

Dodatak G

Kvarovi usled upotrebe Is Limitera

Koautor: Tomislav Rajić

G.1 Razlog uvođenja Is Limitera

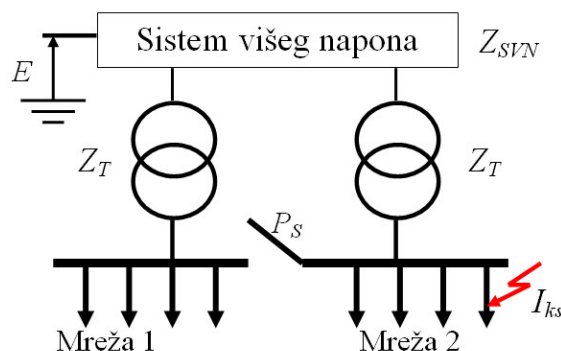
Prilikom projektovanja postrojenja, vrši se izbor adekvatne opreme. Prekidači moraju biti u stanju da prekinu najveće moguće očekivane struje kvara. Ukoliko se tokom eksploatacije izgrađuju novi izvori i mreža razvija, može se dogoditi da se struje kvara značajno uvećaju iznad prekidne moći prekidača i kratkotrajne podnosive struje ostale opreme. U tom slučaju morala bi da se zameni oprema tako da nova oprema može da podnese i isključi uvećane struje kvara. U slučaju kada se srednjenaponska mreža napaja iz sistema višeg napona preko dva transformatora koja rade u paraleli, da se ne bi vršila zamena celokupne opreme u mreži srednjeg napona, može se sekcionisanjem sabirnica sistem na niženaponskoj strani razdvojiti na dva odvojena sistema. Svaki od razdvojenih sistema napaja iz se iz jednog transformatora, što omogućava da se impedansa kratkog spoja gledana sa niženaponske strane uveća i smanji struja kratkog spoja u bilo kom delu niženaponske mreže. Na slici G.1 prikazan je princip smanjenja struje kvara sekcionisanjem sabirnica.

Oznake na slici G.1 imaju sledeće značenje:

E -Ekvivalentna elektromotorna sila kompletnog sistema višeg napona, $E = 123 \text{ kV}$,

Z_{SVN} -ekvivalentna kompleksna impedansa sistema 123 kV, svedena na stranu 33 kV,

Z_T - kompleksna impedansa kratkog spoja transformatora 123/33 kV, svedena na stranu 33 kV,



Slika G.1: Princip smanjenja struje KS sekcionisanjem sabirnica

P_S -prekidač u spojnom polju,

$\underline{I_{KS}}$ -struja kratkog spoja na 33 kV strani.

U slučaju kada sabirnice nisu sekcionisane, struja trolnog kratkog spoja na izvodu 33 kV bi bila:

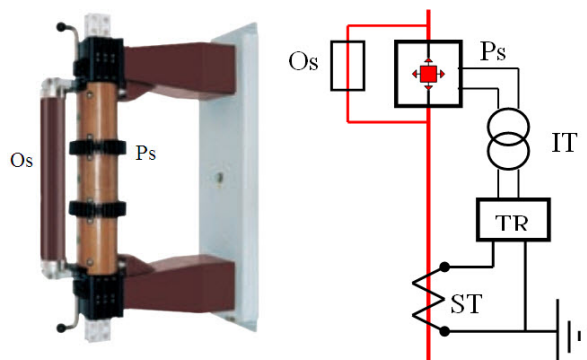
$$\underline{I_{KS}} = \frac{E}{\underline{Z_{SVN}} + \underline{Z_T} \cdot 0.5} \quad (G.1)$$

Kada se prekidač P_S otvori, sabirnice su sekcionisane i struja kratkog spoja na odvojenom delu sistema 33 kV bi imala vrednost:

$$\underline{I_{KS}} = \frac{E}{\underline{Z_{SVN}} + \underline{Z_T}} \quad (G.2)$$

Ukoliko se želi da se sačuva fleksibilnost sistema, u normalnom pogonu sistem radi sa paralelnim transformatorima. Da bi se omogućilo brzo sekcionisanje sabirnica pri kratkom spoju, uvodi se novi rasklopni elemenat koji može veoma brzo da razdvoji vezu između paralelno vezanih sistema sa niženaponske strane u trenutku kvara. Uređaj koji je uveden naziva se Is Limiter.

Is limiter je uređaj koji ima zadatak da spreči pojavu velikih vrednosti struja već u prvoj poluperiodi nakon nastanka kvara. Predviđen je za srednjenaponske mreže. Ovaj elektroenergetski rasklopni uređaj sastoji se od elementa sa eksplozivnim punjenjem koji trenutno prekida struju kroz svoje kolo i preusmerava je na paralelno postavljene osigurače velike prekidne moći, koji preuzimaju na sebe tu struju i prekidaju je pre dostizanja maksimalne vrednosti. U nastavku procesa, dve mreže bi praktično bile razdvojene i postojeća oprema bi prekinula ograničenu struje kvara. Na slici G.2 levo pokazana je fotografija uređaja, a desno šema.



