

## SAVREMENE METODE ZA OGRANIČAVANJE STRUJA KRATKOG SPOJA U ELEKTROENERGETSKIM MREŽAMA U SLUŽBI ENERGETSKE EFIKASNOSTI

Branimir N. Petrović

RiTE Ugljevik

Ugljevik, RS - BiH

branimir.n.petrovic@gmail.com

**Sadržaj** - Porast nivoa struja kratkog spoja izazvan promjenom topologije mreže ili dodavanjem novih proizvodnih kapaciteta može dovesti do toga da prekidači i druga oprema u postrojenjima više ne može da služi svojoj namjeni. U skorije vrijeme su se pojavile nove tehnologije ograničavača struja kratkih spojeva čijom upotrebom se ne zahtjeva zamjena elemenata postrojenja. Većina savremenih ograničavača su zasnovani na upotrebi superprovodnih elemenata ili energetske elektronike. U ovom radu će biti pokazano na praktičnom primjeru kako dolazi do porasta nivoa struja kratkog spoja kada se u mrežu doda novi generator, te na kom mjestu u mreži se predlaže ugradnja ograničavača i koji efekti se time postižu. Na kraju rada, u zaključku, dat je kratak osvrt na ekonomske aspekte.

**Ključne riječi** - Kratak spoj; Superprovodnici; Ograničavač struja kratkog spoja; Power World Simulator

### 1. UVOD

Za kontinuiranu proizvodnju, prenos i distribuciju električne energije neophodno je pravilno dimenzionirati i održavati sve elemente elektroenergetskog sistema. Jedan od ključnih zahtjeva je pravilno održavanje elektroenergetskih prekidača koji treba da budu sposobni da u svakom trenutku prekinu radne struje i struje kvara. Ukoliko prekidač nije u mogućnosti da prekine struju kvara zbog pogrešnog dimenzionisanja prilikom projektovanja ili promjene pogonskih uslova, postoji mogućnost nastanka teških havarija i dugotrajnog prekida u napajanju što rezultuje velikom novčanom štetom. Do povećavanja struja kratkog spoja u odnosu na vrijeme kada je prekidač odabran i instaliran najčešće dolazi zbog izmjene konfiguracije mreže ili zbog dodavanja novih proizvodnih kapaciteta u postojeću mrežu. Promjena topologije mreže ili povećavanje snage proizvodnje rezultuje smanjenjem impedansi mreže, odnosno porastom nivoa struja kratkih spojeva. Kada se ustanovi da je na nekom dijelu mreže struja kvara povećana u odnosu na prekidne moći postojećih prekidača i ostale opreme, potrebno je pokrenuti proceduru za zamjenu prekidača i ostale pripadajuće opreme, kao što su mjerni transformatori, sabirnice i slično. Ova procedura je skupa i vremenski zahtjevna zbog čekanja na isporuku i zamjene opreme. Kao alternativa, može se koristiti oprema kojom se struja kvara ograniči na vrijednost koju postojeća oprema može da podnese. Klasične metode za ograničavanje struja kratkih

spojeva podrazumijevaju ugradnju serijskih prigušnica, povećanje nulte impedanse izborom odgovarajućeg načina uzemljenja zvjezdišta, sekcionisanje mreže i ugradnju transformatora sa povećanom reaktansom rasipanja. Međutim, većina ovih metoda ima nedostatke poput propada napona ili povećanih gubitaka u normalnom radu, velike cijene ili uslova na konkretnom mjestu ugradnje. Novije tehnologije ograničenja struja kratkog spoja podrazumijevaju ugradnju ograničavača struja kratkog spoja (engl. *FCL – Fault Current Limiters*) koji se uglavnom zasnivaju na upotrebi superprovodnih materijala ili poluprovodničkih elemenata. Prednosti savremenih metoda u odnosu na klasične pristupe su: povećana bezbjednost sistema, stabilnost i efikasnost isporuke električne energije; redukovan ili eliminisan gubitak napajanja velikog broja potrošača, redukovani lokalni prekid i vrijeme oporavka nakon što se desi prekid; smanjeni troškovi održavanja; eliminacija sekcionisanih sabirnica i sekcijских prekidača; redukovanje naponskih propada; zaštita od jednostrukih i višestrukih kvarova. Osnovni nedostatak savremenih ograničavača struja kratkih spojeva je što su trenutno skupi pošto su zasnovani na tehnologijama koje nisu u potpunosti razvijene.

