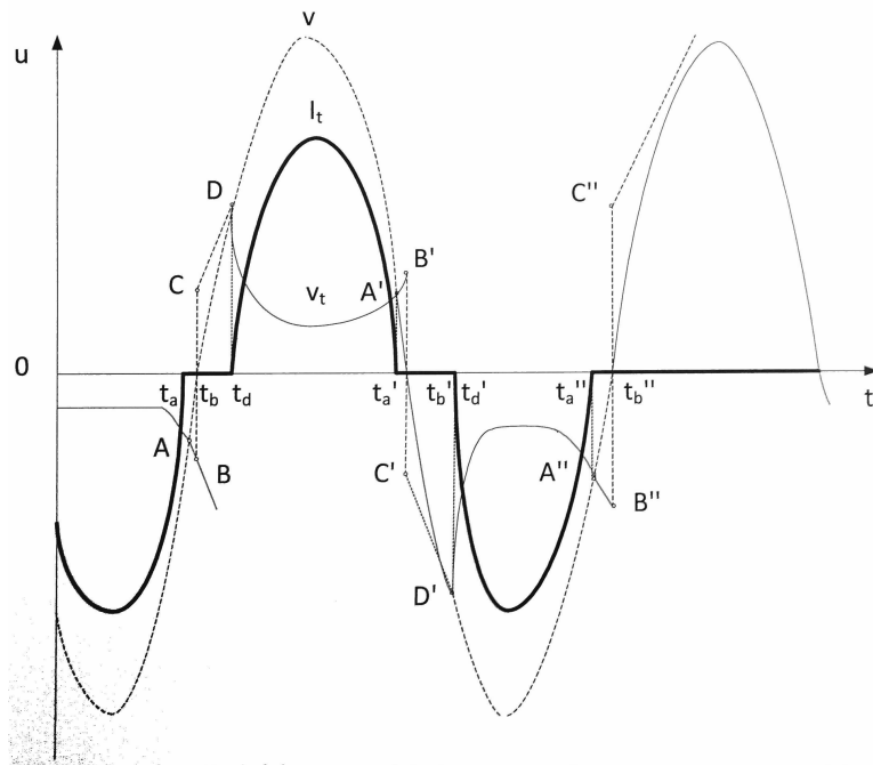


Sl. 3.4. Promjena napona luka, struje luka te napona mreže za djelatni strujni krug. [7]

### 3. SKLOPNI PRENAPONI

#### 3.2.3. Prekidanje struje u čisto induktivnom strujnom krugu

U čisto induktivnom strujnom krugu ( $\cos\varphi = 0$ ) struja kasni za naponom za kut  $\varphi = 90^\circ$ . Gašenje električnog luka zbog toga je nešto drugačije nego kod čisto omskog strujnog kruga. Pravcima kroz točku A, odnosno točke B i C opisana je električna čvrstoća. Luk se gasi kada struja zauzme vrijednost nula što odgovara trenutku  $t_a$ . U tom trenutku napon kontakata jednak je dužini OA, dok je vrijednost napona mreže maksimalna. Napon među kontaktima treba praktički trenutno poprimiti vrijednost napona mreže. Zbog kapaciteta mreže, napon luka ne može trenutno narasti na vrijednost napona mreže. Rast napona kontakata opisana je pravcem kroz točke A i C. U trenutku  $t_c$  napon među kontaktima jednak je električnoj čvrstoći pa se luk pali i gori sve dok struja ponovno ne zauzme vrijednost nula. Proces se ponavlja sve dok električna čvrstoća ne poprimi dovoljno veliku vrijednost koja onemogućuje ponovno paljenje luka. Nakon konačnog gašenja luka, dolazi do prijelazne pojave, poslije koje napon kontakata poprima vrijednost napona mreže. Prijelazna pojava ovisi o kapacitetu i induktivitetu mreže.



Sl. 3.5. Promjena napona luka, struje luka te napona mreže za induktivni strujni krug. [7]

### 3. SKLOPNI PRENAPONI

#### 3.2.4. Prekidanje struje u čisto kapacitivnom strujnom krugu

U čisto kapacitivnom strujnom krugu, struja prethodi naponu za kut  $\varphi = 90^\circ$ . Električni luk se gasi kada struja zauzme vrijednost nula, u tom trenutku kondenzator ostaje nabijen na napon izvora, što znači da iznosi  $\pm E$ . Zbog jednostavnosti, uzet će se trenutak  $t=3\pi/2$  gdje je napon na kondenzatoru nabijen na iznos  $-E$ .

$$e_c(t) = -E \quad (3-10)$$

Za napon izvora vrijed izraz:

$$e(t) = E \cos(\omega t) \quad (3-11)$$

Dakle, za napon među kontaktima odnosno povratni napon vrijedi izraz:

$$u_p(t) = e(t) - e_c(t) = E(1 - \cos(\omega t)) \quad (3-12)$$

U trenutku prekidanja struje povratni napon jednak je nuli. Nakon poluperiode doseže vrijednost  $2E$ . Što znači da ako nije postignuta dovoljna električna čvrstoća, može doći do ponovnog paljenja luka.

#### 3.2.5. Prekidanje struje u mješovitom strujnom krugu

Princip je sličan gore opisanim procesima. Povratni napon ovisi o doprinosu serijskih i paralelnih elemenata. Ako je udio paralelne komponente u ukupnoj impedanciji veći prekidanje struje bit će olakšano. Dok, ako je udio serijske komponente veći, strmina povratnog napona bit će izraženija, a s tim i teže gašenje luka.

#### 3.2.6. Prekidanje struje u istosmjernom strujnom krugu

U istosmjernom strujnom krugu struja nikad sama ne zauzme vrijednost nula. Da bi se struja uspješno prekinula, nužno ju je neprestano smanjivati. Smanjivanje struje se čini povećanjem otpora kontakata.

Kriterij nestabilnosti luka kazuje da porast struje mora biti negativan, a prema tome i pad napona na induktivitetu.

Prema strujnom krugu sa slike jednažba je jednaka:

$$E = Ri + L \frac{di}{dt} + u_p(t) \quad (3-13)$$

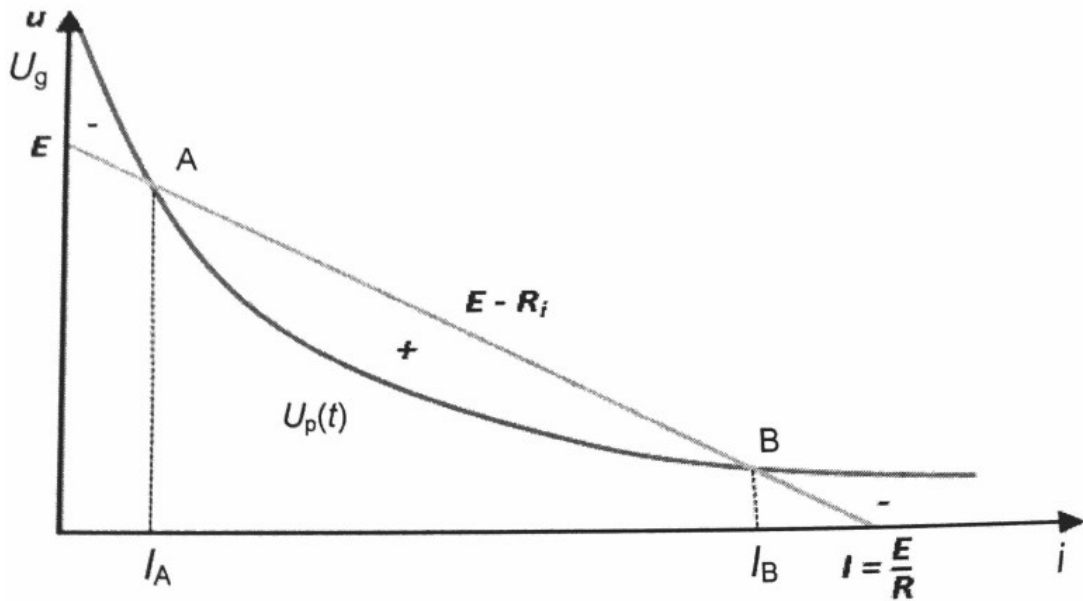
### 3. SKLOPNI PRENAPONI

$$L \frac{di}{dt} = E - Ri - u_p(t) \quad (3-14)$$

Uvjet kriterija nestabilnosti luka:

$$u_p(t) > (E - Ri) \quad (3-15)$$

$$L \frac{di}{dt} < 0 \quad (3-16)$$



Sl. 3.6. Kriterij nestabilnosti luka za istosmjerni strujni krug. [10]

Na Slici 3.6. je prikazan pravac i krivulja. Pravac označava napon koji daje mreža. Krivulja označava napon između kontakata. Njihova razlika jednaka je naponu induktiviteta. Točke A i B sjecišta su pravca i krivulje, a označavaju situacije u kojima je napon na induktivitetu jednak nuli. Između točaka nalazi se oznaka '+' koja prikazuje opseg u kojem je pad napona na induktivitetu pozitivan. Lijevo od točke A i desno od točke B nalaze se oznake '-'. U točki A teče struja  $I_A$ . Ako se iznos struje  $I_A$  smanji rezultat je negativan pad napona na induktivitetu, a time i smanjenje struje sve dok se ne postigne gašenje luka. U točki B teče struja  $I_B$ . U slučaju protjecanja manje struje od struje  $I_B$  dolazi do pozitivnog pada napona na induktivitetu. Točka A se naziva točkom labilnog gorenja luka, a točka B stabilnog gorenja luka. Smanjenje jakosti struje ostvarivo je smanjenjem induktiviteta  $L$  ili povećanjem otpora  $R$ . Povećanjem otpora  $R$  uz konstantni induktivitet  $L$  podiže se krivulja povratnog napona, a s tim i napon na induktivitetu. Smanjenjem induktiviteta  $L$  uz nepromijenjen otpor, induktivni pad napona se ne mijenja, što znači da se mora povećati promjena struje po vremenu  $\frac{di}{dt}$ . Vremenska konstanta direktno utječe

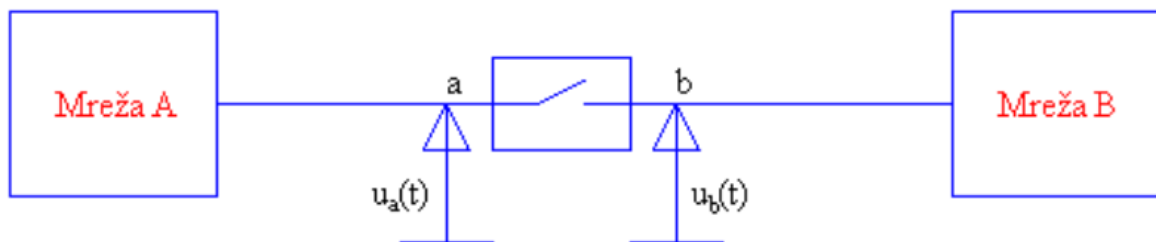
### 3. SKLOPNI PRENAPONI

na trajanje električnog luka. Manja vremenska konstanta ( $\tau = \frac{L}{R}$ ) znači veća promjena struje po vremenu.

#### 3.3. Povratni napon

EES-u predstavlja nelinearnu dinamičku cjelinu, gdje sklopni aparati prekidaju i uspostavljaju strujni krug, kvarovi nastaju te se otklanjaju, generatori mijenjaju svoju proizvodnju ovisno o zahtjevima potrošača, dok su svi elementi sustava izloženi atmosferskim pražnjenjima. Nakon svakog spomenutog događaja sustav mora u vrlo kratkom vremenskom roku iz jednog stacionarnog stanja preći u drugo. Između dva stacionarna stanja sustava, događa se prijelazna (tranzijentna) pojava. Tijekom prijelaznog stanja dolazi do povećanja vrijednosti napona i struja, gdje su najizraženije pojave prijelaznih prenapona. Može se kazati da je sustav pretežito induktivnog karaktera uz prisustvo kapaciteta pa u sustavu dolazi do titranja napona među kontaktima neposredno nakon prekidanja struje. Taj napon poznatiji je pod nazivom prijelazni povratni napon (PPN).