Slika G.2: Fotografija Is Limitera(levo) i šema delovanja (desno)

Oznake na slici G.2 imaju sledeće značenje:

P_S -Brzi prekidač sa eksplozivnim punjenjem.

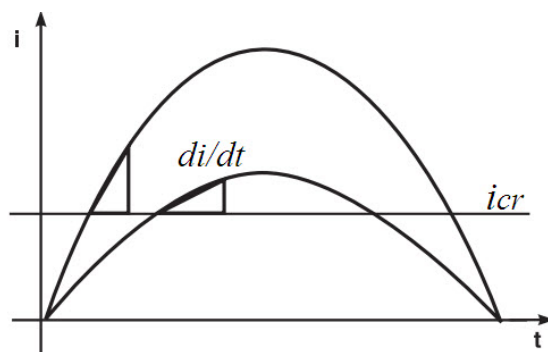
O_S -Visokoučinski osigurač.

ST -Strujni transformator (detektuje struju kratkog spoja).

TR -Merni i okidački uređaj koji meri parametre struje i određuje trenutak za trigero-
vanje.

IT -Impulsni izolacioni transformator koji signal za okidanje iz okidačkog uređaja koji
je na potencijalu zemlje dovodi na potencijal faza sistema 33 kV na kome se nalazi
Is Limiter.

Na slici G.3 pokazano je kako uređaj detektuje kritičnu vrednost struje pre uspostavljanja prvog maksimuma.



Slika G.3: Kriterijum za procenu kritične vrednosti struje pre maksimalne vrednosti

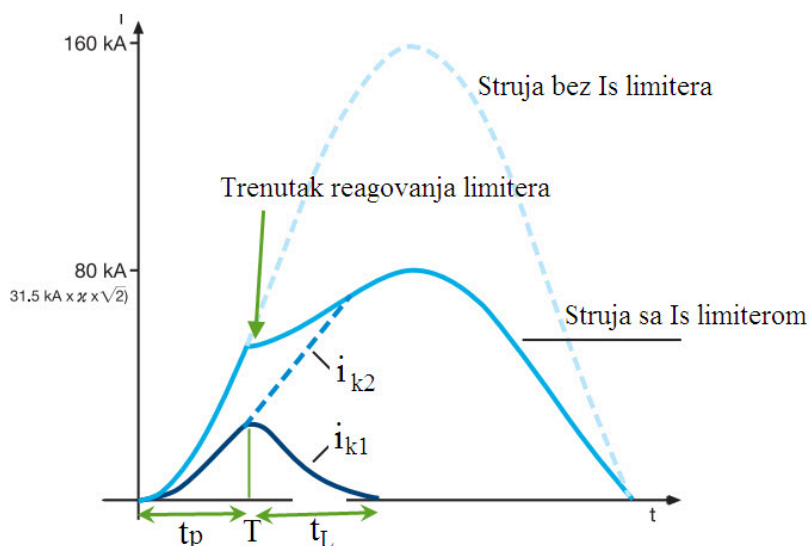
Da bi se detektovala struja merni i okidački uređaji mere sledeće veličine:

- -trenutnu vrednost struje i procenjuje se da li je veća od kritične struje i_{cr}
- -strminu porasta struje di/dt .

Strmina struje di/dt je važan pokazatelj o daljem trendu porasta struje, tako da se struja na vreme može prekinuti. Ukoliko je pri kritičnoj struji i_{cr} veća strmina struje, to je pokazatelj da se može očekivati veća temena vrednost struje kratkog spoja.

Hiperbrzi prekidač sa eksplozivnim punjenjem prekida struju kroz prekidač i preusmerava kroz osigurač, što omogućava da se na prekidaču ne pojavi luk zbog malog pada napona na osiguraču. Reagovanje prekidača je funkcija podešene struje i_{cr} , kao i strmine struje di/dt . Struja kratkog spoja može da poraste iznad struje okidanja i_{cr} i prekidanja struje kroz brzi prekidač P_S sve dok ne počne proces pregorevanja osigurača Os .

Na slici G.4 prikazane su komponente struje koje napajaju mesto kratkog spoja direktno iz transformatora i_{k2} ili preko Is Limitera i_{k1} , prema slici G.1. Struja i_{k1} ograničena je dejstvom osigurača i naglo se približava nuli pre prirodnog prolaska kroz nulu.