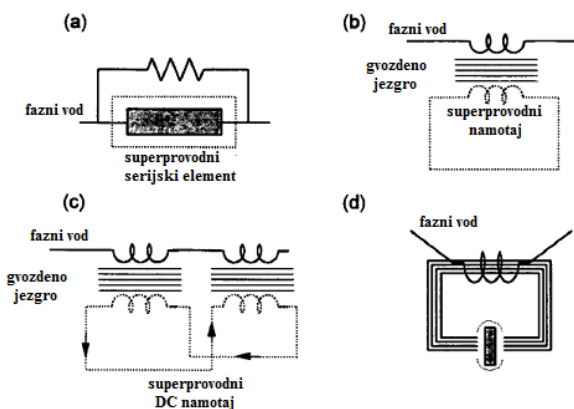
### 2. OGRANIČAVAČI STRUJA KRATKOG SPOJA

#### 2.1. OSKS bazirani na superprovodnicima

U toku trajanja kvara, prekomjerne struje koje se pojavljuju - struje kratkog spoja, teku kroz elektroenergetski sistem uzrokujući djelovanje relejne zaštite i isključenje prekidača ili pregorijevanje osigurača. Ograničavači struja kratkog spoja ograničavaju te struje u sistemu. Trenutno postoji više različitih tehnologija izrade OSKS (ograničavača struja kratkog spoja, što je prevod engleskog termina FCL), a to su: visokotemperaturni superprovodni (engl. HTS), niskotemperaturni superprovodni (engl. LTS), zatim OSKS bazirani na energetske elektronici i mnogi drugi koji će biti predstavljeni u narednim poglavljima. Superprovodnost se definiše kao totalno odsustvo otpornosti. U osnovi postoje četiri načina za ograničavanje struje KS korištenjem superprovodnika, dok će još neki tipovi poput hibridnog superprovodnog ograničavača biti izloženi u nastavku, dok je njihov izgled prikazan na Sl.1. Osnovni su:

a) serijski rezistivni OSKS

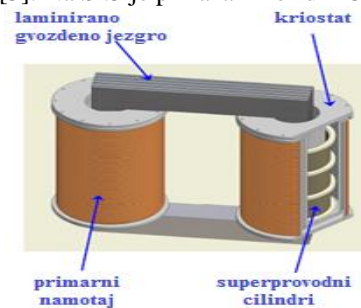
- b) oklopljeni induktivni OSKS
  - c) OSKS na bazi zasićenog induktiviteta
  - d) OSKS sa vazдушnim zazorom [1].
- a) Ovaj metod koristi serijski superprovodnik koji provodi radnu struju. Kad usljed kvara kritična gustina struje materijala bude prekoračena, on se vraća u normalno rezistivno stanje. Ovo se zove promjena iz superprovodnog u normalno stanje (S-N). Prednost ovih superprovodnih provodnika sa niskim gubicima za naizmjeničnu struju kao i novootkrivenih materijala koji pokazuju umjereno oštar prijelaz, omogućavaju da ova tehnika bude primjenjena.
- b) Kod oklopljenog induktivnog OSKS vod koji se štiti se spaja u seriju sa primarnim namotajem oko željeznog jezgra. U toku normalnog rada, superprovodni sekundarni namotaj balansira amper-navojke sa primarnog namotaja tako da fluks ne prolazi kroz željezo. Na početku struje kvara kada struja superprovodnika koja nastoji da balansira primarne amper-navojke prekorači kritičnu vrijednost struje, fluks počinje da se zatvara kroz željezo jer više nema ravnoteže što uzrokuje da induktivitet primarnog namotaja raste brzo i na taj način utiče na smanjenje struje kratkog spoja. U suštini je sličan kao pod a) osim fizičke postavke.
- c) Kod ovog metoda struja teče kroz nekoliko redno vezanih prigušnica koje su namotane na željezna jezgra (reaktor). Željezno jezgro ovog reaktora se drži u zasićenom stanju pomoću sekundarnog superprovodnog namotaja sa jednosmjernom strujom. U slučaju kvara struja kratkog spoja dovodi jezgro u nezasićeno stanje što dovodi do naglog porasta induktiviteta koji ograničava struju kratkog spoja. Dva takva uređaja su stavljena na red da bi se obezbjedilo djelovanje OSKS za oba polariteta napona i struje. Koristi se superprovodni namotaj za jednosmjernu struju umjesto klasičnog bakarnog da bi se smanjili gubici u praznom hodu.
- d) Ovaj slučaj je sličan kao pod b) samo što je sekundarni namotaj zamjenjen sa superprovodnom trakom ubačenom u vazdušni zazor u željeznom jezgru. U toku normalnog radnog stanja superprovodnik izbacuje polje iz vazdušnog zazora



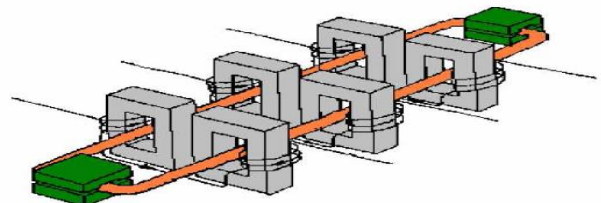
Slika 1. Tipovi OSKS bazirani na superprovodnicima

uzrokujući tako veliku magnetnu reluktansu (otpornost) i nizak primarni induktivitet. U toku kvara superprovodnik ne može više da izdrži struje koje su potrebne da se polje zadrži izvan vazdušnog zazora i magnetna reluktansa pada što dovodi do porasta primarnog induktiviteta i smanjenja struje u primarnom kolu tj. struje kratkog spoja [2].