Na primjeru dvije aktivne mreže A i B između kojih se nalazi prekidač objasniti će se pojam prijelazni povratni napon. Nakon što prekidač prekine struju, sustav se prilagođava novom stacionarnom stanju što je praćeno nezavisni procesima u dijelu mreže A i dijelu B.



Sl. 3.7. Shema analiziranog sustava.

Rezultat je prijelazni povratni napon koji se definira:

$$|u_p(t)| = |u_a(t) - u_b(t)| \quad (3-17)$$

Nakon završetka prijelazne pojave, tj. uspostave novog stacionarnog stanja, među kontaktima se uspostavlja povratni napon pogonske frekvencije koji je jednak razlici otvorenih kontakata.



### 3. SKLOPNI PRENAPONI

Dijelovi i pojmovi vezani uz povratni napon:

- Početni prijelazni povratni napon (PPPN) – povratni napon u vremenskom rasponu od nekoliko mikrosekundi
- Prijelazni povratni napon (PPN) – povratni napon u vremenskom rasponu od nekoliko milisekundi. Izrazito je prijaznog karaktera.
- Strmina povratnog napona ( $S_p$ ) – određena je omjerom prve amplitude povratnog napona ( $U_m$ ) i vremena do postizanja iste ( $t_m$ ).

$$S_p = \frac{U_m}{t_m} \quad (3-18)$$

- Faktor prvog pola – pojavljuje se kod trofaznih mreža. Električni luk u trofaznim mrežama se nikad ne gasi istovremeno u svim fazama. Koristi se da bi se uzelo u razmatranje veća naprezanja na polu onog prekidača koji je prvi prekinuo struju.
- Faktor snage – fazni pomak među naponima u trenutku isklapanja kontakata

$$\cos\varphi = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{X}{R} \right) \quad (3-19)$$

gdje je:

- R – djelatni otpor mreže [ $\Omega$ ]
- X – reaktancija mreže [ $\Omega$ ]

Sklopni prenaponi spadaju u skupinu unutrašnjih prijelaznih povratnih prenapona. Uzrok im je nagla promjena uvjeta u strujnom krugu tj. promjena uklopnog stanja. U odnosu na atmosferske prenapone, kod sklopnih je amplituda određena unutaršnjom energijom kruga. Dakle, amplituda sklopnih prenapona je ograničena i ovisna o nazivnom naponu mreže.

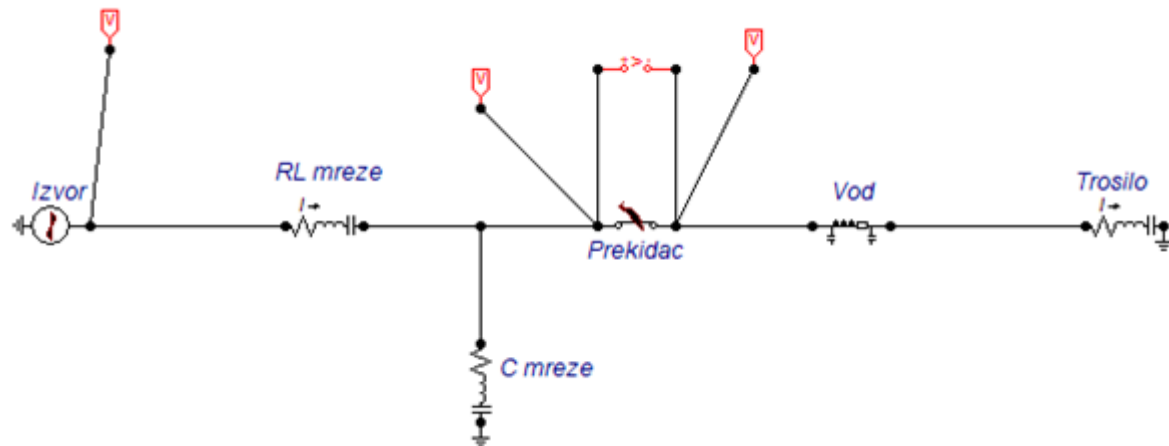
Sklopni prenaponi spadaju u kategoriju prenapona sporog porasta čela. Vrijeme trajanja čela dulje je u odnosu na atmosferske, reda veličine nekoliko ms. Mogu se podijeliti prema razlogu uzrokovanja:

- a) Isklapanje malih induktivnih struja
- b) Isklapanje malih kapacitivnih struja
- c) Uklapanje neopterećenog voda
- d) Isklapanje kvarova
- e) Isklapanje voda s brzim ponovnim uključanjem

### 4. PRIMJERI NASTAJANJA SKLOPNIH PRENAPONA

#### 4.1. Jednofazno isklapanje opterećenog voda

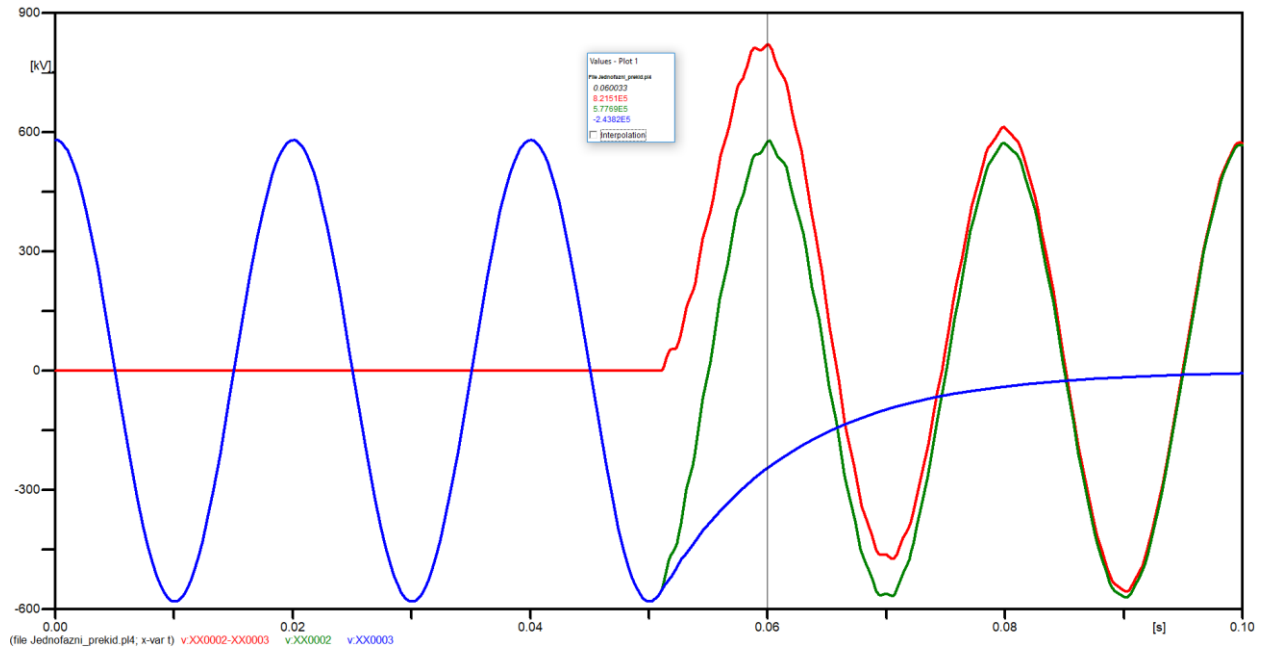
Slučaj u kojem se isklapa vod opterećen pretežito induktivnim teretom. Nadomjesna shema je dana Slikom 4.1. Primjer sustava izrađen je u programu ATP EMTP (engl. *Electromagnetic Transients Program*).



Sl. 4.1. Nadomjesna shema isklapanja voda opterećenog pretežno induktivnim teretom.

Nakon isklapanja prekidača u trenutku 0.05s, uz pretpostavku da je luk ugašen, dolazi do pojave prenapona između kontakata. Prenapon je jednak razlici napona lijevo i desno od prekidača. Lijevo je smješten izvor i kako je vidljivo sa slike, nakon isklapanja lijevo ostaje sinusni napon izvora uz određene zanemarive pojave viših harmonika. Na grafu sa Slike 4.2., lijevo od prekidača prikazano je krivuljom zelene boje, uz poklapanja s plavom bojom do trenutka 0.05s. Desno od prekidača su vod i trošilo, a napon na njima je prikazan plavom bojom. Zbog prisustva kapaciteta, nakon isklapanja, taj napon ne može istog trenutka zauzeti vrijednost nula, već je potrebno određeno vrijeme da se kapacitet izbije. Kako on ne može trenutno zauzeti vrijednost nula, na kontaktima prekidača javlja se prenapon. Prenapon je označen crvenom bojom.

#### 4. PRIMJERI NASTAJANJA SKLOPNIH PRENAPONA

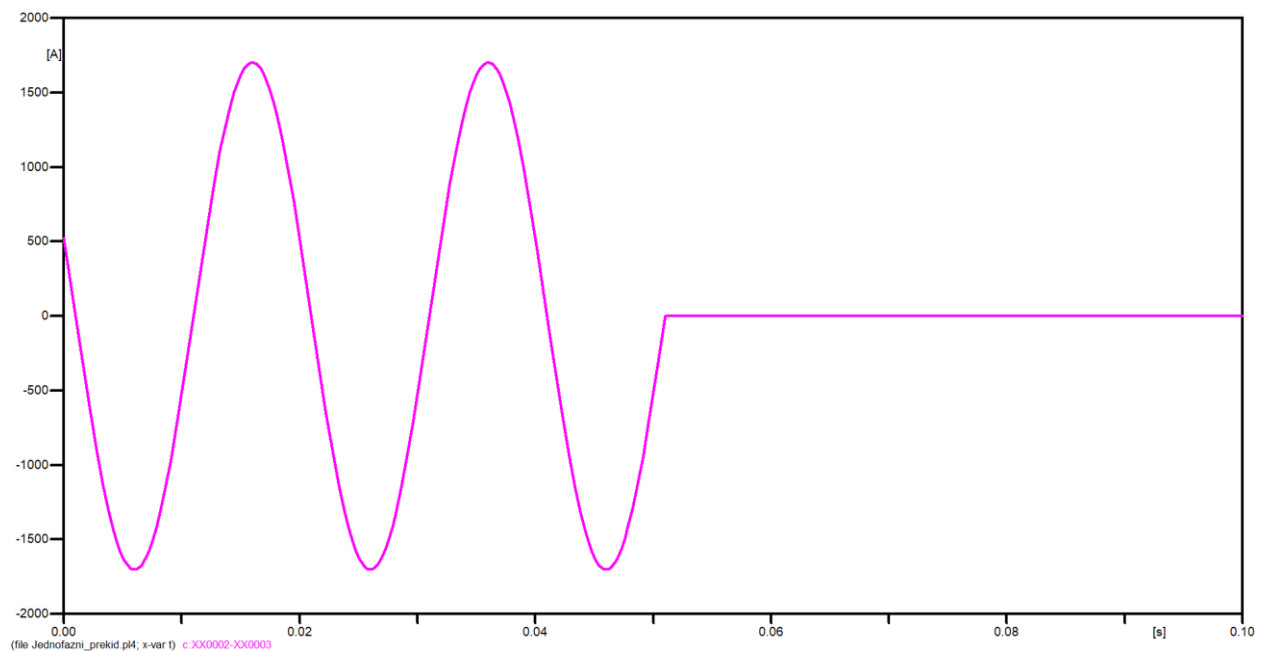


Sl. 4.2. Napon mreže, napona trošila te nastalog prenapona.