Slika G.4: Komponente struje koje napajaju mesto kratkog spoja direktno iz transformatora i_{k2} ili preko Is Limitera i_{k1}

Kao što se može videti na slici G.4, struja kvara bi dosegla vršnu vrednost od 160 kA da nije instaliran Is limiter. Is limiter seče struju i praktično eliminiše udeo leve mreže na slici G.1 u ukupnoj struji kvara. Struja kvara i_{k2} nije izobličena prelaznim procesom usled luka u osiguraču.

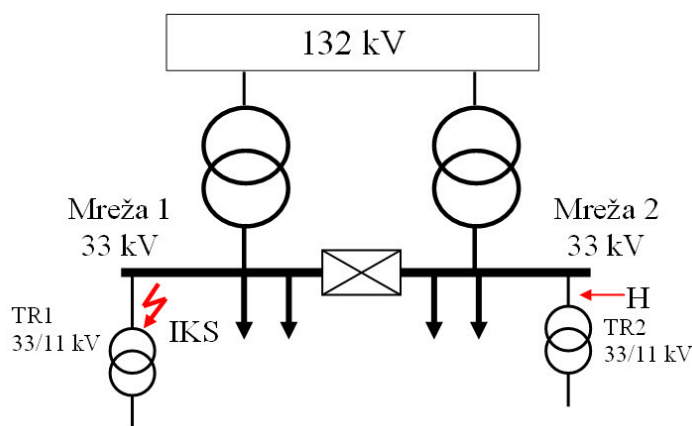
Struja i_{k1} je ograničena usled delovanja električnog luka koji povećava pritisak u osiguraču, što dovodi do intenzivnog povećamka otpora luka zbog hlađenja u dodiru sa peskom.

Vremenski period t_p je pre reagovanja limitera i struja i_{k1} je neizobličena. U periodu t_L posle prekida struje u limiteru nastaje pregorevanje osigurača i pojava električnog luka unutar osigurača. Što je intenzivnije gašenje luka u osiguraču, brzina opadanja struje će biti veća. Strmina struje pri pregorevanju osigurača di_L/dt od velike je važnosti za mogućnost nastanka prenapona usled naglog sečenja struje.

G.2 Opis sistema

Sistem je modelovan i prelazni proces simuliran pomoću komercijalnog softvera pod nazivom DigSilent PowerFactory [114]. Analizirana je primena Is limitera u sistemu koji se sastoji od dve industrijske mreže nazivnog napona 33 kV. Mreža većim delom sadrže motore, ali poseduju i svoje generatore. Jedna mreža ima 6, a druga 4 generatorske jedinice. Preko dva transformatora 132/33 kV napajaju se glavne sabirnice u obe mreže iz visokonaponske napojne mreže 132 kV. Neutralne tačke u obe mreže su uzemljene preko otpornika, tako da je struja zemljospoja ograničena na 100 A.

Na slici G.5 prikazana je blok šema kojom se pojednostavljeno predstavlja sistem tokom havarijskog scenarija. IKS je inicijalni KS, a H predstavlja havariju usled prenapona generisanog radom Is Limitera u mreži 1.



Slika G.5: Blok šema sa označenim havarijskim sekvencama

Merno-akvizicioni moduli relejne zaštite beleže stanja i promene u sistemu. Opisane su snimljene sekvence havarijskog događaja čija će analiza poslužiti za modelovanje Is limitera. Hronologija havarijskog događaja je predstavljena u Tabeli G.1.

Inicijalni zemljospoj se desio u Mreži 1 na visokonaponskim (VN) priključcima transformatora TR1 u trenutku $t=0$ s. Struja zemljospoja ograničena je na 100 A. Kada kvar preraste u dvofazni KS sa zemljom, dolazi do pojave velikih vrednosti struja koje prolaze

Tabela G.1: Hronologija havarijskog događaja

R.Br.	Vreme (ms)	Objekat	Događaj
1	0	Mreža 1/TR1	Zemljospoj na priključku B TR1
2	41	Mreža 1/TR1	Zemljospoj na priključku A TR1
3	42	Is-limiter	Is-limiter reaguje u fazama A i B
4	43	Mreža 2/TR 2	Preskok na priključcima faza A i B
5	66	Mreža 1/TR1	Kvar u fazi C TR1
6	68	Is-limiter	Is-limiter reaguje u fazi C
7	70	Mreža 2/TR 2	Preskok na priključku u fazi C

kroz vezu gde se nalazi Is-limiter u trenutku $t=41$ ms. Dešava se reagovanje Is limitera u dve faze pogođene kvarom u trenutku $t=42$ ms. U trenutku $t=66$ ms, dolazi do kratkog spoja preostale faze C sa zemljom. To dalje implicira otvaranje pola Is-limitera i u toj fazi u trenutku $t=68$ ms. Treba uočiti da se nakon svakog reagovanja Is limitera, javljaju preskoci na priključcima TR 2 u Mreži 2. Pretpostavlja se da to prouzrokuju prenaponi, nastali prilikom reagovanja Is limitera i prekidanja struje pomoću osigurača.