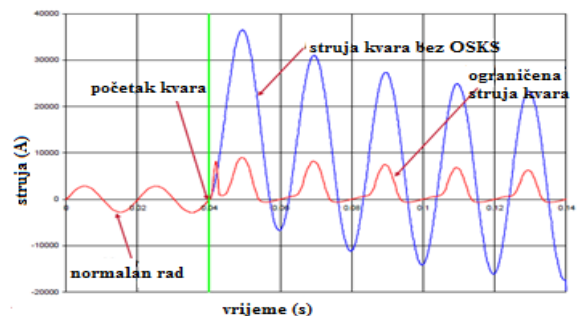
Na Sl. 2 i Sl. 3 je prikazan realan izgled nekih tipova OSKS. Na Sl. 4 se može vidjeti kako izgleda vremenski dijagram pri pojavi struje kvara. Uprkos odličnim karakteristikama SOSKS (skraćeno od Superprovodni Ograničavači Struja Kratkog Spoja) prilikom ograničavanja struja kvara, njihova primjena u mrežama je odložena zbog problema kao što su gubitak naizmjenične struje, troškovi, oporavak posle kvara i sistem sa kriostatom za hlađenje superprovodnika. U svrhu rješavanja ovih problema predloženi su hibridni SOSKS. Razvijeni hibridni SOSKS se sastoji od dijela sa superprovodnim elementom, brzdjelujućeg prekidačkog dijela i dijela za ograničenje struje kvara. U hibridnom SOSKS superprovodni element detektuje stanje kvara i struja kvara biva prekinuta od strane brzdjelujućeg prekidačkog dijela. Struja kvara je limitirana pomoću elementa koji je u paraleli s superprovodnim elementom. Stoga prethodno pomenuti problemi su riješeni sa malim opterećivanjem superprovodnog elementa. Pored toga hibridni SOSKS može da radi i kao limiter struje KS u prvoj polovini periode, a može i da radi i tako da ne limitira struju kvara u prvoj polovini periode. Druga varijanta omogućava struji kvara da teče u toku prve poluperiode nakon nastanka kvara, a zatim počinje da limitira struju kvara. Ovo omogućava koordinaciju sa konvencionalnim relejima i realizaciju optimalne karakteristike ograničavanja struje kvara [3]. Na Sl.5 je prikazan hibridni OSKS.



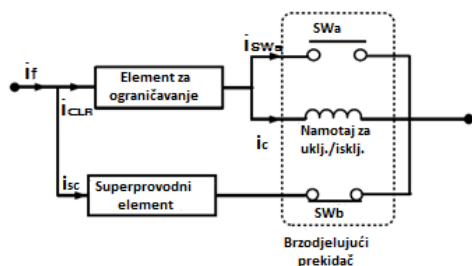
Slika 2. Realni izgled oklopljenog induktivnog tipa



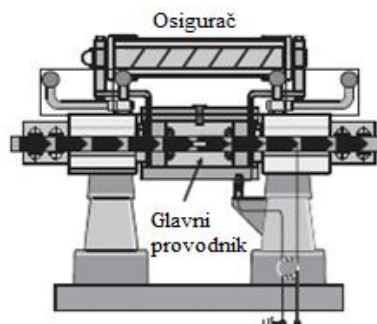
Slika 3. Realni prikaz trofaznog OSKS na bazi zasićenog induktiviteta



Sl. 4. Prikaz ograničavanja struje kratkog spoja pomoću OSKS



Slika 5. Hibridni OSKS



Slika 6. Pirotehnički ograničavač struja kratkog spoja [6]

Idealni OSKS predstavljaju nultu impedansu za sistem u stanju bez kvara, ali u slučaju pojave kvara reaguju dovoljno brzo povećanjem impedanse da bi ograničili struju kvara. Superprovodni OSKS su testirani duži niz godina nudeći karakteristike veoma blizu idealnom OSKS. Nažalost, većina superprovodnih materijala se pokazalo kao izuzetno krhka, teška za proizvodnju i nepraktična za upotrebu. Poslednjih nekoliko godina Rols Rojs i njegovi partneri su razvili ključnu tehnologiju potrebnu za proizvodnju praktičnih SOSKS koji imaju značajne prednosti na velikom broju polja. Uspješno ograničavanje struja kvara je demonstrirano upotrebom elementa od  $MgB_2$  koji pokazuje veliku termičku i mehaničku čvrstoću uprkos uzastopnom izlaganju struji kvara. Dizajn je osmišljen tako da omogući selekciju između struja u normalnom pogonu i struja kvara [4].