Koeficijent prenapona:

$$K_p = \frac{U_P}{U_{MAX}} = \frac{821510}{565685} = 1.45 \quad (4-1)$$

Analiza po pitanju struje je nešto jednostavnija. Prekidač odvaja svoje kontakte kada struja prirodno prolazi kroz nulu, a to je upravo trenutak 0.05s.



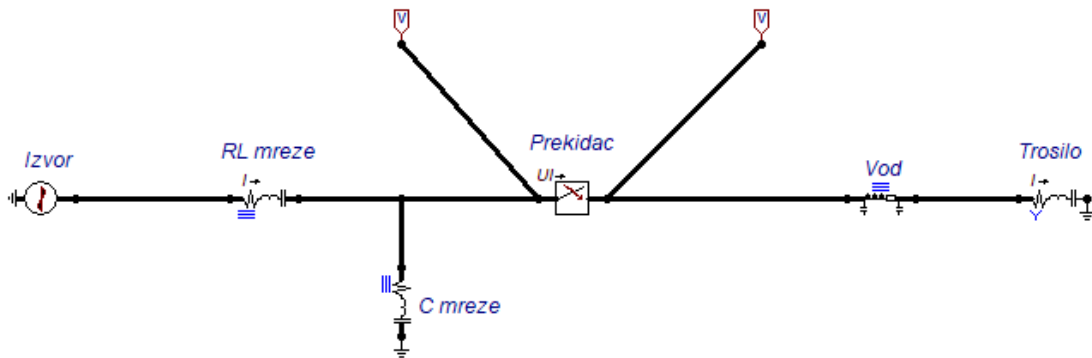
Sl. 4.3. Struja prekidača.

#### 4. PRIMJERI NASTAJANJA SKLOPNIH PRENAPONA

Kada se otvore kontakti struja kroz trošilo ne prestaje teći istog trenutka, a razlog je induktivitet. Induktivitet se suprotstavlja nagloj promjeni struje, pa tako zbog induktiviteta trošila struja teče određeno vrijeme dok se ne ustali na nuli.

### 4.2. Trofazno isklapanje opterećenog voda

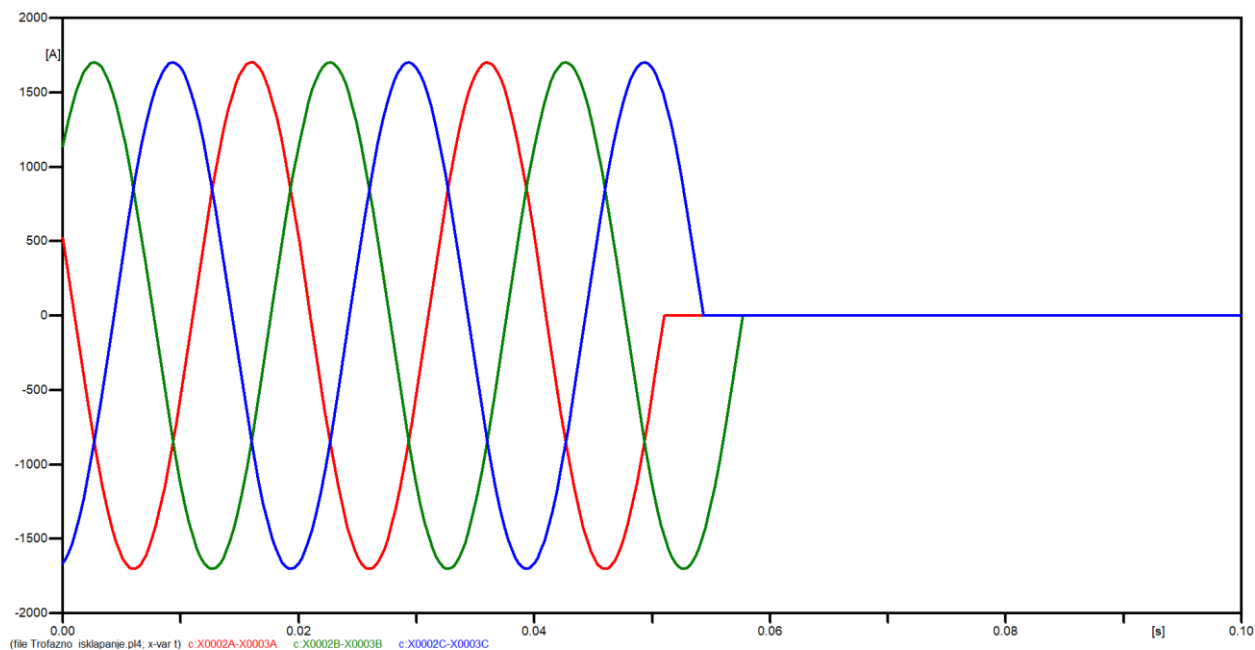
Trofazno isklapanje opterećenog voda sastoji se od trofaznog simetričnog izvora i trofaznog simetričnog trošila, između koji je trofazni vod. Nadomjesna shema dana je Slikom 4.4. Primjer sustava izrađen je u programu ATP EMTP.



Sl. 4.4. Nadomjesna shema trofaznog opterećenog voda.

Kod trofaznog isklapanje opterećenog voda prvo isklapa jedan prekidač. Prvi isklapa u trenutku 0.05s. Drugi prekidač isklapa za  $\frac{2\pi}{6}$ , odnosno kako je perioda 0.02 sekunde, isklapa za 0,0033 sekunde nakon prvog. Drugi isklapa prekidač faze C, jer njena struja prije zauzme vrijednost nula u odnosu na fazu B. Treći prekidač odnosno faza B isklapa za  $\frac{2\pi}{6}$  u odnosu na drugi prekidač. Isto je prikazano Slikom 4.5.

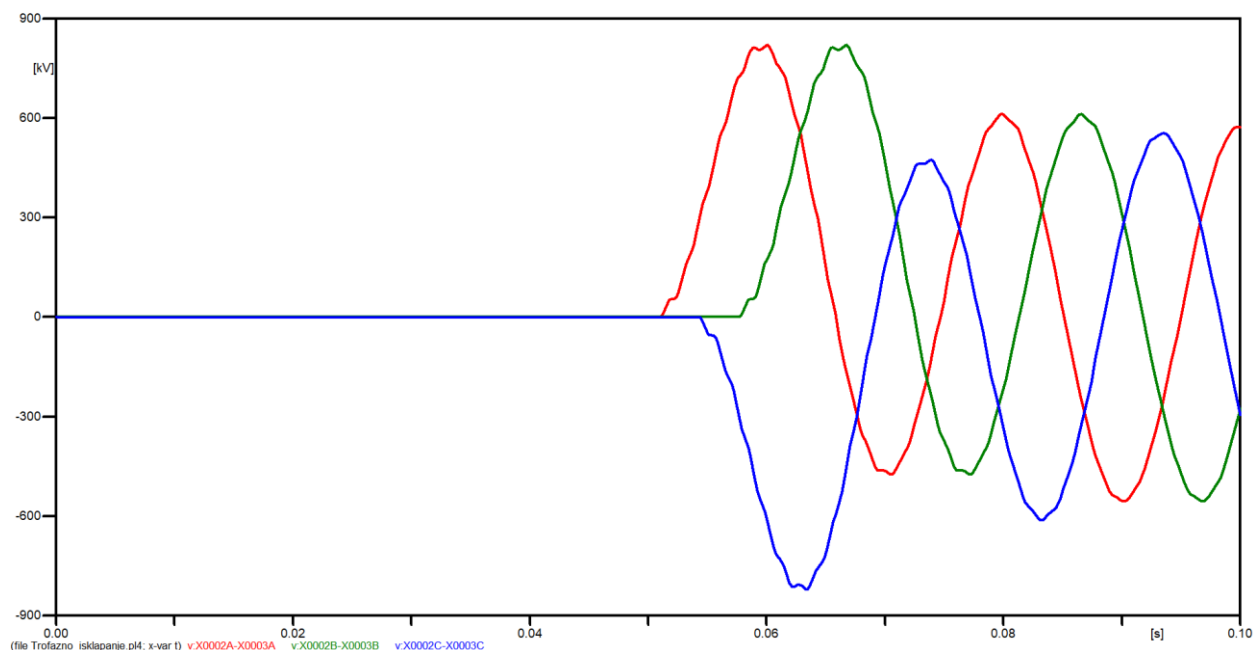
#### 4. PRIMJERI NASTAJANJA SKLOPNIH PRENAPONA



Sl. 4.5. Prikaz struja kroz prekidače.

Crvena krivulja struja je na prekidaču koji prvi isklapa, plava na prekidaču koji drugi isklapa, a zelena trećem prekidaču.

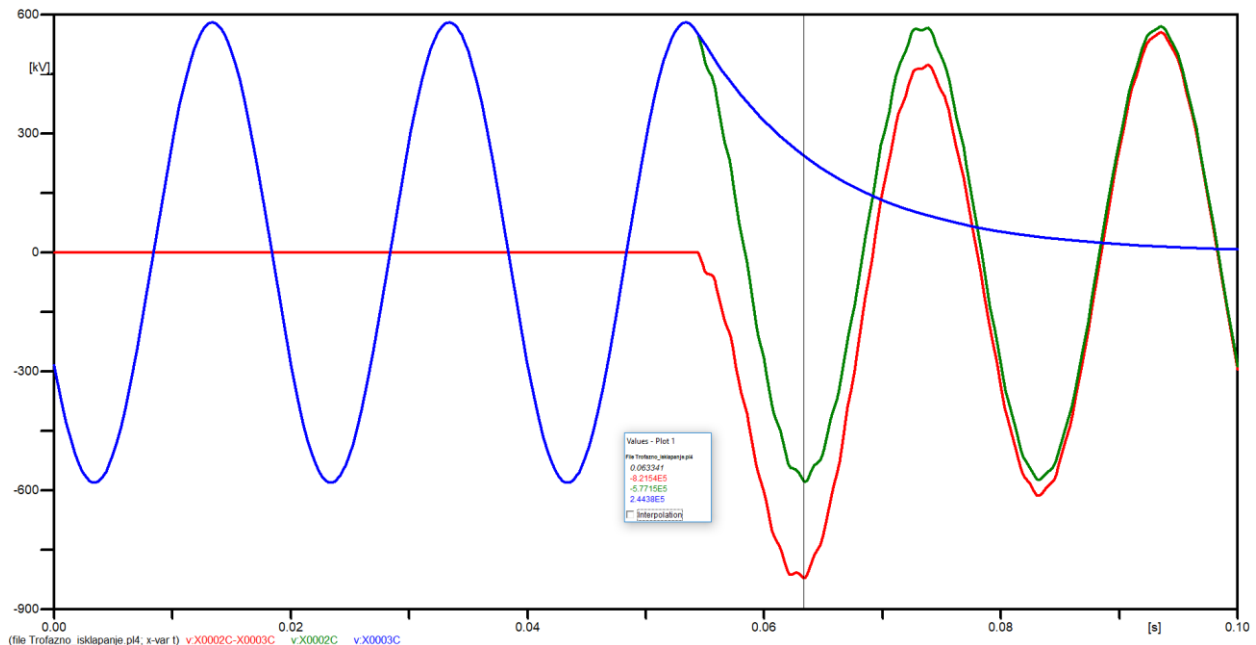
Prenaponi koji se javljaju među kontaktima prekidača jednakog su apsolutnog iznosa te su prikazani Slikom 4.6. Crvena krivulja je prenapon koji se javlja na prekidaču koji prvi isklopi, plava koji drugi isklopi, a zelena prekidač koji treći isklopi.