Na slici G.6 prikazana je fotografija priključne kutije u kojoj su priključci za prolazne izolatore za TR2, u kojoj je nastala havarija.

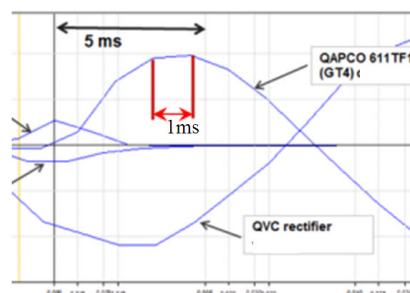


Slika G.6: Izgled havarisane priključne kutije u kojoj se nalaze prolazni izolatori 33 kV transformatora

G.3 Merno-akvizicioni sistem

Sistem digitalne relejne zaštite snabdeven je merno-akvizicioni sistemom koji može registrovati tranzijentne pojave napon i struje. Na osnovu snimaka je procenjeno da je period

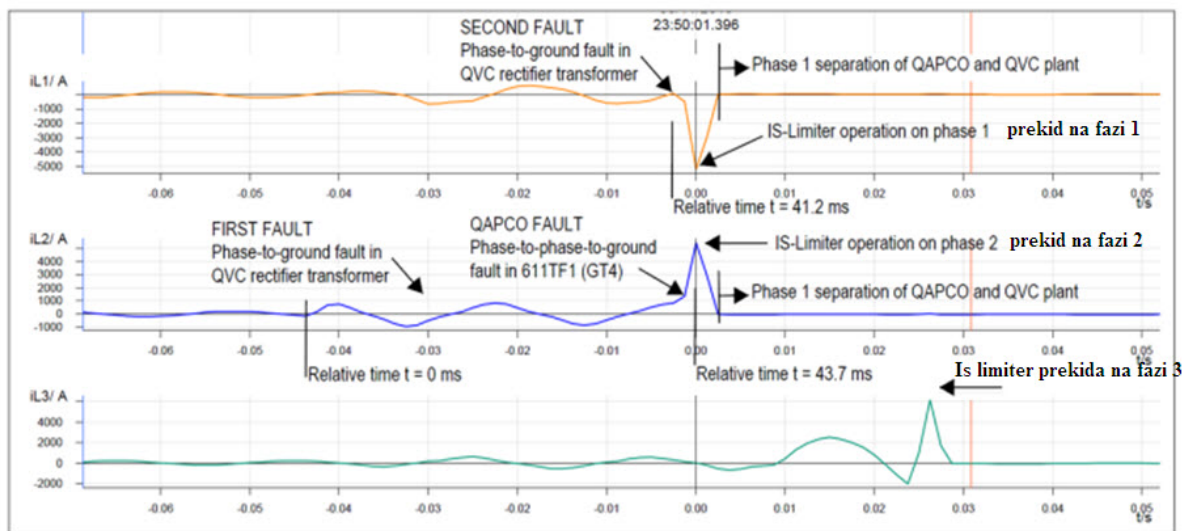
odabiranja uzoraka merno-akvizicionog sistema 1 ms. Na slici G.7 prikazana je struja snimljena merno-akvizicionim sistemom i jako razvučena po vremenskoj skali.



Slika G.7: Procena koraka uzorkovanja merno-akvizicionoh sistema relejne zaštite

Na slici se jasno vidi kako su susedne tačke dobijene odabiranjem, spojene pravim linijama.

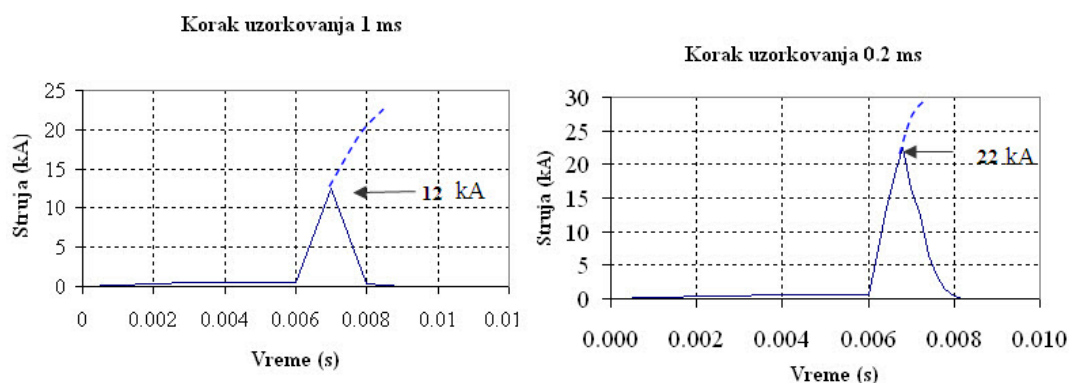
Snimci talasnih oblika struja kroz Is limiter preuzeti sa merno-akvizicionog sistema relejne zaštite, iz studije [115], prikazani su na slici G.8.