## 2.2. Pirotehnički tip OSKS

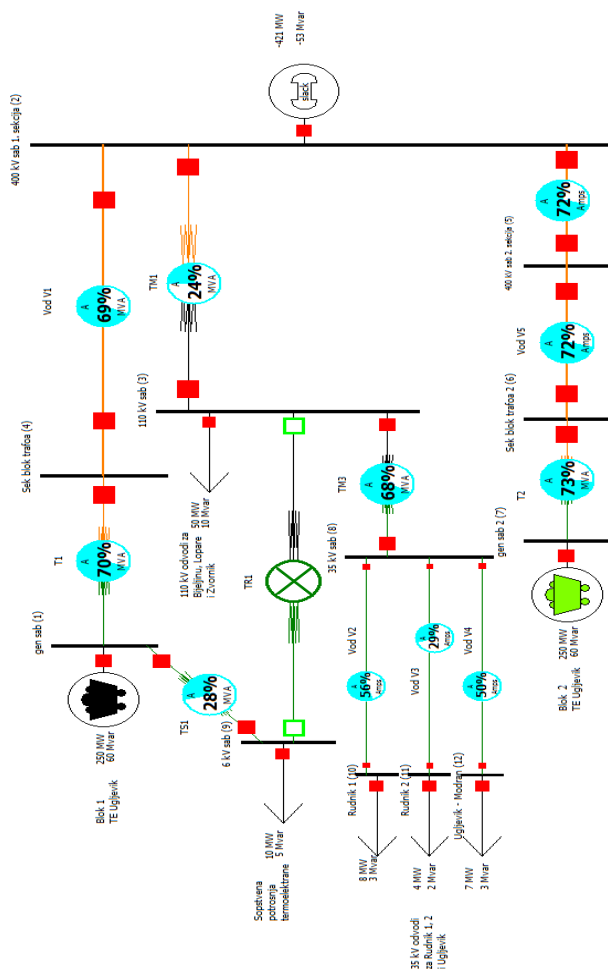
Pirotehnički ili  $I_s$  tip ograničavača je za razliku od svih do sada pomenutih jedini stalno dostupan na tržištu. Svi prethodni su još uvijek u fazi razvoja i ispitivanja. Pirotehnički OSKS ili  $I_s$  – ograničavač kako se drugačije zove je uređaj koji se sastoji od dva paralelna provodnika i prikazan je na slici 6. [6]. Ovi ograničavači se primjenjuju za mreže nominalnog napona do 40,5 [kV] dok im je maksimalna srednja efektivna vrijednost struje koju mogu prekinuti 210 [kA]. Glavni provodnik služi za provođenje struje u normalnom pogonu. Paralelno sa njim se nalazi osigurač velike prekidne moći koji služi za ograničavanje i prekidanje struje kvara. Ograničavanje struje kratkog spoja se vrši već u toku prve poluperiode nakon nastanka kvara. Prekidanje struje kvara se vrši pri prvom prolasku struje kroz nulu.  $I_s$  – ograničavač je snabdjeven sa malom količinom pirotehničkog sredstva odnosno eksplozivnog materijala koje eksplodira pri pojavi struje kratkog spoja i na taj način prekida glavni provodnik preusmjeravajući na taj način struju kvara kroz osigurač. Osigurač struju kvara prvo limitira, a zatim je prekida. Ovaj OSKS je snabdjeven elektronskim uređajem koji nije prikazan na slici 6. i koji služi za detektovanje struje kvara i aktiviranje pirotehničkog sredstva. Vrijeme od trenutka reagovanja do trenutka prekidanja struje kvara je 5-10 [ms]. Nakon reagovanja ograničavača potrebno je u cilju ponovnog funkcionisanja odnosno obezbjeđenja napajanja potrošača zamijeniti glavni provodnik, eksplozivno punjenje i osigurač. To je ujedno i glavna mana ovakvog uređaja, što se ne može „samoresetovati“ već je potrebno neko vrijeme za dolazak na teren i zamjenu dijelova [6].