Sl. 4.6. Prenaponi na kontaktima prekidača.

#### 4. PRIMJERI NASTAJANJA SKLOPNIH PRENAPONA

Dovoljno je proučavati jednu fazu kako bi se utvrdio koeficijent prenapona. Promatrat će se faza C. Napon generatorske strane, napon strane trošila te napon među kontaktima prikazani su Slikom 4.7. Zelenom je bojom predstavljen napon izvora koji se do trenutka isklapanja faze C poklapa s naponom na trošilo odnosno plavo obojano krivuljom. Crvena krivulja je napon između kontakata. Kao i u prošlom primjeru, vidljivo je da se nakon isklapanja u naponu izvora pojavljuju viši harmonici, no značajno dominira osnovni. Tako se ti harmonici mogu vidjeti i u prenaponu. Napon na trošilo ne poprima trenutno vrijednost nula, već je potrebno određeno vrijeme da se kapaciteti isprazne. Isto vrijedi i za struju trošila, samo što kod struje igra glavnu ulogu induktivitet.



Sl. 4.7. Napon generatorske strane, napon trošila te nastali prenapon.

Koeficijent prenapona:

$$K_p = \frac{U_P}{U_{MAX}} = \frac{-821540}{-565685} = 1.45 \quad (4-2)$$

#### 4.3. Uklapanje neopterećenog voda preko transformatora

Ova je situacija najčešća za slabe mreže tj. nerazvijene EES-e. Neopterećeni je vod predstavljen kapacitetom, a transformator rasipnim induktivitetom. Prijelazna pojava će imati

## 4. PRIMJERI NASTAJANJA SKLOPNIH PRENAPONA

jednu frekvenciju osciliranja, relativno niske vrijednosti. U slučaju uklapanja kod maksimalne vrijednosti pogonskog napona, prijelazna pojava može oscilirati i do dvostruke vrijednosti pogonskog napona.

### **4.4. Uklapanje neopterećenog voda preko većeg broja dugih kabela ili vodova**

Neopterećeni se vod priključuje na sustav preko sabirnice koja spaja više dugih nadzemnih vodova ili kabela. Priključeni vod ima mnogo veću valnu impedanciju od ukupne spojene na sabirnicu. Najčešće duljina voda koji uklapa je manja od duljine već priključenih vodova. U tom slučaju prijelazna pojava je jedne frekvencije, koja odgovara prirodnoj frekvenciji voda. Napon na kraju priključenog voda bit će dvostruko veći od napona na početku, dok se vrijednost napona pogonske frekvencije gotovo nikako nije promijenila. Prigušenje prijelazne pojave u početku neće imati gotovo nikakav utjecaj na vrijednost amplitude.

### **4.5. Uklapanje neopterećenog voda preko kompleksnog izvora**

Ova je situacija karakteristična za razvijene EES-e. Na prijelaznu pojavu utječu uz induktivitet transformatora i valne impedancije priključenih vodova. Prijelazna je pojava sastavljena od više frekvencija koja se ne očituju istovremeno. Najčešće su amplitude frekvencija veće vrijednosti već prigušene kada se javljaju amplitude niže frekvencije. Faktor prenapona je manji od dva, što je karakteristično za razvijene sustave. Faktor prenapona je manji jer se superponiraju oscilacije različitih frekvencija.

### **4.6. Isklapanje malih kapacitivnih struja**

Kod isklapanja neopterećenih kabela, nadzemnih vodova ili kondenzatorskih baterija prekidač prekida kapacitivnu struju pri vrijednosti nula. U tom je trenutku napon maksimalne vrijednosti. U jednofaznim sustavima napon doseže vrijednost 1 p.u., dok u trofaznim može dostići u fazi koja je prva isklópila do 1.5 p.u. Nakon 10 milisekundi (poluperioda) napon izvora poprima maksimalnu vrijednost suprotnog polariteta. Isto, rezultira da u trofaznim sustavima povratni napon može dostići 2.5. p.u. pogonskog faznog napona. U slučaju da ovaj napon izazove proboj u vremenu kraćem od 5 milisekundi nakon isklopa radi se ustvari o ponovno paljenje luka. Proboj nakon trajanja dužeg od 5 milisekundi je povratni preskok koji se pojavljuje na kontaktima prekidača. Povratni preskok je opasan jer može uzrokovati visoke prenapone. Povratni preskok se uobičajeno događa prije nego li povratni napon dostignem maksimalnu

## 4. PRIMJERI NASTAJANJA SKLOPNIH PRENAPONA

vrijednost  $i$  izaziva visokofrekventnu oscilatornu struju. Visokofrekventna oscilatorna struja prestaje teći nakon druge poluperiode ili kasnije.

### 4.6.1. Isklapanje neopterećenih dalekovoda

Dugi neopterećeni vodovi mogu se nadomjestiti kapacitetom, dakle uz određena zanemarenja struja prethodi naponu za  $\frac{\pi}{2}$ . Uz pretpostavku da se u trenutku  $t=0$  kontakti prekidača trenutno otvore, a povratni napon  $p_A$  među njima nije dovoljno visok da probije dielektričnu čvrstoću kontakata, napon na kapacitetu  $p_c$  ostaje nabijen na iznos napona izvora  $U$ . Ako se zanemare omski i induktivni otpor u odnosu na kapacitivni, dolazi se do sljedeće relacije za ravnotežu napona:

$$u = p_A + p_c \quad (4-3)$$

Iz čega slijedi da je do trenutka prekidanja ( $t < 0$ ):

$$u = p_c = U \cos \omega t \quad (4-4)$$

$$i = I \cos \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (4-5)$$

$$p_A = 0 \quad (4-6)$$

Nakon prekidanja vrijedi ( $t \geq 0$ ):

$$u = U \cos \omega t \quad (4-7)$$

$$p_c = U = \text{konst.} \quad (4-8)$$

$$i = 0 \quad (4-9)$$

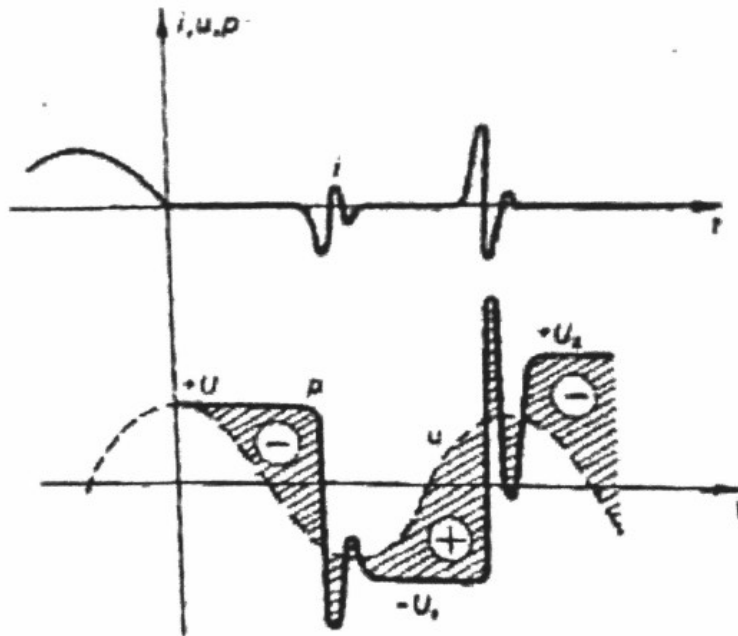
$$p_A = U(\cos \omega t - 1) \quad (4-10)$$

Iz jednadžbe (4-10), vidljivo je da isti poprima dvostruku amplitudu narinutog napona, što lako može dovesti do ponovnog paljenja luka. Napon među kontaktima u trenutku gašenja iznosi nula, a tek nakon prolaska jedne poluperiode od trenutka gašenja zauzima vrijednost približno  $2U$  što dovodi do proboja. Proboj dovodi do izbijanja kondenzatora, koji kroz nekoliko titraja vlastite frekvencije zauzima vrijednost  $-U_1$  suprotnog predznaka, pri tom iznosu ostaje do ponovnog proboja. Ponovni proboj nastaje u blizini narednog maksimuma napona  $u$ , kada povratni napon iznosi  $p_A \approx U + U_1 > 2U$ . Nakon sljedećeg proboja kapacitet se kroz nekoliko titraja nabija na vrijednost napona  $+U_2$ , a tako i napon neopterećenog voda. Nakon svakog



#### 4. PRIMJERI NASTAJANJA SKLOPNIH PRENAPONA

proboja raste vrijednost napona neopterećenog voda, zbog povećanja razmaka među kontaktima, a tako i probojne čvrstoće. Uslijed svakog ponovnog paljenja javlja se visokofrekventna struja, koja je pretežito kapacitivnog karaktera te prethodi naponu za  $\frac{\pi}{2}$ .



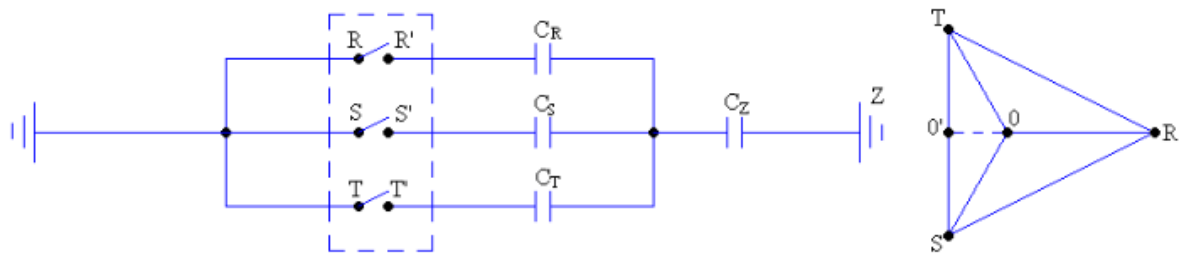
Sl.4.8. Prenaponi uzrokovani ponovnim paljenjem luka. [1]

Povratni napon prikazan je isjenčanim plohamama na Slici 4.8. te kako je ranije objašnjeno da ima dva polariteta, a iznos mu se svakim ponovnim paljenjem povećava.

#### 4.6.2. Isklapanje neopterećenih kabela

Kod isklapanja neopterećenih kabela najznačajnija su dva slučaja: trolno isklapanje i uzastopno jednopolno isklapanje. Objasniti će se uzastopno jednopolno isklapanje uz pretpostavku da ne dolazi do ponovnog paljenja luka o kojem je bilo riječi u prethodnom poglavlju. Za ovaj slučaj dana je nadomjesna shema na Slici 4.9., gdje se podrazumijeva zanemarenje odvodnih otpora te radi simetrije kapaciteti kondenzatora u sve tri faze su jednaki.

#### 4. PRIMJERI NASTAJANJA SKLOPNIH PRENAPONA



Sl. 4.9. Nadomjesna shema.

Uzastopno jednofazno isklapanje, kako sam naziv govori, podrazumijeva isklapanje jednog pola za drugim. Primjenjuje se u nekim sklopkama srednjeg napona EES-a. Ovdje će se proučavati tri karakteristična vremenska razdoblja. Prvo ( $t=t_1\dots t_2$ ) od trenutka prekidanja struje na polu RR' do trenutka prekidanja struje na polu SS'. Drugo ( $t=t_2\dots t_3$ ) od trenutka prekidanja struje na polu S do trenutka otvaranja otvaranja trećeg pola T. I zadnje ( $t>t_3$ ) vremensko razdoblje nakon otvaranja posljednje pola TT'.