Slika G.8: Snimci talasnih oblika struja kroz Is limiter preuzeti iz [115]

Na slici G.8 označeni su trenutci kada dolazi do prekidanja struje pomoću Is limita na fazama 1, 2 i 3. Može se uočiti da na svakoj fazi u trenutku nastanka kvara struja linearno raste do maksimuma, a zatim linearno opada, što je posledica male brzine uzimanja uzoraka, tako da jedna tačka je pre početka porasta struje, druga je u toku porasta struje, a treća je već nakon isključenja. Iz tog razloga se uopšte ne može proceniti trenutna vrednost struje u trenutku reagovanja Is limita, kao ni maksimalna vrednost struje i strmina struje u toku porasta i opadanja prilikom gašenja luka u osiguraču.

Da bi objasnio uticaj brzine odabiranja uzoraka na tačnost rezultata, urađena je simulacija prelaznog procesa pri nastanku KS sa različitim koracima simulacije. Na slici G.9 prikazana je simulacija snimka struje ustaljenog režima amplitude 0.6 kA na koju se superponira struja kratkog spoja 31 kA. Na slici levo prikazana je kriva za korak uzorkovanja 1 ms, a na slici desno korak uzorkovanja je 0.2 ms. Zbog toga je na slici levo odabrana tačka kada je trenutna vrednost struje KS u trenutku početka gašenja luka u osiguraču zabeležena da je 12 kA. Na slici desno, gde ima 5 puta više uzoraka, zabeležena je vrednost struje od 22 kA. Još važnije je da je na slici levo strmina struje opadanja mogla da se izračuna kao $S = 12/0.001 = 12000$ kA/s. Na slici desno strmina opadanja struje nije linearna zbog sitnijeg koraka proračuna i promene struje usled uticaja gašenja luka u prekidaču.



Slika G.9: Snimak simulacije kratkog spoja-levo kriva za korak uzorkovanja 1 ms, a na slici desno korak uzorkovanja je 0.2 ms

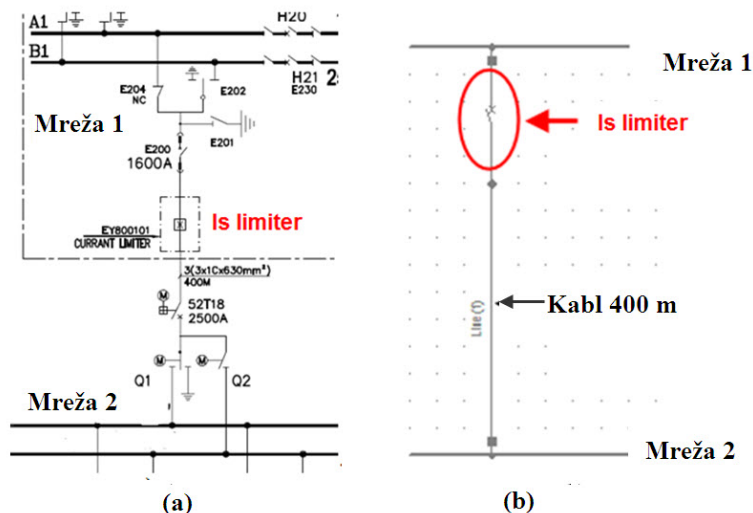
Struja KS je prikazana do 12 kA, kada je osigurač Is limitera ograničava, tako da je tačkasto označen predpostavljen tok struje koja bi se uspostavila kada ne bi bilo ograničavanja. Početak registracije struje KS definisan je tačkom u trenutku 0.006 s, druga tačka je registrovana u trenutku 0.007 s kada se uspostavlja maksimalna vrednost struje od 12 kA pre reagovanja osigurača, a treća tačka je registrovana u trenutku 0.008 s kada je došlo do potpunog prekidanja struje zbog dejstva osigurača. Desno je izvršena simulacija sa korakom 0.2 ms. Proces uspostavljanja struje KS takođe nastupa u trenutku 0.006 s, ali reagovanje osigurača Is limitera nastupa u trenutku 0.0068 s. Od tog trenutka počinje proces gašenja luka u osiguraču koji sada nije linearan, već se struja u početku procesa brže smanjuje, a zatim se intenzitet gašenja smanjuje, pa se proces usporava. Ovo je numerička simulacija koja služi samo za ilustraciju greške usled neadekvatnog koraka uzorkovanja i nije povezana sa analiziranim događajima, ali je vezana za mogućnost pogrešne interpretacije štetnog događaja.

G.4 Modelovanje Is limitera

Model Is limitera je razvijen na osnovu realnih snimaka sa merno-akvizicionog sistema. Struja kvara se naglo smanjuje nakon reagovanja Is limitera. Prilikom reagovanja prekidača sa eksplozivnim punjenjem, struja kvara se naglo prebacuje na topljivi osigurač, koji preuzima struju kvara i intenzivno gasi električni luk u komori osigurača. Što je struja kvara koju prekida osigurač veća, pritisci gasova razvijenih u električnom luku su veći i luk se intenzivnije gasi. Pri vrlo velikim strujama kvara trajanje struje je veoma kratko. Ovde je usvojen pojednostavljen model koji se svodi na sečenje struje u trenutku preuzimanja struje kvara od strane osigurača.

Na osnovu slike G.9 uvodi se modelovanje preko srednje strmine struje kao odnosa izmerene struje pri kojoj osigurač Is limitera reaguje, podeljenim sa jednim korakom proračuna. Na osnovu slike G.8 može se vodeti da se opadanje struje pri gašenju luka završava između dve susedne sekvence uzimanja uzoraka..

U programu DigSilent je iskorišćen model prekidača koji može da seče struju pre njenog prirodnog prolaska kroz nulu. Od trenutka kada osigurač Is limitera reaguje, u sledećem koraku koji je usvojen da je 1 ms, kao što je vreme uzorkovanja akvizicionog softvera, smatra se da je struja prekinuta. Numerički program podrazumeva da je pri sečenju struja linearno opadala u toku jednog koraka. Na slici G.10 prikazan je deo šeme mreže sa Is limiterom (a) i model formiran u softveru (b).

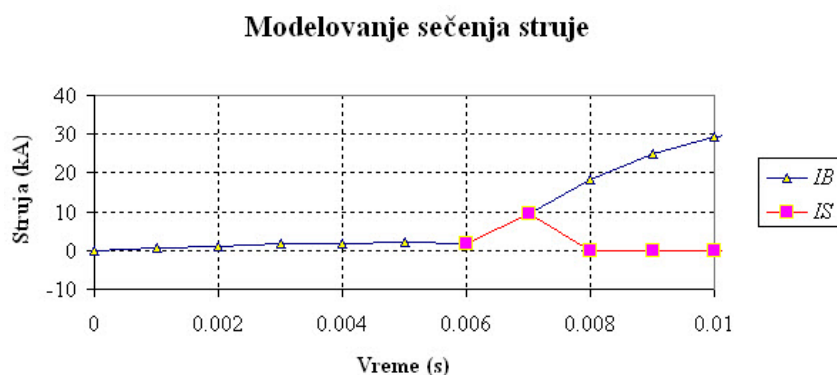


Slika G.10: Deo mreže sa Is limiterom a) prikazan u projektnoj dokumentaciji i b) model izdvojen iz ekranskog prikaza u softveru

Model osigurača nije detaljno razvijen u softveru, a ni u literaturi se ne mogu naći opšte prihvaćeni rezultati za simulaciju gašenja luka. Zbog toga je luk zanemaren u modelu celokupnog Is limitera. Usvojeni model daje kritičnije rezultate nego kada bi se

obuhvatao uticaj električnog luka. Međutim, kako je ustanovljena koincidencija reagovanja Is-limitera i pojava prenapona koja je izazvala kvarove, usvojen je ovaj model radi sagledavanja okolnosti u mreži koje nastaju pri kratkim spojevima kada Is-limiter reaguje. Sa tog aspekta, smatra se da je dovoljno modelovati Is limiter idealnim prekidačem koji trenutno seče struju, a faktički se struja linearno menja između tačke gde je inicirano opadanje struje i sledeće tačke u kojoj je struja nula.

Na slici G.11 predstavljen je pojednostavljeni model prekidača koji seče struju između dva uzastopna koraka proračuna.

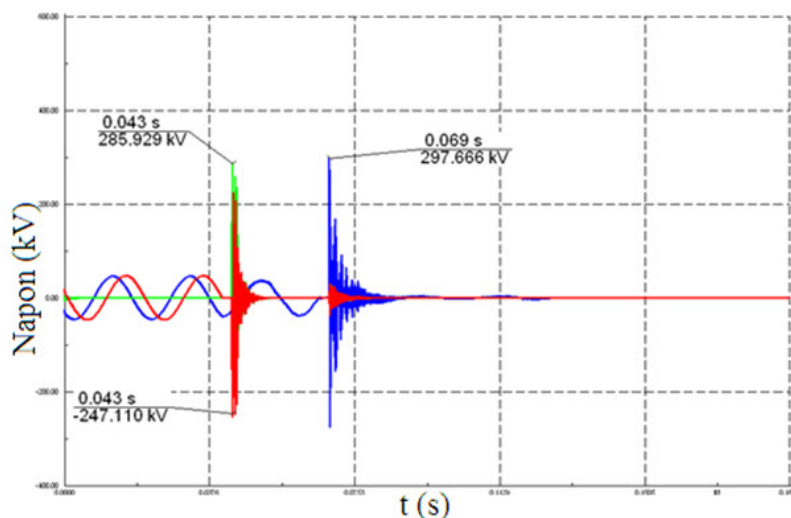


Slika G.11: pojednostavljeni model prekidača koji seče struju između dva uzastopna koraka proračuna

Na slici G.11 oznaka *IB* označava struju koja bi nastala kada ne bi bilo Is limitera, a oznaka *IS* označava sečenu struju. S obzirom da se struja kvara naglo smanjuje, pretpostavlja se da bi reagovanje prvog pola Is limitera, sa eksplozivnim punjenjem, prouzrokovalo pojavu sklopnih prenapona. Da bi se ispitala korektnost navedene pretpostavke, izvršene su simulacije kvarova u navedenim mrežama. Pretpostavka je da pri vrlo velikim strujama kvarova, kada Is limiter naglo prekine struju, topljivi osigurač zbog razvoja električnog luka koji stvara visok pritisak u unutar kućišta, veoma intenzivno gasi električni luk, što se u proračunima manifestuje kao sečenje struje. U realnosti se gašenje luka ne odvija trenutno, kao što je u ovom radu modelovano, ali u svakom slučaju opadanje struje je veoma brzo. Matematički model gašenja luka u osiguračima za ograničavanje struje je složen i očekuje se da u budućnosti bude implementiran u proračune [116], [117].

Simuliran je opisani havarijski scenario. Posmatrani su talasni oblici napona na VN priključcima TR 2 33/11 kV u mreži 2 jer je na tom mestu došlo do preskoka. Spisak događaja koji je simuliran, naveden je u Tabeli G.1. Prvo se simulira zemljospoj u fazi B, dve periode kasnije dešava se kvar u fazi A, što bi trebalo da izazove reagovanje limitera u dve pomenute faze. Na kraju se simulira kvar u trećoj fazi i reagovanje limitera u toj preostaloj fazi. Struja reagovanja limitera podešena je na 7 kA. Na slici G.12 prikazani su izračunati talasni oblici napona na VN priključcima TR 2 33/11 kV u mreži 2 tokom

navedenog scenarija. TR 2 je povezan na glavne sabirnice 33 kV mreže 2. Proračun je rađen sa podešenom vrednošću reagovanja Is limitera od 7 kA.



Slika G.12: Talasni oblici napona na VN priključcima TR 2 33/11 kV u mreži 2

Jasno je da sečenje struje izaziva pojavu visokih prenapona u mreži 2. Prenaponi u fazama A, B i C iznose 247 kV, 286 kV i 298 kV respektivno. To svakako može biti uzrok međufaznog kvara sa zemljom na tom transformatoru. Može se smatrati da su ovo približni rezultati, jer vreme isključenja osigurača može da bude i kraće od vremena uzorkovanja. U svakom slučaju ovakvi proračuni se mogu sprovoditi samo kada se poznaje vreme uzorkovanja akvizicionog sistema i program za proračun radi sa istim korakom.

G.5 Zaštita od prenapona

G.5.1 Analiza primene odvodnika prenapona

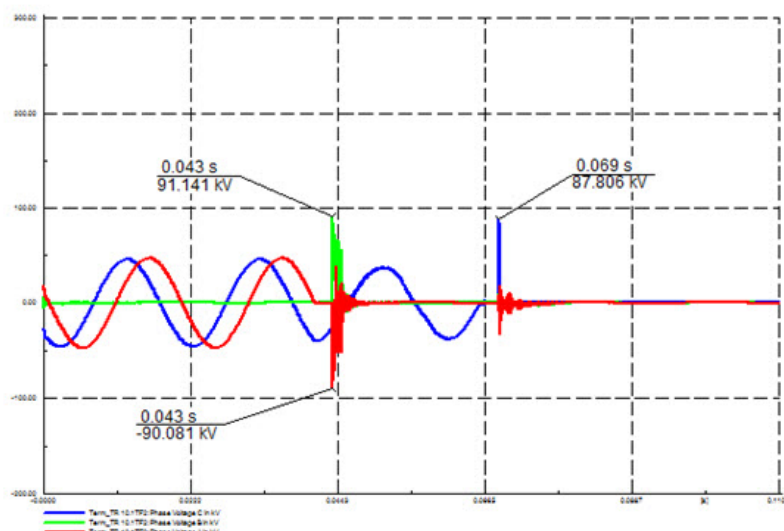
Izvršena je analiza uticaja zaštite od prenapona primenom odvodnika prenapona. Ponovljen je havarijski scenario opisan u prethodnom poglavlju. U tabeli G.2 prikazana je karakteristika preostalog napona primenjenog odvodnika prenapona u funkciji atmosferske udarne struje oblika $8/20 \mu s$. Odvodnike prenapona treba ugraditi što je moguće bliže transformatoru. Optimalno mesto je da se promeni priključna kutija na transformatoru, tako da ima mesta da se stave odvodnici u sikonskom kućištu direktno ispred prolaznih izolata, a svi krajevi za uzemljenje odvodnika da se vežu za jednu sabirnu šinu, koja je vezana za kućište transformatora, ali takođe posebnim uzemljivačkim spustem vezana za uzemljivač postrojenja. Ukupna dužina veze odvodnika do priključka za prolazni izolator

transformatora i od priljučka za uzemljenje odvodnika do veze za kućište transformatora je grubo procenjeno da je 1 m.

Tabela G.2: Preostali napon odvodnika SIEMENS 3EK7 360 4CH4 za atmosfere struje pražnjenja standardnog oblika

Struja 8/20 (kA)	1	3	5	10	15	20
Preostali napon (kV)	77.6	84.3	89.1	95.8	104	110

Na slici G.13 su dati talasni oblici napona na VN priključcima TR 2 33/11 kV u mreži 2, kada su odvodnici postavljeni uz transformatora na predhodno opisan način.



Slika G.13: Talasni oblici napona na VN priključcima TR 2 33/11 kV u mreži 2, kada su odvodnici postavljeni neposredno ispred transformatora

U tabeli G.3 su prikazane maksimalne vrednosti prenapona na VN priključcima TR 2 33/11 kV u mreži 2, za slučaj primene odvodnika prenapona.

Tabela G.3: Maksimalni prenaponi na VN priključcima TR 2 33/11 kV u mreži 2

Transformator Faza	A	Faza B	Faza C
Mreža 2/TR 2	91	90	88

Uočljivo je da postavljanjem odvodnika prenapona ispred transformatora uspešno izvršena zaštita transformatora od prenapona, jer su dobijeni prenaponi značajno niži od kratkotrajno podnosivog napona (trajanja 1 min) industrijske učestanosti od 70 kV efektivne vrednosti, odnosno $70 \cdot 1.41 = 98.7$ kV temene vrednosti prema [11]. Podnosivi sklopni prenaponi se mogu proceniti prema [12] korišćenjem faktora konverzije u opsegu 120 kV do 130 kV temene vrednosti, što daleko premašuje dobijene prenapone iz tabele G.3.

G.5.2 Komentar o Is Limiteru

Is Limiter je novo sredstvo koje omogućava da se sa manjim investicijama reši problem koji nastaje pri razvoju srednjenaponskih mreža koji dovodi do povećanja struja kratkih spojeva iznad prekidnih moći prekidača i kratkotrajno podnosivih struja kratkih spojeva postojeće opreme u postrojenjima. Iako deluje na prvi pogled Is Limiter pogodno sredstvo za velike uštede u investicijama za zamenu opreme, analiza pokazuje opasnost na od prenapona koja se može ublažiti uvođenjem prenaponske zaštite. U svakom slučaju potreban je dodatni oprez da bi se osigurala ostala oprema, koja nije analizirana od prenapona. Zbog toga se preporučuje analiza rešenja problema sa trajno sekcionisanim sabirnicama, bez upotrebe Is Limitera.

G.6 Zaključak

Na osnovu ovog primera može se zaključiti da primena osigurača u mrežama niskog, a posebno srednjeg napona može biti opasna sa stanovišta prenapona u uslovima veoma intenzivnog gašenja luka unutar osigurača. To izaziva brzo smanjivanje struje pre definitivnog gašenja luka i mogućnost nastanka visokih prenapona u mreži ispred i iza osigurača.

U ovom primeru se takođe može videti da se prilikom ekspertize štetnih događaja mora voditi računa o koraku uzorkovanja digitalnih uređaja za registraciju. Pri velikom koraku uzorkovanja mogu biti preskočeni upravo oni odbirci koji su najviše amplitude.

Zahvalnica

Primer je nastao na osnovu analize koja je trebalo da proverí predhodnu studiju koordinacije izolacije i prelaznih povratnih napona u mreži QAPCO-QVC-QATOFIN Electrical Network u Kataru, koja nije razrešila probleme havarija u mreži. Revizija predhodne studije rađena je za Energoprojekt Entel LTD, Doha, Qatar. Analiza je uspešno identifikovala problem i dala predlog rešenja.