## 3. PRIMJER OGRANIČAVANJA STRUJA KRATKOG SPOJA U POSTROJENJIMA RITE UGLJEVIK

Na Sl. 7 je prikazana šema napajanja koja je poslužila kao osnov za simulacije. Na šemi se može vidjeti da je prikazan i Blok 2 koji trenutno ne postoji, ali u slučaju njegove izgradnje doći će do promjena u mreži. Kako je suština simulacije da se pokaže šta će se dešavati kada se promjeni topologija mreže, odnosno u ovom slučaju je to situacija kada se Blok 2 uključi u mrežu, može se vidjeti iz tabela 1 i 2 kako se mijenja struja kratkog spoja na sabirnicama 2. Sabirnice 2 su 400 kV sabirnice. Ovdje se kod svih generatora mijenjaju impedanse za subtranzijentni, tranzijentni i ustaljeni period struje kratkog spoja, pa se posle na osnovu tih vrijednosti, kao i vrijednosti vremenskih konstanti koje će kasnije biti prikazane vrši procjena vremenskog oblika struje kratkog spoja [7]. Za simulacije nam je poslužio programski paket Power World Simulator. Treba napomenuti da se ovdje razmatra samo slučaj trolnog kratkog spoja jer oni najčešće izazivaju najveće struje kratkog spoja. Sljedeći slučaj koji je od značaja za dokazivanje porasta nivoa struja kratkog spoja je slučaj kada rade Blok 1 i Blok 2, što će u nastavku izazvati porast struja na istim posmatranim sabirnicama. Tada ćemo imati situaciju kao u tabeli II. Očigledno je struja kratkog spoja porasla u odnosu na slučaj 1. U Power World simulatoru je moguće dobiti matricu admitansi čvorova (sabirnica) koju kada invertujemo dobijamo matricu impedansi čvorova. Ona će nam biti potrebna zbog kasnijeg računanja približnog vremenskog oblika struje kratkog spoja. Te vrijednosti su date u tabeli 3.

Tabela 1: Prikaz vrijednosti struja kratkog spoja na sabirnicama 400 kV za slučaj rada dva generatora

Komponenta struje kvara i period struje kvara	$I_L$ (A)	$I_D$ (A)	$I_{uk}$ (A)
Subtranzijentni period	3178,87	<b>14328,35</b>	17507,22
Tranzijentni period	2776,03	<b>9816,53</b>	12592,56
Ustaljeni period	977,24	<b>2460,62</b>	3437,86



Sl. 7. Model mreže u Power World Simulatoru

Tabela 2: Prikaz impedansi čvorova za oba slučaja

Period struje KS	Impedansa	Slučaj 1	Slučaj 2
Subtranzijentni	$Z''_d(2,2)$ [Ω]	2,56+j15,84	1,76+j13,12
Tranzijentni	$Z'_d(2,2)$ [Ω]	2,64+j23,2	1,84+j18,24
Ustaljeni	$Z_d(2,2)$ [Ω]	6,24+j98,56	3,36+j72,32

Da bismo izvršili procjenu vremenskog oblika struje kratkog spoja koristićemo izraze (1)-(3) [1]:

$$i_a = \sqrt{2} \cdot \left[ (I''_M - I'_M) e^{\frac{t}{T''_M}} + (I'_M - I_M) e^{\frac{t}{T'_M}} + I_M \right] \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

$$- \sqrt{2} \cdot \left[ (I''_M - I'_M) e^{\frac{t}{T''_M}} + (I'_M - I_M) e^{\frac{t}{T'_M}} + I_M \right] \sin \alpha + i_{ar} \cdot e^{-\frac{t}{T_{am}}}$$

$$i_b = \sqrt{2} \cdot \left[ (I''_M - I'_M) e^{\frac{t}{T''_M}} + (I'_M - I_M) e^{\frac{t}{T'_M}} + I_M \right] \sin(\omega t + \alpha - 120^\circ) \quad (2)$$

$$- \sqrt{2} \cdot \left[ (I''_M - I'_M) e^{\frac{t}{T''_M}} + (I'_M - I_M) e^{\frac{t}{T'_M}} + I_M \right] \sin(\alpha - 120^\circ) + i_{br} \cdot e^{-\frac{t}{T_{am}}}$$

$$i_c = \sqrt{2} \cdot \left[ (I''_M - I'_M) e^{\frac{t}{T''_M}} + (I'_M - I_M) e^{\frac{t}{T'_M}} + I_M \right] \sin(\omega t + \alpha + 120^\circ) \quad (3)$$

$$- \sqrt{2} \cdot \left[ (I''_M - I'_M) e^{\frac{t}{T''_M}} + (I'_M - I_M) e^{\frac{t}{T'_M}} + I_M \right] \sin(\alpha + 120^\circ) + i_{cr} \cdot e^{-\frac{t}{T_{am}}}$$

Oznake u prethodnim izrazima imaju sljedeća značenja:

$i_a, i_b, i_c$  – trenutne vrijednosti faznih struja

$I''_M, I'_M, I_M$  – struje kratkog spoja u subtranzijentnom, tranzijentnom i ustaljenom periodu

$T''_M, T'_M$  – procijenjene subtranzijentne i tranzijentne vremenske konstante mreže u subtranzijentnom i tranzijentnom periodu

$T''_{am}, T'_{am}, T_{am}$  – vremenske konstante jednosmjernih komponenti struje kvara u subtranzijentnom, tranzijentnom i ustaljenom periodu

$i_{ar}, i_{br}, i_{cr}$  – trenutne vrijednosti radnih struja u pojedinim fazama u trenutku kvara

Da bismo odredili odnosno procijenili vremenske konstante mreže posmatrano odočno sa mjesta kvara moramo koristiti izraz (4):

$$T''_M = T''_{dip} \frac{X''_M}{X''_{dip}}, T'_M = T'_{dip} \frac{X'_M}{X'_{dip}} \quad (4)$$

gdje su:

$T''_{dip}$  – tipična subtranz. vremenska konstanta (0,02-0,03) [s]

$T'_{dip}$  – tipična tranzijentna vremenska konstanta (0,7-1,6) [s]

$X''_{dip}$  – tipična subtranzijentna reaktansa (0,16-0,28) [r.j.]