Za proučavanje prenapona u karakterističnom slučaju nužno je poznavanje napona na kondenzatorima pojedinih faza te napon između nultočke i zemlje.

Vremensko razdoblje  $t = t_1\dots t_2$

U trenutku prolaska struje kroz 0 u fazi R, električni luk se gasi što odgovara trenutku  $t_1$ . Napon na kondenzatoru iste faze ostane nabijen na vrijednost napona  $u_{R'0} = U_m$ . Kontakti u druge dvije faze ostaju zatvoreni, a struja kroz njih istog smjera i iznosa zbog novonastalog serijskog spoja. Iznosa:

$$i_{ST} = I_{STm} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_m \quad (4-11)$$

Gdje je  $I_m$  vršna vrijednost svih struja prije otvaranja kontakta R.

Analogno serijskom spoju dviju zatvorenih faza S i T, svaki kondenzator biva nabijen na polovicu linijskog napona istih faza. Dakle, vrijede relacije:

$$u_{S'0} = \frac{1}{2} u_{ST} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_m \sin \omega t - \frac{U_m}{2} \quad (4-12)$$

$$u_{T'0} = -\frac{1}{2} u_{ST} = -\frac{\sqrt{3}}{2} U_m \sin \omega t - \frac{U_m}{2} \quad , \quad (4-13)$$

#### 4. PRIMJERI NASTAJANJA SKLOPNIH PRENAPONA

Konstantan član  $-\frac{U_m}{2}$  prisutan je jer je u trenutku  $t_1$  toliki bio napon na kondenzatorima  $C_S$  i  $C_T$ .

Za napon nultočke prema zemlji vrijedi sljedeće:

$$u_{0Z} = u_{SZ} - u_{S'0} = U_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{\sqrt{3}}{2}U_m \sin\omega t + \frac{U_m}{2} = -\frac{1}{2}U_m \cos\omega t + \frac{U_m}{2} \quad (4-14)$$

Zbrojem  $u_{R'0}$  i  $u_{0Z}$  dolazi se do relacija koja vrijedi za napon  $u_{R'Z}$ :

$$u_{R'Z} = u_{R'0} + u_{0Z} = U_m - \frac{1}{2}U_m \cos\omega t + \frac{U_m}{2} = -\frac{1}{2}U_m \cos\omega t + \frac{3U_m}{2} \quad (4-15)$$

Analogno prethodnom dolazi se do rješenja za prenapon koji se može pojaviti na kontaktu  $RR'$ :

$$u_{RR'} = u_{RZ} + u_{ZR'} = U_m \cos\omega t + \frac{1}{2}U_m \cos\omega t - \frac{3U_m}{2} = \frac{3}{2}U_m \cos\omega t - \frac{3}{2}U_m \quad (4-16)$$

Dakle, maksimalan mogući napon u zadanom intervalu može doseći vrijednost  $3U_m$ .

Vremensko razdoblje  $t = t_2 \dots t_3$

U trenutku  $t_2$  struja prolazi kroz nulu i sklopka  $S$  se isklapa. U tom trenutku napon  $u_{S'0}$  i napon na kondenzatoru  $C_S$  su jednaki i iznose:

$$u_{S'0} = \frac{\sqrt{3}}{2}U_m \sin\frac{\pi}{2} - \frac{U_m}{2} \approx 0,37U_m \quad (4-17)$$

Jednako se tako dolazi do napona na kondenzatoru  $C_T$ :

$$u_{T'0} = -\frac{\sqrt{3}}{2}U_m \sin\frac{\pi}{2} - \frac{U_m}{2} \approx -1,37U_m \quad (4-18)$$

Kako je ovom intervalu još uvijek zatvoren kontakt  $TT'$ , može se utvrditi sljedeće:

$$u_{0Z} = u_{TZ} + u_{0T'} = U_m \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + 1,37U_m \quad (4-19)$$

$$u_{S'Z} = u_{S'0} + u_{0Z} = U_m \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + \sqrt{3}U_m \quad (4-20)$$

Napon kontakta  $SS'$  u trenutku  $t_2$ :

$$u_{SS'} = u_{SZ} + u_{ZS'} = U_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) - U_m \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) - \sqrt{3}U_m \quad (4-21)$$

$$u_{SS'} = \sqrt{3}U_m \sin\omega t - \sqrt{3}U_m \quad (4-22)$$

#### 4. PRIMJERI NASTAJANJA SKLOPNIH PRENAPONA

Maksimalan iznos napona na kontaktima SS' jednak  $-2\sqrt{3}U_m \approx -3,47U_m$ .

Za kontakte RR' u ovom intervalu vrijedi:

$$u_{R'Z} = u_{R'O} + u_{OZ} \quad (4-23)$$

$$u_{RR'} = u_{RZ} + u_{ZR'} = U_m \cos \omega t - U_m \cos \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) - 2,37U_m \quad (4-24)$$

$$u_{RR'} = \sqrt{3}U_m \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{6} \right) - 2,37U_m \quad (4-25)$$

Dakle, maksimalna vrijednost napona koja se pojavljuje na kontaktima RR' u danom intervalu jednaka je  $\approx -4,1U_m$ .

Vremensko razdoblje  $t > t_3$

Najnepovoljniji je slučaj isklapanje kontakta TT' kada je iznos napona između kontakta T i zemlje jednak  $U_m$ . U tom slučaju napon  $u_{OZ} = 2,37U_m$  i nadalje ostaje konstantan. Isto se događa za  $\omega t = \frac{4\pi}{3} + n\pi$ , gdje je n parni broj iz skupa Z.

Vrijede relacije:

$$u_{T'Z} = u_{T'O} + u_{OZ} = -1,37U_m + 2,37U_m = U_m \quad (4-26)$$

$$u_{TT'} = u_{TZ} + u_{ZT'} = U_m \cos \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) - U_m \quad (4-27)$$

Napon na kontaktu TT' maksimalno doseže vrijednost  $2U_m$ .

Za napon na kontaktu  $u_{RR'}$  vrijedi:

$$u_{RR'} = u_{RZ} + u_{ZR'} = U_m \cos \omega t - 3,37U_m \quad (4-28)$$

Dakle, maksimalna vrijednost napona na kontaktu RR' u intervalu  $t > t_3$  iznosi  $-4,37 U_m$ . Zaključuje se da se u svim intervalima najveća naprezanja pojavljuju na kontaktu koji prvi prekida. Vidljivo je da su visokog iznosa, što znači da vrlo jako naprežu izolaciju aparata. No, u realnom slučaju ne postoji prikazani primjer, jer su se zanemarili odvođi, a odvođi znato smanje prenapon.

## 4. PRIMJERI NASTAJANJA SKLOPNIH PRENAPONA

### 4.6.3. Isklapanje kondenzatorski baterija

Kod ovog primjera vrijede iste relacije kao u poglavlju 4.4.1. Iznimka je što se zanemaruju induktivni i omski otpor. Zaključak je isti, a to je da se na kontaktima prekidača mogu pojaviti dvostruke vrijednosti pogonskog napona što može dovesti do ponovnog paljenja luka te shodno tomu daljnjih povećanja napona.

### 4.7. Isklapanje malih induktivnih struja

Ovaj je slučaj karakterističan za prigušnicu ili transformator u praznom hodu. Prilikom isklapanja transformatora ili prigušnice, prekida se struja koja je potrebna za magnetiziranje jezgara istih. Poslije prekidanja struje, ostaje magnetska energija akumulirana u transformatoru koja se negdje mora pohraniti. Zbog kapaciteta među namotima ili između namota i zemlje, magnetska energija se pretvara u elektrostatsku energiju:

$$\frac{1}{2}Cu^2 = \frac{1}{2}Li^2 \quad (4-29)$$

gdje je:

- $i(t)$  – struja neposredno prije gašenja luka
- $L$  – induktivitet transformatora
- $u(t)$  – napon na kapacitetu
- $C$  – kapacitet strujnog kruga

Zbog male struje potrebne za magnetiziranje jezgre, mala struja teče i prekidačem. Zbog male struje kroz prekidač, mala je energija luka pa dolazi do procesa deionizacije, što za posljednicu ima prijevremeno gašenje luka, odnosno luk će se ugasi prije negoli prirodno sjedne na nultočku. Isto dovodi do još viših prenapona uz činjenicu da je kapacitet u ovom slučaju veoma malog iznosa. Prethodno objašnjenje veže relacija:

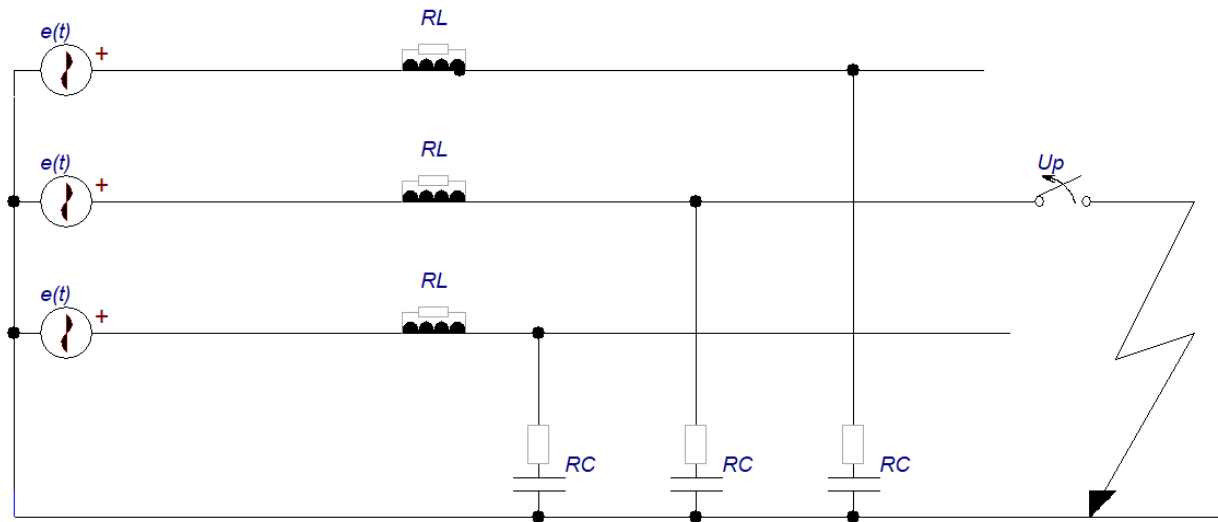
$$u = i \sqrt{\frac{L}{C}} = K \cdot i \quad (4-30)$$

Dakle, prenapon će biti to viši što je veća struja gašenja luka. Prekidači koji intenzivnije gase električni luk ovdje ne pronalaze svrhu, jer će izazvati više prenapone.

## 4.8. Isklapanje kvarova

### 4.8.1. Isklapanje kratkog spoja jedne faze

Slika 4.10. prikazuje titrajni krug u kojem se isklapa kratki spoj. Proces isklapanja kratkog spoja dovodi do naglih promjena režima rada koje rezultiraju prenaponima. Na danom primjeru aproksimativnom metodom odredit će se iznosi prenapona. Primjer sustava izrađen je u programu ATP EMTP.



SI. 4.10. Prenapon uslijed isklapanja kratkog spoja. [10]

Napon izvora je funkcija vremena:

$$e(t) = E_m \cos(\omega t) \quad (4-31)$$

gdje je:

- $E_m$  – tjemena vrijednost napona izvora

Struja kratkog spoja prije otvaranja kontakata, uz uvjet  $\omega L \gg R$  (struja je induktivnog karaktera) glasi:

$$i(t) = \frac{E_m}{\omega L} \sin(\omega t) \quad (4-32)$$

#### 4. PRIMJERI NASTAJANJA SKLOPNIH PRENAPONA

gdje je:

- $\omega L$  – induktivna reaktancija

Nakon otvaranja kontakata vrijedi:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int_{+0}^t i dt + U_{+0} = E_m \cos(\omega t) \quad (4-33)$$

gdje je:

- $+0$  – trenutak otvaranja kontakata
- $U_{+0}$  - uskladišteni napon na kapacitetima netom prije otvaranja.