$X'_{dip}$  – tipična tranzijentna reaktansa (0,26-0,38) [r.j.]

Tipične subtranzijentne i tranzijentne reaktanse mreže se računaju iz izraza (5):

$$X''_{dip}(\Omega) = X''_{dip}(r.j.) \frac{U_n^2}{S_{sum}}, X'_{dip}(\Omega) = X'_{dip}(r.j.) \frac{U_n^2}{S_{sum}} \quad (5)$$

gdje su:

$U_n$  – nazivni linijski napon mreže [kV];

$S_{sum}$  – suma nominalnih snaga svih generatora u mreži [MVA].

Za procjenu vremenskih konstanti jednosmjerne komponente struje kratkog spoja potrebne su nam odgovarajuće otpornosti prema izrazu (6) [1]:

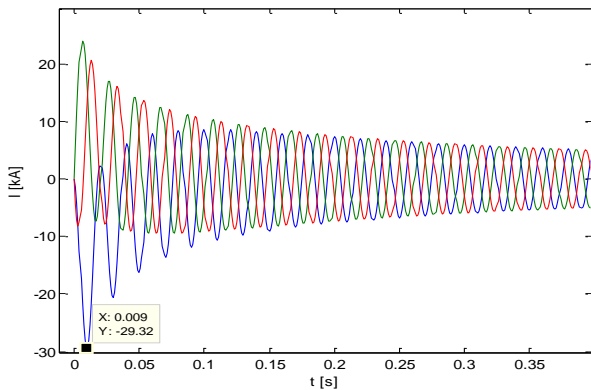
$$T''_{am} = \frac{X''_M}{\omega R_M}, T'_{am} = \frac{X'_M}{\omega R_M}, T_{am} = \frac{X_M}{\omega R_M} \quad (6)$$

Korištenjem programa koji je napisan u obliku .m fajla u Matlabu na osnovu prethodnih podataka se može dobiti vrijednost udarne struje, toplotni impuls, sile na provodnike i još nekoliko bitnih podataka. Na Sl. 8 i 9 je prikazan vremenski oblik struje i toplotni impuls koji se dobija pomoću ovog programa (samo za slučaj 2). U tabeli 4 je prikazano poređenje rezultata pomenuta dva slučaja. Kao što se može vidjeti iz tabele 4 u slučaju da se Blok 2 priključi u mrežu došlo bi do povećanja svih parametara kratkog spoja, a možda najupečatljiviji je podatak da bi udarna struja kratkog spoja bila veća od 25 [kA] što je jedna od standardnih vrijednosti kod mnogih prekidača. Ako pretpostavimo da je to baš slučaj u postojećoj mreži, onda bi u slučaju priključenja Bloka 2 u mrežu bilo potrebno prethodno zamjeniti i taj prekidač. Maksimalna vrijednost sile koja djeluje na sabirnice se dvostruko povećala, pa bi u tom slučaju i one bile više

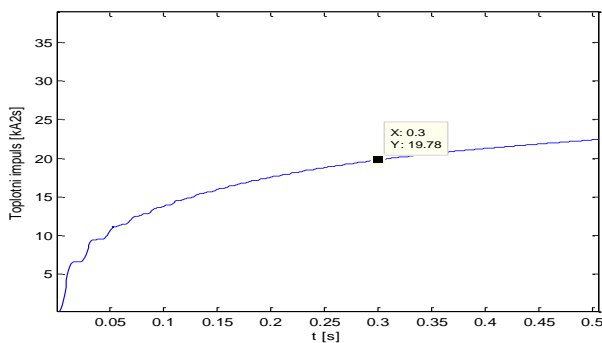
opterećene što bi moglo dovesti do njihove zamjene. Kako sve ovo ne bi moralo da se radi, moguće je ugradnjom ograničavača struja kratkog spoja na određeno mjesto u mreži izbjeći zamjenu pomenutih elemenata.

Tabela 3: Poređenje rezultata za slučajeve 1 i 2

Uporedna analiza za kvar na sabirnicama 400 kV		
	Slučaj 1 (Blok 1)	Slučaj 2 (Blokovi 1 i 2)
$I_{udmax}$ [kA]	20,58	29,32
$A$ [kA <sup>2</sup> s]	7,15	19,78
$F_{max}$ [N/m]	706,1	1432
$I''_D$ [kA]	11,26	14,33
$I'_D$ [kA]	7,11	9,82
$I_D$ [kA]	1,44	2,46



Slika 8. Talasni oblik struje trofaznog kratkog spoja na sabirnicama 400 kV



Slika 9. Toplotni impuls

#### 4. PRIJEDLOG RJEŠENJA PROBLEMA-SLUČAJ 3

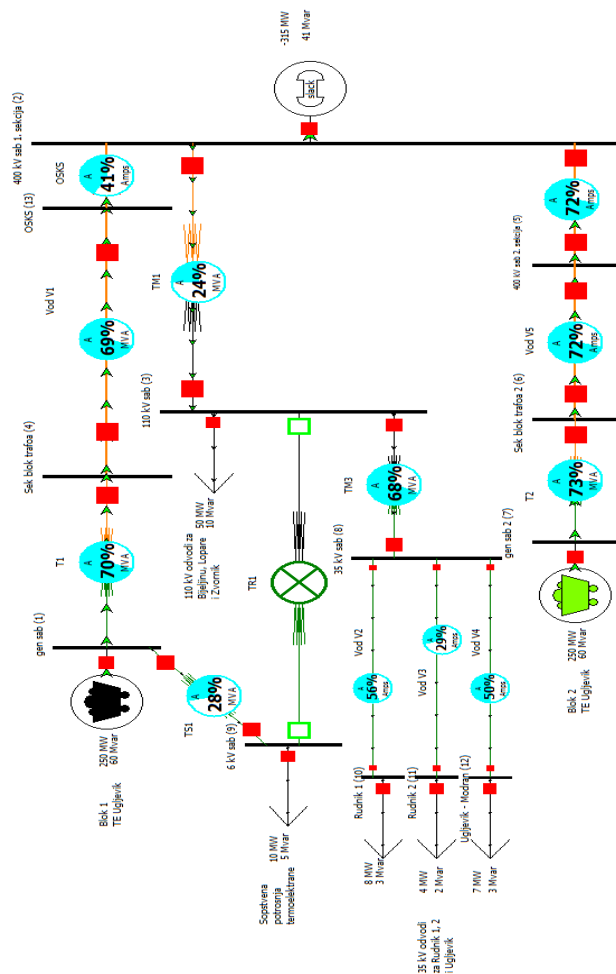
Pošto se ograničavači struja kratkog spoja postavljaju serijski sa vodovima, na Sl. 10 je predloženo mjesto za ugradnju OSKS (između sabirnica 13 i 2). Ograničavač je modelovan sa vodom impedanse  $800+j800$  [ $\Omega$ ] što odgovara OSKS baziranom na energetskej elektronici koji ima  $R_d$  i  $L_d$  za ograničavanje struje kratkog spoja.

Treba izabrati OSKS sa podnosivom strujom od 31,5 kA i nazivnog napona 400 kV te radne struje  $550 A \pm 10\%$  zbog mogućnosti preopterećenja. U tabeli 4 su prikazani rezultati u slučaju ugrađenog OSKS.

U tabeli 5 je prikazano poređenje rezultata u kojoj se vidi efikasnost ugrađenog OSKS.

Tabela 4: Prikaz vrijednosti struja kratkog spoja na sabirnicama 400 kV za slučaj rada dva generatora i OSKS

Komponenta struje kvara i period struje kvara	$I_L$ (A)	$I_D$ (A)	$I_{uk}$ (A)
Subtranzijentni period	3178,87	<b>5621,02</b>	8799,72
Tranzijentni period	2776,03	<b>4580,29</b>	7356,32
Ustaljeni period	977,24	<b>1492,59</b>	2469,83



Sl. 10. Izgled modela mreže sa ugrađenim OSKS

Tabela 5: Poređenje rezultata za slučajeve 1, 2 i 3

Uporedna analiza za slučajeve 1, 2 i 3			
	Slučaj 1	Slučaj 2	Slučaj 3 (uz OSKS)
$I_{udmax}$ [kA]	20,58	29,32	13,11
$A$ [kA <sup>2</sup> s]	7,15	19,78	6,89
$F_{max}$ [N/m]	706,1	1432	286,3
$I''$ [kA]	11,26	14,33	5,62
$I'$ [kA]	7,11	9,82	4,58
$I$ [kA]	1,44	2,46	1,49

#### 5. ENERGETSKA EFIKASNOST OSKS

- Energetska efikasnost OSKS se ogleda u sljedećem:
- ugradnjom OSKS se sprječavaju havarije u postrojenjima usljed kojih bi pokretanje većih pogona koji su povezani sa tim postrojenjem koštalo puno što takođe doprinosi energetskej efikasnosti;
  - niz prednosti koje doprinose ukupnoj energetskej efikasnosti EES-a kao što su: povećana bezbjednost sistema,

stabilnost i efikasnost sistema kod isporuke električne energije; redukovan ili eliminisan gubitak napajanja velikog broja potrošača, redukovani lokalni prekidi i vrijeme oporavka nakon što se desi prekid; smanjeni troškovi održavanja tako što će se zaštititi oprema za prenos i distribuciju električne energije od konstantnih električnih udara kojima je izložena i koja degradira opremu i uzrokuje velike troškove održavanja; redukovanje naponskih propada uzrokovanih postojanjem visokoimpedantnih elemenata sistema; zaštita od jednostrukih i višestrukkih kvarova.