Za povratni napon otvorenog prekidača, uz pretpostavku da je uskladišteni napon na kapacitetima bio jednak nuli odnosno zanemarenje napona električnog luka, vrijedi izraz:

$$u_p(t) = E_m [\cos(\omega t) - e^{-\frac{t}{\tau}} \cos(\omega_0 t)] \quad (4-34)$$

gdje je:

- $E_m$  – tjemena vrijednost napona izvora
- $\omega$  – pogonska frekvencija izvora
- $\tau$  – vremenska konstanta mreže;  $\tau = \frac{2L}{R}$
- $\omega_0$  – vlastita frekvencija mreže;  $\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ .

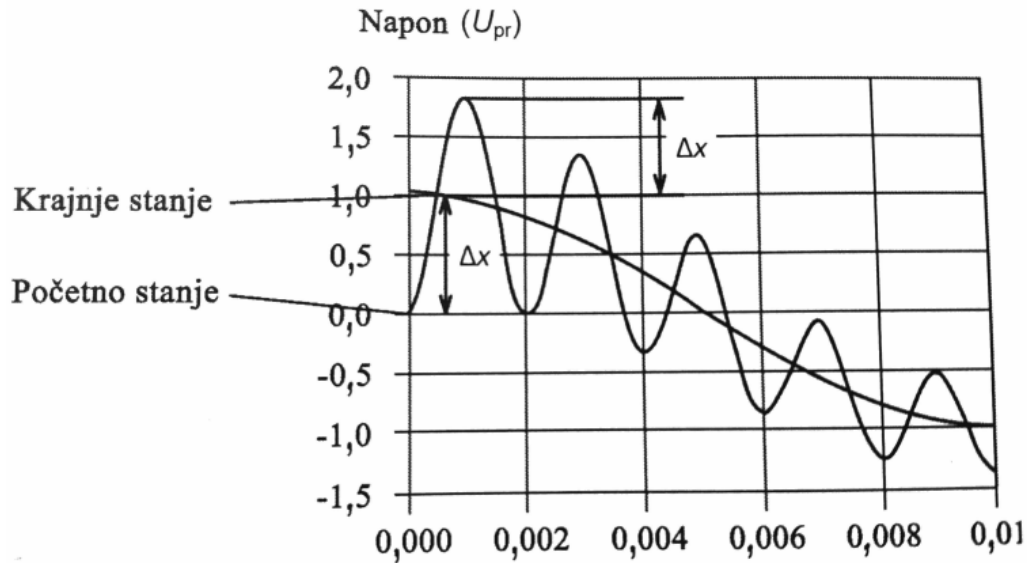
Ovaj izraz vrijedi u slučaju kada je frekvencija izvora  $\omega$  manja od vlastite frekvencije  $\omega_0$ , ali ne u tolikoj mjeri da se može promatrati kao konstantna vrijednost.

Uz uvjet da je frekvencija mreže puno manja od vlastite frekvencije (najčešće je tako), povratni napon na otvorenom prekidaču jednak je izrazu:

$$u_p(t) = E_m [1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \cos(\omega_0 t)] \quad (4-35)$$

Zbog rezonantne tj. vlastite frekvencije mreže mnogo veće od frekvencije izvora i velike vremenske konstante mreže, povratni napon na kontaktima prekidača mogao bi doseći i dvostruki iznos maksimalnog pogonskog napona, odnosno u ovom slučaju  $K_p \leq 2$ . No, zbog prisustva prigušnog otpora u mreži ovaj iznos je nešto manji.

#### 4. PRIMJERI NASTAJANJA SKLOPNIH PRENAPONA



**Sl. 4.11.** Procjena visine prenapona u slučaju zanemarivog prigušnog otpora mreže. [10]

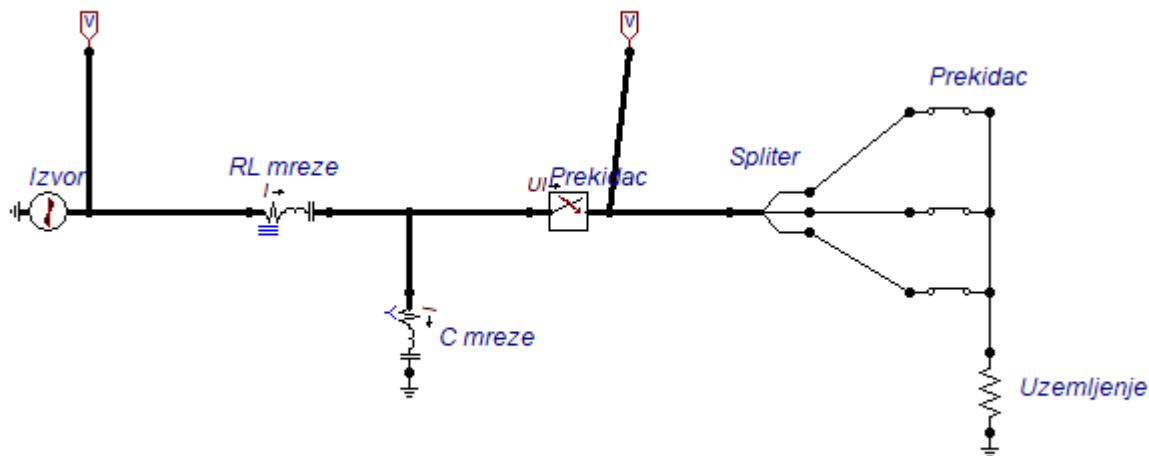
Na slici 4.11. vidljivo je da je prije isklapanja napon na prekidaču bio jednak nuli jer je sklopka uklopljena. Znači da je početno stanje napona u trenutku  $t = 0$  jednako  $U = 0$  p.u. Početno stanje ujedno predstavlja i ustaljeno stanje, jer je upravo vrijednost nula vrijednost kojoj sklopka teži. U trenutku  $t = +0$  sklopka isklopi tj. krajnje stanje kojem teži jednako je  $U = 1$  p.u. jer je to vrijednost napona izvora. Razlika početnog i krajnjeg stanja jednaka je  $\Delta x$ . Približno jednaka vrijednost se pojavljuje između maksimalne vrijednosti oscilacije i krajnjeg ustaljenog stanja. Dakle, ukupna razlika između početnog ustaljenog stanja i maksimalne vrijednosti prijelazne pojave jednaka je gotovo  $2\Delta x$ . Od početnog ustaljenog stanja do uspostave krajnjeg vlada prijelazna pojava. Važno je naglasiti da je ovo gruba procjena na bazi poznavanja sustava.

#### 4.8.2. Bliski kratki spoj

Kada se govori o bliskom kratkom spoju podrazumijeva se kratki spoj nastao do nekoliko kilometara udaljenosti od prekidača. Nadomjesna shema simulacije kratkog spoja sve tri faze dana je Slikom 4.12. Primjer sustava izrađen je u programu ATP EMTP.

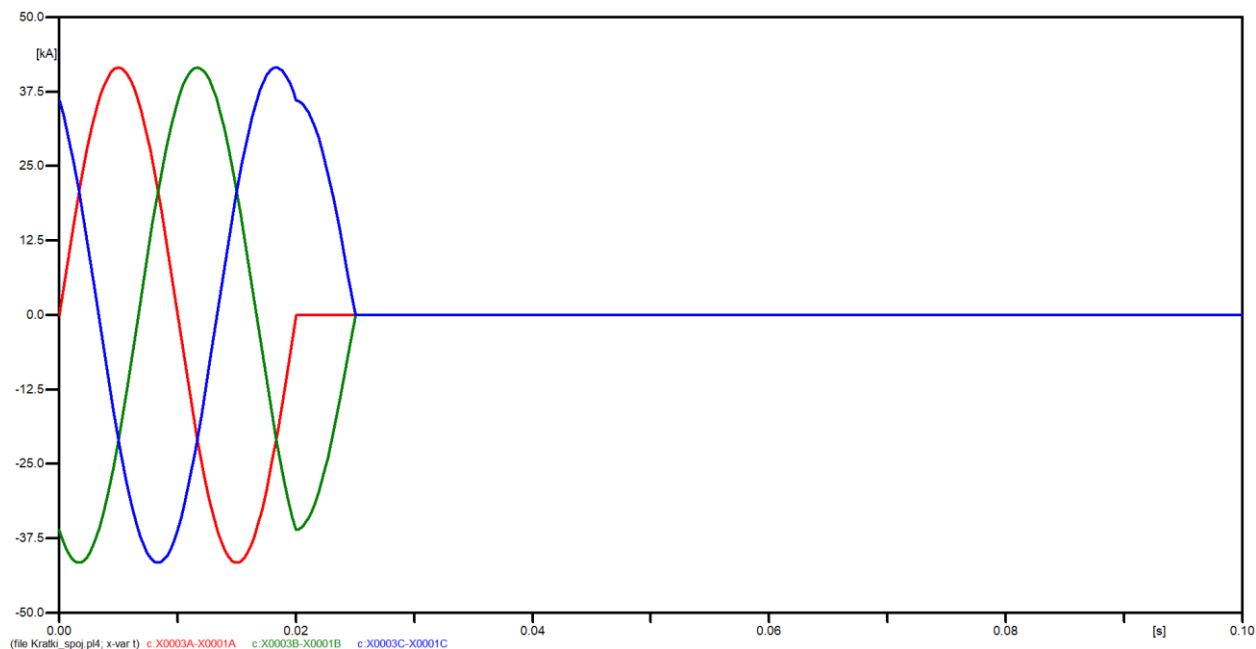


#### 4. PRIMJERI NASTAJANJA SKLOPNIH PRENAPONA



Sl. 4.12. Nadomjesna shema trofaznog kratkog spoja.

Kod trofaznog kratkog spoja postoje tri faze, prva isklapa jedna u trenutku 0,02s, a zatim druge dvije istovremeno za  $\frac{2\pi}{6}$  kasnije. Nakon isklopa prve faze, u krugu vladaju prilike dvofaznog kratkog spoja. Preostalim fazama počinje teći struja istog iznosa, ali suprotnog predznaka. Grafički prikaz isklapanja prekidača, a tako i prestanka kolanja struje dan je Slikom 4.13.