## 6. ZAKLJUČAK

Kao što se može vidjeti, upotreba OSKS ima elementa energetske efikasnosti. Pored prednosti koje su navedene u prethodnim poglavljima u odnosu na konvencionalne metode ograničavanja struja kratkog spoja ostalo je još da se dokaže ekonomska isplativost. Prema podacima iz tenderskih dokumenata Elektroprenosa BIH, cijena pripreme, projektovanja i izgradnje kompletnog dalekovodnog polja 400 kV u postojećoj trafostanici sa pripadajućim dijelom sabirnica sa dva sistema sabirnica iznosi 2.000.000 KM sa uračunatim PDV. Jedan ograničavač struja kratkog spoja prema podacima kompanija ABB (tip „*Is-Limiter*“) i AREVA (T&D) (tip „*CliP*“) koji inače nisu bazirani na superprovodnim elementima i deset puta su jeftiniji od onih sa superprovodnicima, košta oko 1.500.000 KM pri čemu ima karakteristike navedene u poglavlju 4. Ovdje treba uračunati i duže vrijeme zastoja potrebno za zamjenu elemenata postrojenja koje je veće od vremena ugradnje ograničavača, a ta razlika u vremenu pomnožena sa cijenom neisporučene električne energije daje još veću razliku u cijeni, što takođe ide na stranu uštede energije, što zbog razlike u vremenu zastoja, što zbog mogućih penala usled neisporučene električne energije.

Na ovaj način dokazana je ekonomska opravdanost ugradnje ograničavača struja kratkog spoja koji će vjerovatno u bliskoj budućnosti postati uobičajena pojava u elektroenergetskim postrojenjima.

## 7. ZAHVALNICA

Posebnu zahvalnost dugujem profesoru Čedomiru Zeljkoviću sa Elektrotehničkog fakulteta u Banjoj Luci koji mi je mentor na izradi završnog rada drugog ciklusa sa naslovom “Savremene metode za ograničavanje struja kratkog spoja u elektroenergetskim mrežama”.

## 8. LITERATURA

- [1] Andrew J. Power, “An overview of transmission fault current limiters”, IEE, Savoy Place, London, UK, pp1-5, 1995.
- [2] F. Mumford; A. Usorkin, “Inductive and resistive HTS Fault Current Limiters”, *AREVA T&D+Bruker HTS, Areva Research Centre, Braunschweig*, pp 12-35, May 13.2009.
- [3] Jin-Seok Kim; Sung-Hun Lim; Jae-Chul Kim, „Comparative Analysis on Current Limiting Characteristics of Hybrid Superconducting Fault Current Limiters (SFCLs) with First Half Cycle Limiting and Non Limiting Operations”, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Volume 7, No. 5, pp 659-663, 2012.
- [4] Paul Hopewell; Mark Husband; Alexander Smith, “A practical superconducting fault current limiter”, *CIREC, 20th International Conference on Electricity Distribution*, pp1-4, Prague 8-11 June 2009.
- [5] Manuel Weiland; Christoph Hahn; Gerhard Herold, “Control Strategies for a Power Electronic Based Fault Current Limiter (FCL) in No-Fault Operation”, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ 2012)*, Santiago de Compostela (Spain), pp 1-5, 28th to 30th March, 2012.
- [6] Nasser Tleis, “Power Systems Modeling and Fault Analysis”, Elsevier, Burlington - SAD, 532-533, 2008.
- [7] Milenko Đurić, „Visokonaponska postrojenja”, Beopres, Beograd, pp161-206, 2009.

**Abstract** - The increase of fault current level, caused by network topology changes or new power source addition, can cause that certain circuit breakers and other equipment in facilities cannot longer properly be used. Meanwhile, the new fault current limiter (FCL) technologies have appeared on the market. Their application may postpone the investments in new switchgear equipment. The most of FCLs are based on superconductors or electronic elements. In this paper it is shown on a practical example how fault current level raises when new generators are added to a network, at which place is suggested to implant FCL and which effects are achieved. Energy efficiency of FCLs is also important and it is given at the end of this paper. Along with the technical calculation, a short economic analysis is given.

### MODERN METHODS FOR FAULT CURRENT LIMITING IN POWER GRIDS IN ENERGY EFFICIENCY SERVICE

Branimir N. Petrović