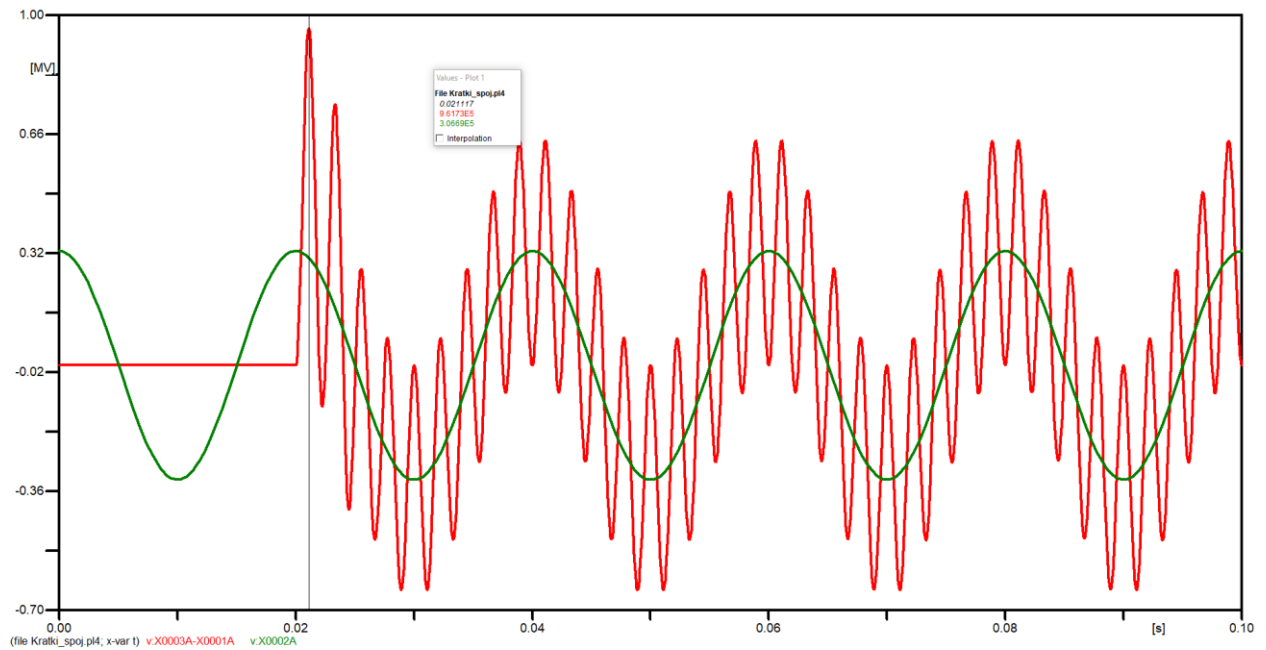


Sl. 4.13. Struje triju faza prije i nakon isklapanja

#### 4. PRIMJERI NASTAJANJA SKLOPNIH PRENAPONA

Nakon isklapanja, javljaju se prenaponi, koji će se proučavati za svaku fazu posebno. Za sve tri faze vrijedi da je napon na generatorskoj strani označen krivuljom zelene boje, a nastali prenapon krivuljom crvene boje.

Faza A:

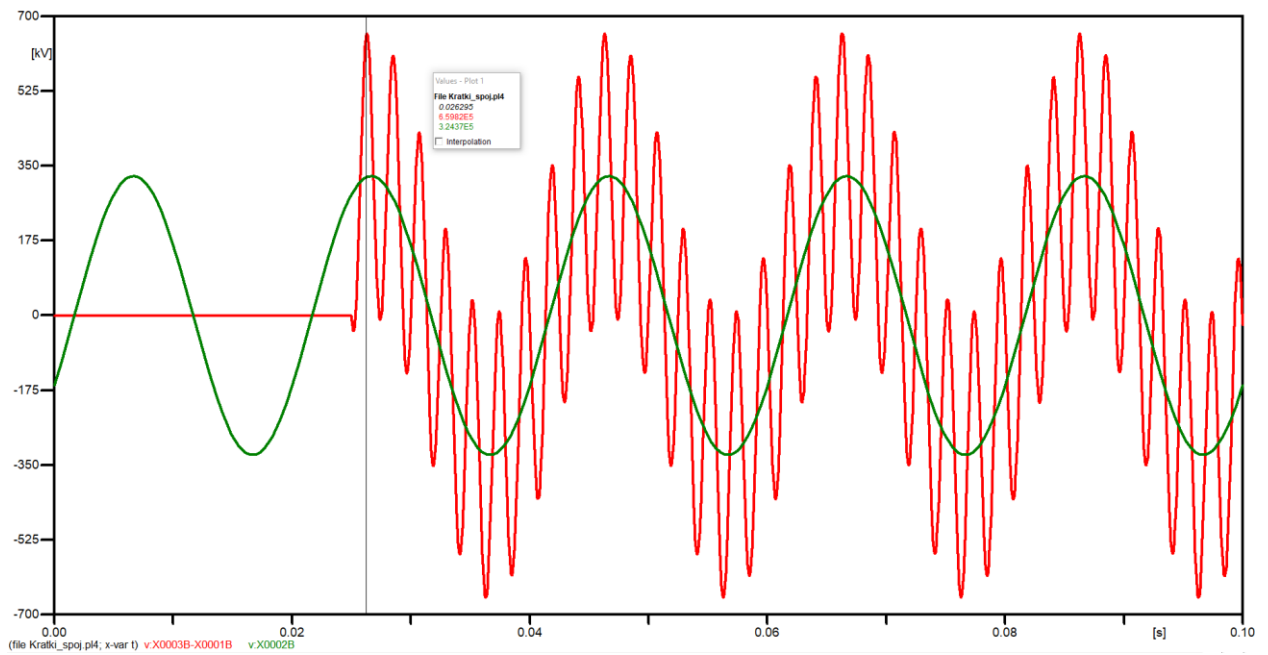


Sl. 4.14. Napon izvora faze A i nastali prenapon

$$K_p = \frac{U_P}{U_{MAX}} = \frac{961730}{326598} = 2.94 \quad (4-36)$$

#### 4. PRIMJERI NASTAJANJA SKLOPNIH PRENAPONA

Faza B:

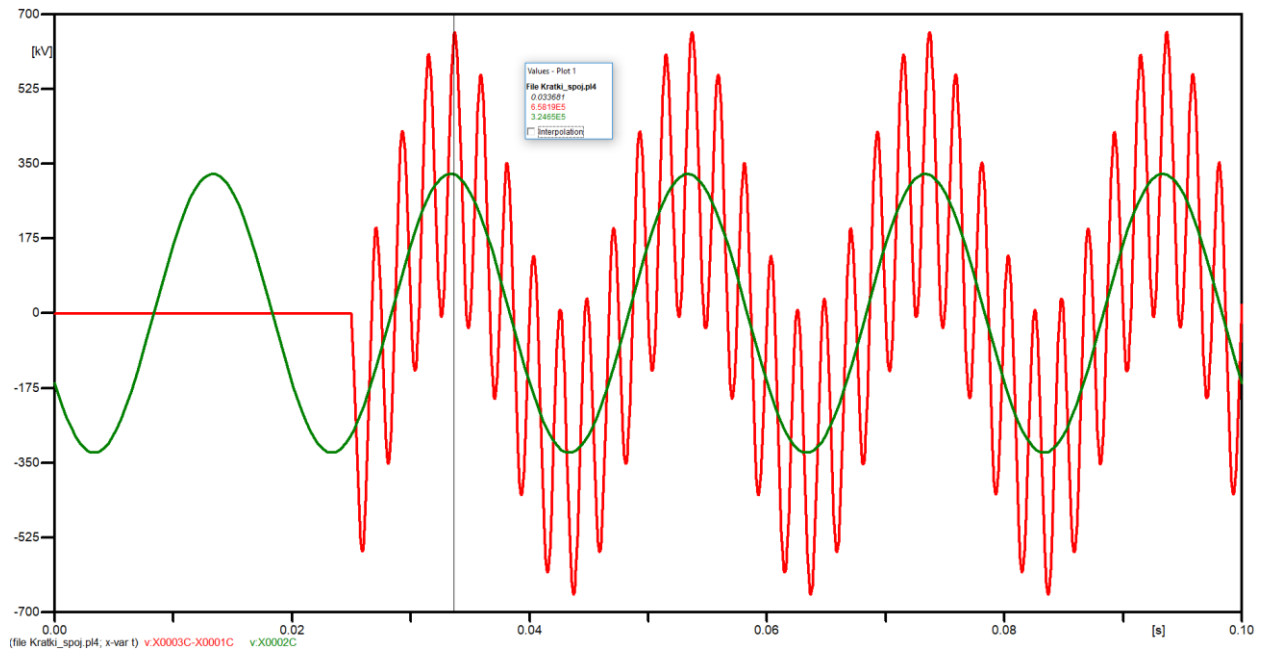


Sl. 4.15. Napon izvora faze B i nastali prenapon

$$K_p = \frac{U_P}{U_{MAX}} = \frac{659820}{326598} = 2.02 \quad (4-37)$$

## 4. PRIMJERI NASTAJANJA SKLOPNIH PRENAPONA

Faza C:



SI. 4.16. Napon izvora faze C i nastali prenapon

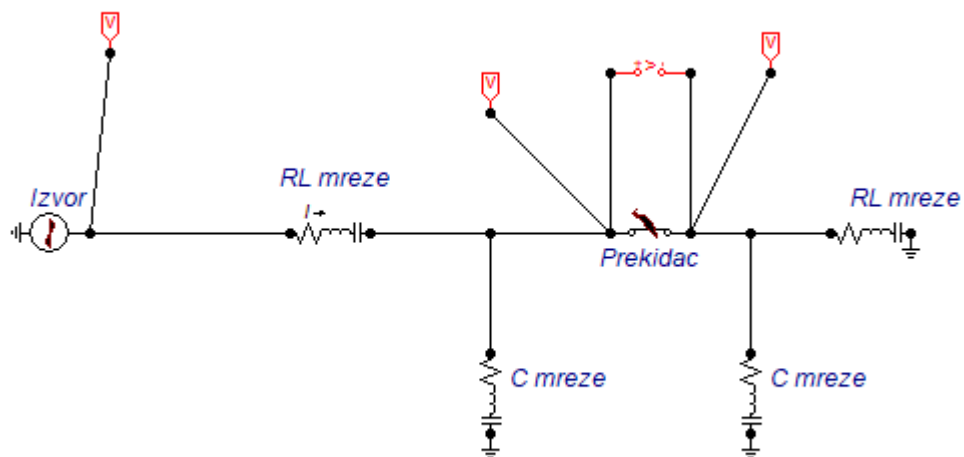
$$K_p = \frac{U_P}{U_{MAX}} = \frac{658190}{326598} = 2.02 \quad (4-38)$$

Prenapon prve faze je značajno većeg iznosa od preostale dvije, jer u trenutku isklapanja prve faze naponi na kondenzatorima druge dvije faze ostaju nabijeni što rezultira najvećoj razlici napona među kontaktima.

### 4.9. Povratni napon s dvije frekvencije

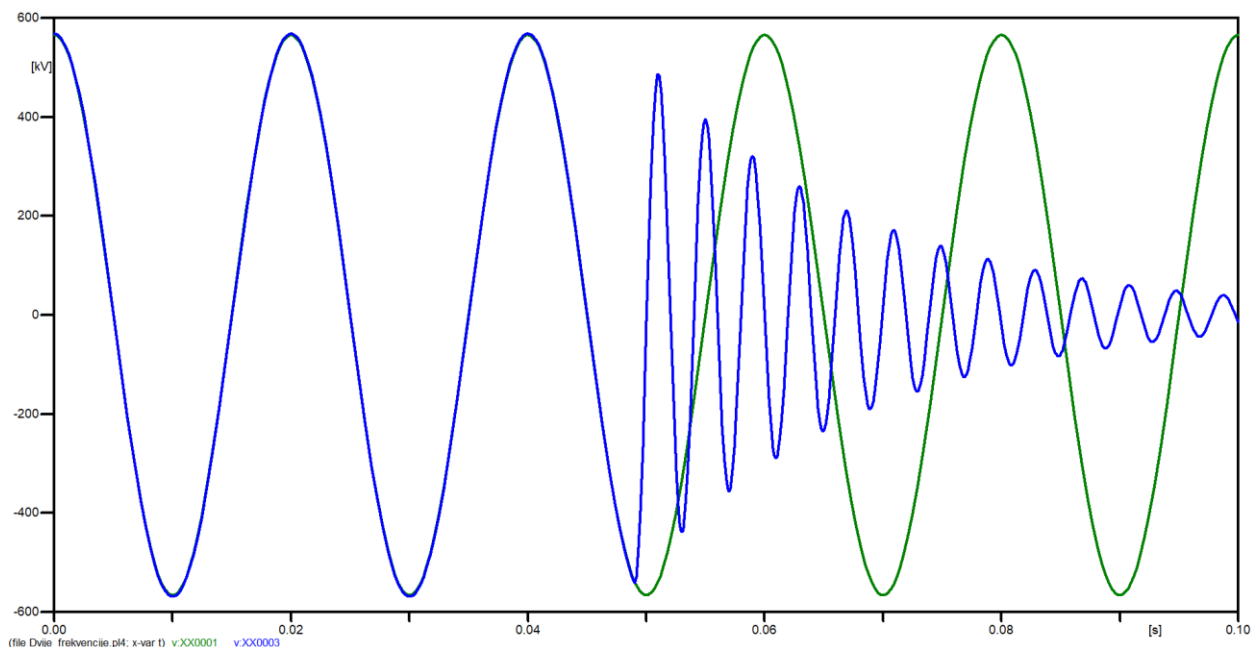
U slučaju kada su nakon otvaranja prekidača formirana dva odvojena strujna kruga, povratni napon će se sastojati od dvije frekvencije. Krug lijevo od prekidača neka bude generatorski krug, a desno transformatorski. Nadomjesna shema dana je Slikom 4.16. Primjer sustava izrađen je u programu ATP EMTP.

#### 4. PRIMJERI NASTAJANJA SKLOPNIH PRENAPONA



Sl. 4.17. Nadomjesna shema

U trenutku isklapanja javlja se napon između kontakata prekidača. Krivuljom zelene boje prikazan je napon na generatorskoj strani, a plavom napon na transformatorskoj. Vidljivo je kako napon na transformatorskoj strani, nakon isklapanja, eksponencijalno pada i ide ka vrijednosti nula. Vrijeme potrebno da zauzme vrijednost nula ovisno je o otporu RLC kruga. Veći otpor znači brže ustaljivanje.

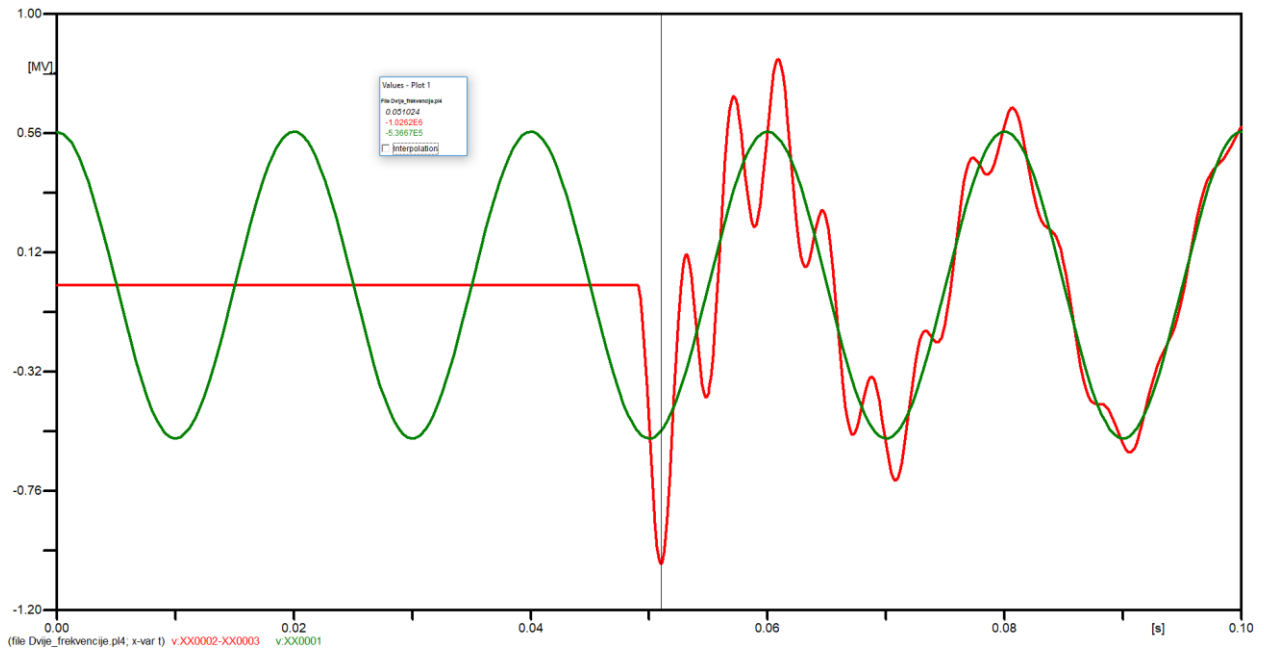


Sl. 4.18. Napon generatorske strane i napon transformatorske strane

#### 4. PRIMJERI NASTAJANJA SKLOPNIH PRENAPONA

Prenapon je jednak razlici napona, a sastoji se od frekvencije generatorske strane i transformatorske. Frekvencije su po iznosu jednake:

$$f_g = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_g C_g}} \quad f_t = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_t C_t}} \quad (4-39)$$



Sl. 4.19. Napon na generatorskoj strani i nastali prenapon

$$K_p = \frac{U_P}{U_{MAX}} = \frac{1026200}{565685} = 1.81 \quad (4-40)$$

### 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazani su iznosi koeficijenata prenapona i moguća je njihova usporedba. Kod jednofaznog isklapanja opterećenog voda, koeficijent prenapona iznosi 1.45. Primjer trofaznog isklapanja sačinjavao se od tri jednofazna isklapanja s istim parametarima kao i u prvom primjeru, posljedično tome, koeficijent prenapona za jednofazno i trofazno isklapanje ima isti iznos. Vidljiva je razlika u fazi C gdje je prenapon negativnog polariteta zbog negativne derivacije struje kroz fazu C u trenutku isklapanja. Isklapanje kratkog spoja je nešto drugačiji primjer gdje nakon isklapanja prve faze kroz druge dvije teče struja istog iznosa, ali suprotnog predznaka, a kondenzatori ostaju nabijeni. Stoga se kod isklapanja prve faze kratkog spoja javlja prenapon znatno veći nego u druge dvije. No, važno je naglasiti da se u programu simuliralo s modelima gdje su zanemareni odvodi, a odvodi znatno smanjuju iznose prenapona. Dakle, u realnim primjerima dobiveni prenaponi su nešto manjeg iznosa. Nadalje, iz primjera navedenih u ovom radu, vidljiva je velika raširenost pojavljivanja sklopnih prenapona te njihova važnost u EES-u. Iz toga razloga važno ih je proučavati i analizirati jer isključivo ovise o konfiguraciji mreže te ih je moguće smanjiti i preventivno utjecati na njihovu pojavu.

## LITERATURA

- [1] Belin, B. i Kovačić, L. (1978). *Uvod u teoriju električnih sklopnih aparata*. Zagreb: Školska knjiga.
- [2] Dantas, K. M., Fernandes, D., Neves, L. A., Souza, B. A. i Fonseca, L. C. (2008). Mitigation of switching overvoltages in transmission lines via controlled switching. In *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century* (pp. 1-8). IEEE.
- [3] Duncan, G.J. (2012). *Power system analysis and design (5th edition)*. Stamford: Cengage learning.
- [4] Filipović-Grčić, B., Uglešić, I., Pavić, I., Tomašević, F., Bojić, S. i Župan, A. (2017). Application of controlled switching to reduce switching overvoltages in 400 kV network. Šibenik: *13. savjetovanje HRO CIGRÉ*.
- [5] Martinez-Velasco, J. A. i González-Molina, F. (2012). Temporary overvoltages in power systems.
- [6] Nahman, J. i Mijailović, V. (2015). *Razvodna postrojenja*. Beograd: Akademska misao.
- [7] Požar, H. (1973). *Visokonaponska rasklopna postrojenja*. Zagreb: Tehnička knjiga.
- [8] Seyedi, H., Sanaye-Pasand, M. i Dadashzadeh, M. R. (2005). Application of transmission line surge arresters to reduce switching overvoltages. In *International Conference on Power Systems Transients (IPST'05)*.
- [9] Stenstrom, L. (1997). Limitation of switching overvoltages by use of transmission line surge arresters. In *Proc. 1998 CIGRE SC 33 International Conf.*
- [10] Stojkov, M., Baus, Z., Barukčić, M. i Provči, I. (2015). *Električni sklopni aparati*. Slavonski Brod/Osijek.
- [11] Uglešić, I. (2002). *Tehnika visokog napona*. Zagreb: FER-ZVNE.
- [12] Vučetić, S. (2004). *Elektroenergetske mreže : osnove elektroenergetske tehnike*. Zagreb: Školska knjiga.
- [13] Vučetić, S. (2004). *Elektrane i elektroenergetska postrojenja:osnove elektroenergetske tehnike*. Zagreb: Školska knjiga.



## SAŽETAK

Prenaponi su naponi viših iznosa od onih za koje je mreža definirana. Osnovna podjela prenapona je na privremene i prijelazne prenapone. Prijelazni se dijele na ultra brze, brze te spore prenapone, a sporim prenaponima pripadaju i sklopni prenaponi, poznati i kao unutarnji prenaponi. Sklopni prenaponi su naponi koji se javljaju među kontaktima sklopnih aparata, a nastaju uslijed sklapanja. U drugom poglavlju definirana je klasifikacija prenapona prema obliku i trajanja, te je objašnjen način ispitivanja izolacije mreže za pojedine prenapone. Uz to, uveden je pojam koeficijent prenapona koji je važan radi usporedbe i lakše analize. S tumačenjem nastanka te načinom gašenja električnog luka započinje treće poglavlje. Električni luk je važan jer prethodi sklopni prenaponima. U istom poglavlju, slijede načini prekidanja struje kroz kontakte prekidača u ovisnosti o karakteru mreže, te definiranje povratnog napona i primjera nastanka. Četvrto poglavlje je posvećeno objašnjavanju povratnih napona, odnosno sklopnih prenapona za dane primjere te računanju iznosa koeficijenata prenapona, a tako donošenju zaključka o iznosu prenapona.

**Ključne riječi:** prenapon, sklopni prenapon, električni luk, elektroenergetski sustav

## **ABSTRACT**

Overvoltages are voltages with higher amount comparable to overvoltages with defined grid. Basic classification of overvoltages is on temporary and transmission overvoltages. Transmission overvoltages are divided into ultra fast, fast and slow overvoltages, and part of the last one are switching overvoltages, also known as internal overvoltages. Switching overvoltages are voltages that occur between contacts of switchgear, and they appear during switching. In the second chapter is presented classification of overvoltages based on form and duration, and there is also explained the way that gear isolation is tested for individual overvoltages. Besides, there is also introduced the term overvoltage coefficient which is important for comparison and easier analysis. The third chapter starts with interpretation of making electric arc and explaining arc suppression. Electric arc is important because he precedes switching overvoltages. In the same chapter, there are shown the ways of power outage through breaker's contacts in dependence of gear character, and there is also defined return voltage and given an example of return voltage incurrence. The fourth chapter explains return voltage, i.e. switching overvoltages for given examples where is presented calculation of overvoltage coefficient amount, hence conclusion about amount of overvoltage.

**Key words:** overvoltage, switching overvoltage, electric arc, electrical grid

## **ŽIVOTOPIS**

Petar Vinković rođen je 24. listopada 1997. godine u Osijeku. Živi i odrasta u mjestu Tomašanci. Završava Osnovnu školu Gorjani 2012. godine te upisuje i završava Elektrotehničku i prometnu školu Osijek, smjer tehničar za računalstvo. Tijekom srednjoškolskog školovanja obavlja stručnu praksu u Irskoj na temu KNX tehnologije te u HOPS-u. Sveučilišni preddiplomski studij, smjer Elektrotehnika upisuje 2016. na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek.