

DOI: [10.46793/CIGRE37.B5.08](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.B5.08)**B5.08****PRIMENA TEHNIKE KONTROLISANOG UKLJUČENJA PREKIDAČA („POINT ON WAVE”) NA PRIMERU KOMPENZACIONE PRIGUŠNICE U 400 kV MREŽI****APPLICATION OF CONTROLLED (POINT ON WAVE) SWITCHING FOR 400 kV SHUNT REACTOR****Uroš Njegovan, Zoran Stojanović, Aleksandar Marjanović***

Kratak sadržaj: Podopterećena prenosna mreža, odnosno vodovi opterećeni ispod svoje prirodne snage, značajan su izvor reaktivne snage sa posledicom lokalnog povećanja napona. Kao sredstvo regulacije naponskih prilika operatorima prenosnog sistema širom sveta nametnula se upotreba paralelno priključene prigušnice (engl. Shunt Reactor) u kombinaciji sa konvencionalnim visokonaponskim prekidačem. Implementacija ovakvog rešenja dovodi do značajnog porasta broja sklopnih tranzijenata. Primenom tehnike kontrolisanih operacija prekidača (engl. Point on Wave), kroz pojedinačno uključanje/isključanje svakog pola prekidača u najpovoljnijem trenutku, u velikoj meri se mogu ograničiti vrednosti udarne struje uključanja prigušnice i povratnog napona pri isključenju. U radu su predstavljeni negativni efekti nekontrolisanog priključenja paralelnih prigušnica na prenosni sistem. Opisana je tehnika kontrole trenutka uključanja prekidača kao mera ograničavanja negativnih uticaja sklopnih tranzijenata. Funkcija kontrole prekidača i potencijalni efekti primene u prenosnoj mreži su testirani u laboratorijskim uslovima. Laboratorijska postavka se sastoji od mikroprocesorskog uređaja za zaštitu i upravljanje kao kontrolera i HIL uređaja, na kome je realizovan model 400 kV paralelne prigušnice i prekidača. Uređaji komuniciraju korišćenjem IEC 61850 Sampled Values i GOOSE protokola. Dobijeni rezultati potvrđuju skoro potpunu eliminaciju udarnog perioda prilikom uključanja kompenzacione prigušnice.

Ključne reči: Kontrolisano uključanje prekidača - Hardware-in-the-loop simulacija - Udar na struju prigušnice - Kompenzaciona prigušnica

Abstract: Transmission lines loaded below their surge impedance present a significant source of reactive power in network, that can lead to local voltage increase. Transmission system operators around the world turn to shunt reactors in combination with a conventional high voltage circuit breakers to cope with voltage issues. Implementation of such solution introduces a significant increase in the number of switching transients.

* Uroš Njegovan, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Siemens Energy doo Beograd, uros.njegovan@siemens-energy.com

Zoran Stojanović, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, stojanovic@etf.rs

Aleksandar Marjanović, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Siemens doo Beograd, aleksandar.marjanovic@siemens.com

Using controlled switching technology (Point on Wave), through individual switching of each breaker pole at optimal time, it is possible to limit reactor inrush current when shunt reactor is energized and the recovery voltage when it is deenergized. The paper presents the negative effects of uncontrolled switching of shunt reactor on transmission system. The technique of controlling the timing of circuit breaker switching is presented as a tool to mitigate the negative effects of switching transients. Algorithm for controlled switching of the circuit breaker has been tested in laboratory. Test setup is made of Point on Wave Intelligent Electronic Device (IED) and HIL device used to simulate 400 kV shunt reactor and circuit breaker. The devices exchange information using IEC 61850 Sampled Values and GOOSE protocol. Experimental results confirm limitation of inrush current magnitude when shunt reactor is energized by controlled switching device.

Key words: Controlled switching - Point on Wave - Reactor inrush - Hardware-in-the-loop - Shunt reactor

1 UVOD

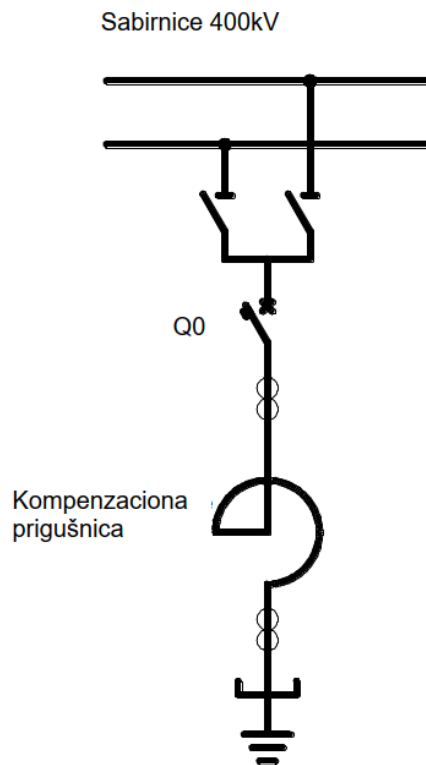
Naponi potrošačkih čvorova su, uz frekvenciju i besprekidnost napajanja, jedni od osnovnih pokazatelja kvaliteta električne energije. Kod podopterećenih prenosnih mreža do izražaja dolaze kapacitivnosti dugačkih visokonaponskih vodova koji postaju značajan izvor reaktivne snage sa posledicom lokalnog povećanja napona iznad maksimalno dozvoljenih vrednosti. Podopterećeni 400 kV i 220 kV vodovi česta su pojava kako u Srbiji, tako i u regionu. Posmatrano sa aspekta elektroenergetskog sistema (EES) u celini, naponske prilike su lokalnog karaktera pa se u velikom broju slučajeva ne mogu regulisati sistemski, odnosno bez upotrebe dodatnih kompenzacionih elemenata. Trenutno postoji širok spektar dostupnih tehnologija kompenzacije reaktivne snage poput sinhronih kompenzatora, kompenzacionih prigušnica (engl. Shunt Reactor), statičkih VAR kompenzatora (SVC) i statičkih sinhronih kompenzatora (STATCOM).

Paralelno priključena kompenzaciona prigušnica predstavlja jedno od najzastupljenijih sredstava kompenzacije reaktivne snage koje danas primenjuju operatori prenosnog sistema širom sveta. Koristi se u pojedinim čvorištima mreže kako bi se održao željeni naponski profil u EES-u. Grade se kao monofazne ili trofazne jedinice sa regulacionim otcepima ili bez regulacionih otcipa (neupravljive). Na mrežu se priključuju direktno na sabirnice visokonaponskog (VN) postrojenja preko konvencionalnih prekidača (slika 1) ili preko tercijera mrežnih transformatora.

U periodima visokih opterećenja u EES-u i povećanog prenosa električne energije visokonaponskim vodovima, prigušnice je najčešće potrebno odvojiti sa mreže. U zavisnosti od varijacija napona i učestalosti sklopnih operacija VN prekidača kompenzacione prigušnice može doći do značajnog porasta broja sklopnih tranzijenata na mestu njenog priključenja. Ovakvi tranzijenti predstavljaju jedan od glavnih uzroka prekomernog naprezanja opreme prenosnog sistema, pre svega prekidača, dok dodatno imaju negativan uticaj na kvalitet električne energije i mogu dovesti do nepotrebnih regovanja zaštitnih uređaja.

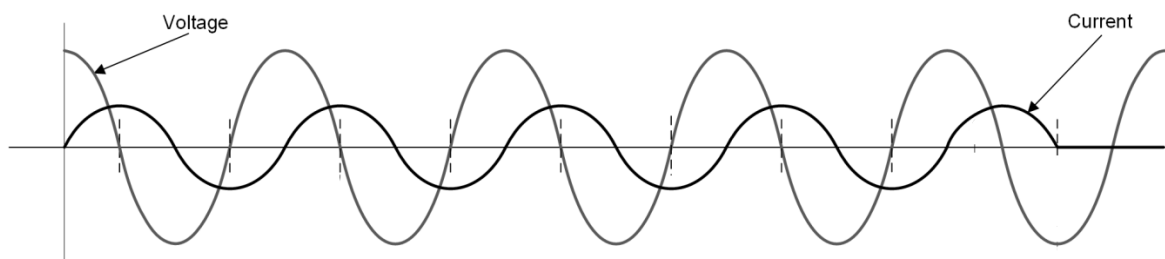
2 TEHNIKA KONTROLE TRENUTKA UKLJUČENJA PREKIDAČA

U slučaju idealne kompenzacione prigušnice, talasni oblik struje zaostaje približno 90° u odnosu na napon na njenim priključcima [1]. Na taj način trenutna vrednost napona dostiže maksimum u trenutku prolaska struja kroz nulu, kao što je prikazano na slici 2.



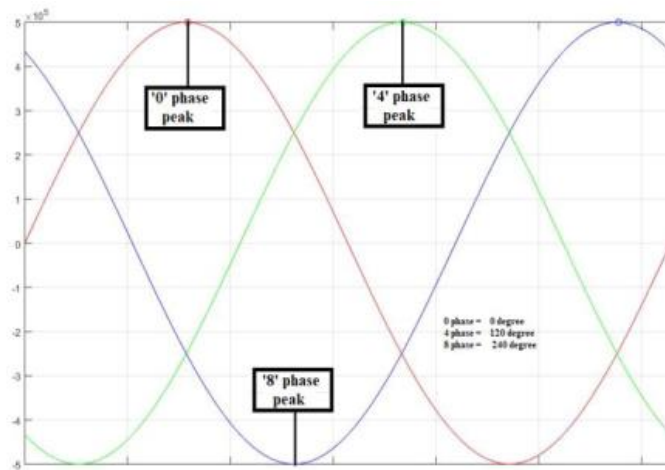
Slika 1: Direktno priključenje kompenzacione prigušnice na sabirnice VN postrojenja

Amplituda udarne struje prigušnice i stepen izobličenja naponskog talasa zavise od vrednosti napona mreže u trenutku izdavanja naloga za uključenja i operativnog vremena prekidača. Konvencionalno uključenje kompenzacione prigušnice u nasumičnom trenutku dovodi do pojave nesimetričnih struja, povećanja elektromehaničkih naprezanja prekidača i namotaja prigušnice, dok u ekstremnim slučajevima može dovesti do zasićenja strujnih transformatora i nepotrebnog reagovanja zemljospojne zaštite (50N/51N), koja je zasnovana na merenju struje provodnika neutralne tačke prigušnice. Ukoliko do uključenja dođe u trenutku kada je vrednost napona u jednoj od faza bliska nuli, sklopni tranzijent će biti najizraženiji. Gorenavedeni neželjeni efektri predstavljaju razlog zbog čega se sve češće pribegava upotrebi neke od dostupnih tehnika kontrolisanog uključenja prekidača. Jedna od najzastupljenijih tehnika je zasnovana na odabiru optimalnog trenutka na naponskom talasu („Point on Wave“).



Slika 2: Talasni oblik struje i napona kompenzacione prigušnice

U slučaju trofaznih sistema maksimumi vrednosti signala faznih napona su uvek inverznog redosleda (0-8-4) u odnosu na fazni redosled napona mreže (0-4-8) i međusobno pomereni za trećinu periode, odnosno 6,66 ms (slika 3).



Slika 3: Talasni oblik tri fazna napona i njihovi maksimumi

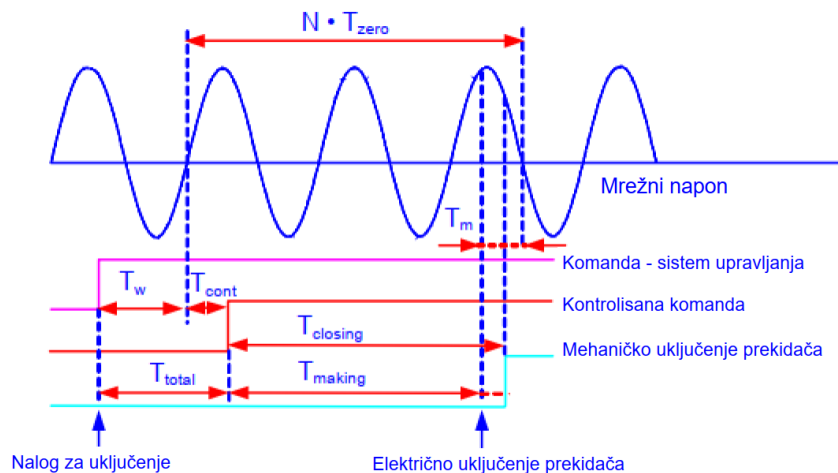
Algoritam koji određuje najpovoljniji momenat uključenja svake od faza na osnovu ulaznih veličina implementiran je u kontroleru prekidača, koji je po svojim karakteristikama sličan savremenim mikroprocesorskim uređajima za zaštitu i upravljanje. Njegova uloga se ogleda u tome da nakon prijema naloga za uključenje prekidača dobijenog od sistema upravljanja proceni optimalan trenutak uključenja na osnovu merenog naponskog talasa i shodno tome izračuna potrebno vremensko kašnjenje izvršenja komande kako bi se prvi pol prekidača uključio pri maksimalnoj vrednosti napona. Pošto je prigušnica induktivan element, prilikom uključenja prekidača pri maksimalnoj vrednosti napona nivo magnetskog fluksa je teorijski minimalan pa se samim tim ograničava i vrednost udarne struje. Potom se preostale dve faze uključuju sukcesivno sa definisanim vremenskim kašnjenjem, odnosno pomerajem u odnosu na prvi pol. Algoritam kontrolera proverava sva odstupanja u frekvenciji referentnog napona detekcijom prolaska signala napona kroz nulu (engl. zero crossing) i na osnovu toga donosi konačnu odluku o trenutku izvršenja komande.

Princip kontrolisanog uključenja sa svim ključnim vremenskim trenucima od interesa prikazan je na slici 4 [2]. Može se uočiti da, pre uspostavljanja mehaničkog kontakta polova prekidača ($T_{CLOSING}$), dolazi do dielektričnog proboja izalacionog medijuma kada se kontakti prekidača dovoljno približe i uspostavlja se luk što predstavlja električni kontakt polova (T_{MAKING}). Vreme mehaničkog kontakta polova ($T_{CLOSING}$) je karakteristika prekidača i može se izmeriti. Vreme paljenja luka (T_m) predstavlja ulazni parametar kontrolera na osnovu koga se izračunava ukupno vreme koje je potrebno da prođe od trenutka izdavanja komande do uspostavljanja struje, odnosno električnog kontakta polova prekidača (T_{MAKING}).

Ukupno vremensko kašnjenje koje kontroler unosi od momenta detekcije naloga za uključenje do izvršenja komande (T_{total}) predstavlja zbir vremena detekcije prolaska signala napona kroz nulu (T_w) i sinhronog kašnjenje koje računa kontroler (T_{cont}). Sinhrono vremensko kašnjenje se uvodi sa ciljem uspostavljanja struje u optimalnom trenutku u odnosu na naponski talas, odnosno uzima se u obzir računato vreme električnog uključenja prekidača (T_{MAKING}).

Stoga, uloga kontrolera je iniciranje uspostavljanja električnog, a ne mehaničkog kontakta polova prekidača u optimalnom trenutku, koje se računa kao (1):

$$T_{MAKING} = T_{CLOSING} - T_m \quad (1)$$



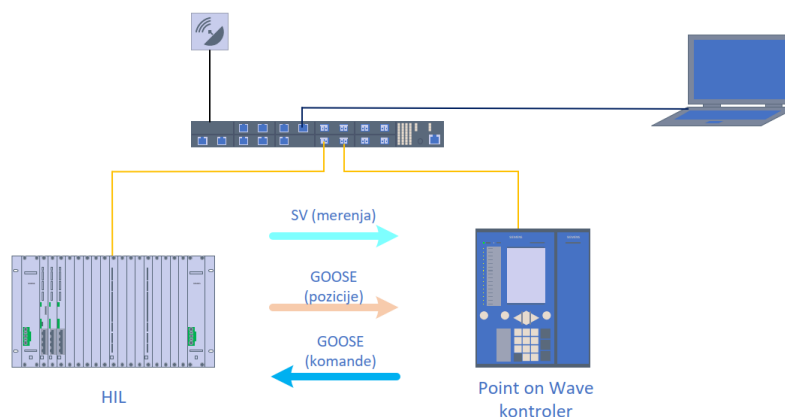
Slika 4: Ključni vremenski trenuci kontrolisanog uključjenja prekidača

Važno je napomenuti, iako nije predmet ovog rada, da isključenje prekidača prigušnice takođe može predstavljati izazov. Uzrok tome nije amplituda struje koja se prekida već energija akumulirana u prigušnici. “Odsecanje” struje pre njenog prolaska kroz nulu može dovesti do izraženih visokofrekventnih oscilacija uzrokovanih energijom u prigušnici kao induktivnom elementu i parazitnih kapacitivnosti. Nagli porast povratnog napona na kontaktima prekidača može dovesti do ponovnog paljenja luka. Neophodno je istaći da su savremeni SF6 prekidači konstruisani tako da je verovatnoća “odsecanja” struje minimalna.

Uloga kotrolera prilikom isključenja prekidača prigušnice ogleda se u iniciranju mehaničkog odvajanje kontakata neposredno nakon prolaska struje kroz nulu. Nakon mehaničkog odvajanja kontakata prekidača, dolazi do razvlačenja luka i struja nastavlja da teče sve dok dielektrična čvrstoća ne bude dovoljna da prilikom narednog prolaska struje kroz nulu uguši luk. Kada se luk ugasi kontakti prekidača bi trebali biti dovoljno udaljeni jedan od drugog da dielektrična čvrstoća nadjača povratni napon i ne dođe do ponovnog paljenja luka.

3 LABORATORIJSKI MODEL

Efekti primene tehnike kontrolisanog uključjenja prekidača ispitani su u laboratorijskim uslovima, na primeru 400 kV kompenzacione prigušnice. U tu svrhu formirana je laboratorijska postavka (slika 5) koju čine: mikrop procesorski uređaj za zaštitu i upravljanje kao kontroler prekidača, mrežni svič i Hardware-in-the-loop (HIL) uređaj, na kome je realizovan model 400 kV kompenzacione prigušnice, VN prekidača i dela ostatka mreže.



Slika 5: Blok šema laboratorijske postavke

Procesna mreža na modelu je uprošćena i sastoji se od mrežnog sviča u „zvezda“ topologiji bez korišćenja PRP i HSR redundatnih protokola. Svič ima ulogu i izvora vremenske sinhronizacije po protokolu IEEE 1588 „Precise Time Protocol – PTP“ koji je neophodan za generisanje validnih odbiraka mernih veličina – „Sampled Values“.

3.1 Model kompenzacione prigušnice

U okviru HIL uređaja modelovano je 400 kV polje koje se sastoji od kompenzacione prigušnice, prekidača, strujnih mernih transformatora i ostale VN opreme. Kompenzaciona prigušnica je nelinearna, spregnuta u zvezdu, sa direktno uzemljenom neutralnom tačkom. Tehničke karakteristike prikazane su u tabeli I. Magnetsko kolo je sa vazдушnim zazorom i sastoji se od pet stubova.

Tabela I: Tehničke karakteristike kompenzacione prigušnice

Nazivni napon	420 kV
Nazivna frekvencija	50 Hz
Reaktivna snaga	250 MVar
Nazivna struja	343,66 A
Sprega	Y_n
Kapacitivnost namotaja	8,4 mH (po fazi)

Prekidač prigušnice modelovan je kao rasklopni element sa nezavisno upravljivim polovima tehničkih karakteristika datih u tabeli II.

Tabela II: Tehničke karakteristike prekidača

Vreme mehaničkog uključanja prekidača	50 ms
Vreme mehaničkog isključenja prekidača	30 ms

Model primarne opreme na HIL uređaju realizovan je uz uvažavanje određenih ograničenja:

- Ne postoje međusobne varijacije u operativnim vremenima polova prekidača, ona uvek odgovaraju zadatim vrednostima u sve tri faze
- Postavka uvodi kašnjenje komande od trenutka izdavanja sa kontrolera do njene registracije od strane HIL uređaja. Kako se razmena informacija između kontrolera i HIL uređaja odvija GOOSE porukama, maksimalno kašnjenje je ograničeno na 1 ms
- Nulta vremenska razlika između trenutka uspostavljanja električnog i mehaničkog kontakta polova prekidača, što potvrđuje izostanak luka na oscilografskim zapisima

3.2 Kontroler prekidača

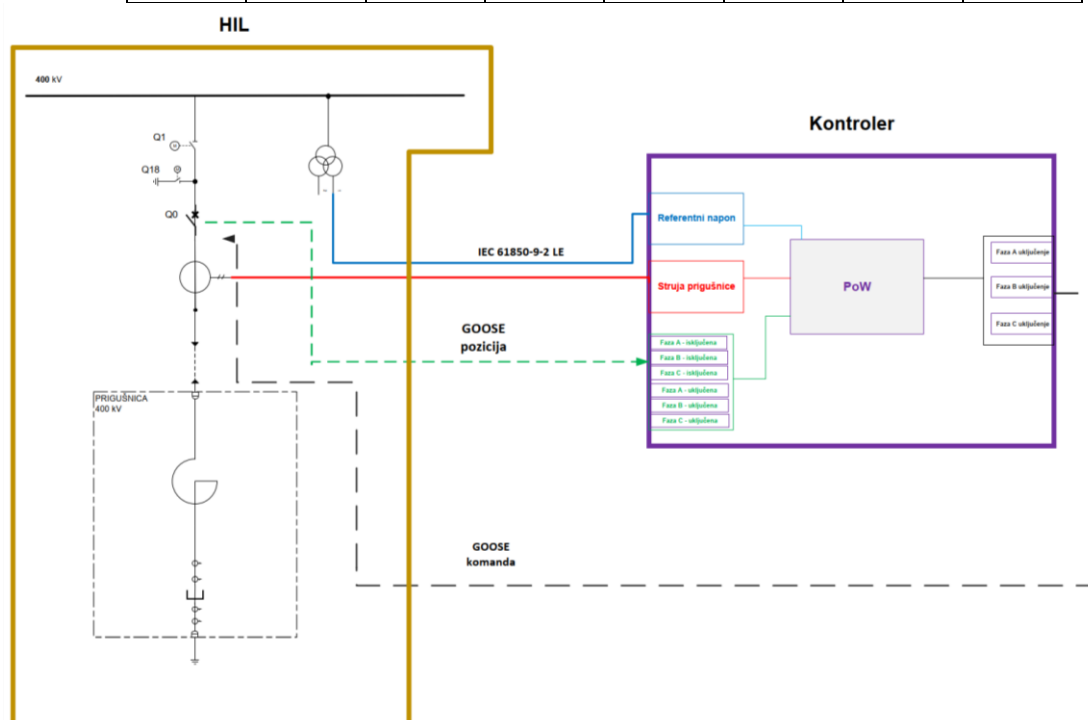
Funkcija kontrolera implementirana je u okviru mikroprocesorskog uređaja za zaštitu i upravljanje. Na osnovu analize referentnog naponskog talasa, uzimajući u obzir podešene parametare, kao što su strategija uključanja i vremenske karakteristike prekidača, kontroler računa i uvodi optimalnu vremensku zadržku aktiviranja kalema za uključanje prekidača.

Referentni signal se dobija sa naponskog transformatora priključenog na 400 kV sabirnicama. Njega generiše HIL uređaj kao „Publisher“ a kontroler preuzima kao „Subscriber“ u okviru formirane Process Bus mreže. Trenutne vrednosti napona se šalju u formi paketa odbiraka definisanih kao IEC 61850-9-2 „Sampled Value“ strimovi. Sadržaj paketa prikazan je u tabeli III. U svakom paketu merenja, pored odbiraka tri fazna i nultog napona, nalaze se i vrednosti faznih struja merenih na priključcima kompenzacione prigušnice, kao i računsa vrednost nulte struje.

Informacije o položaju rasklopne opreme generiše HIL uređaj kao „GOOSE“ poruke, dok kontroler šalje „GOOSE“ pakete HIL-u sa nalogom za komandovanje pojedinačnim polovima prekidača (slika 6).

Tabela III: Sadržaj paketa odbiraka merenja

IEC 61850-9-2 „Sampled Value“ strim							
Napon sabirnica				Struja prigušnice			
U_A	U_B	U_C	$3U_0$	I_A	I_B	I_C	$3I_0$
Poz 1	Poz 2	Poz 3	Poz 4	Poz 5	Poz 6	Poz 7	Poz 8



Slika 6: Logički dijagram razmene informacija HIL uređaja i kontrolera

U kontroleru su implementirane funkcije nadzora. Nakon svakog izvršenog uključenja kontroler prikuplja podatke, analizira ih i po potrebi alarmira uočenu neispravnost. Implementirane su sledeće funkcije nadzora:

- Beleži se vrednost izmerene udarne struje i poredi sa podešenim limitom, što na našem primeru odgovara vrednosti dvostruke nazivne struje prigušnice
- Meri mehaničko vreme uključenja prekidača na osnovu položaja pomoćnih kontakata i registruje njegovo odstupanje u odnosu na podešenu vrednost
- Meri električno vreme uključenja prekidača na osnovu detekcije uspostavljanja struje i registruje njegovo odstupanje u odnosu na računatu vrednost

4 REZULTATI ISPITIVANJA

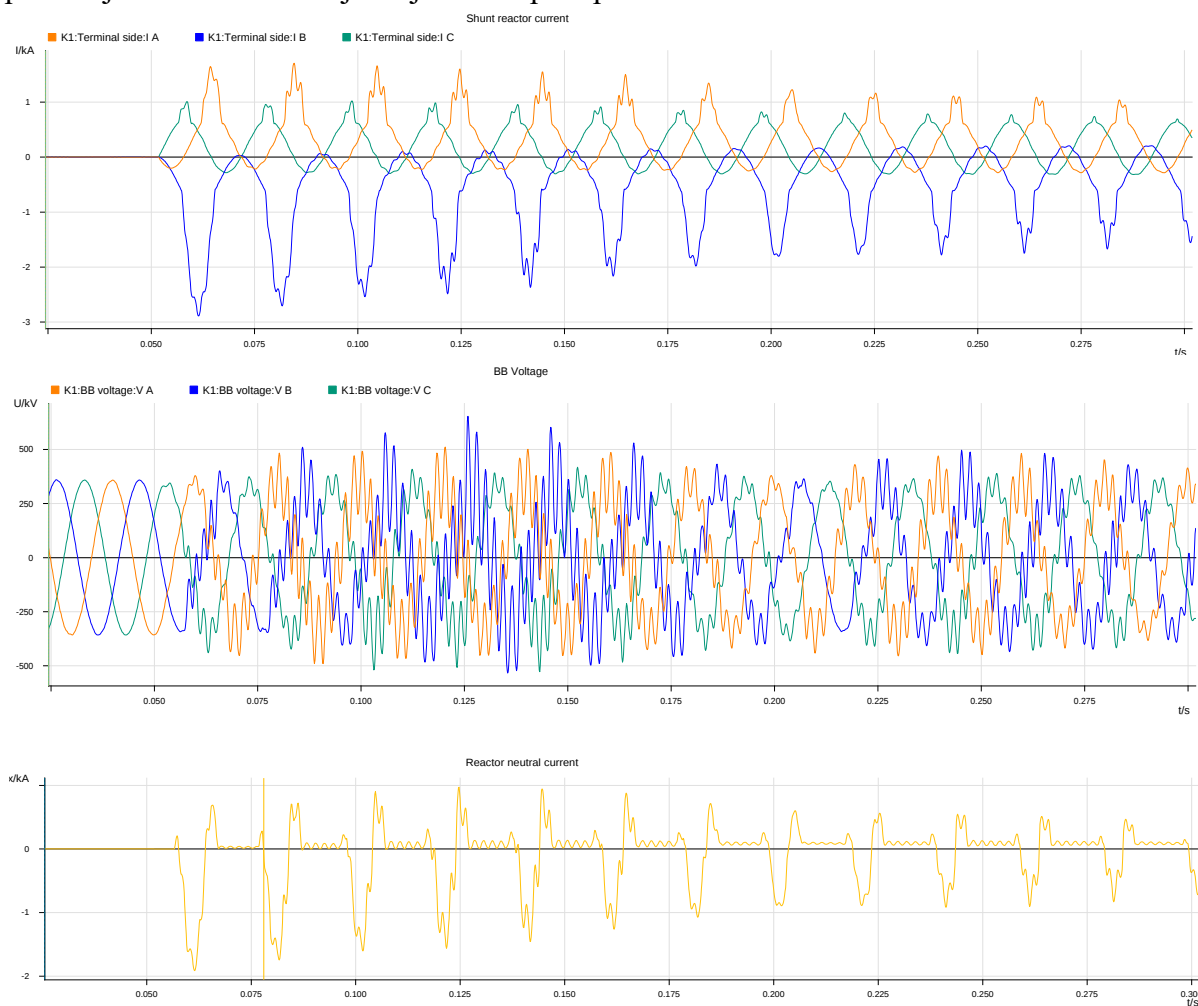
Kako bismo sagledali efikasnost primene opisane tehnike izvršeno je uporedno ispitivanje tri različite strategije uključanja prekidača prigušnice na laboratorijskom modelu, i to:

1. Konvencionalno – nasumično istovremeno uključanje sva tri pola prekidača
2. Kontrolisano uključanje svakog pola prekidača u najnepovoljnijem trenutku
3. Kontrolisano uključanje svakog pola prekidača u optimalnom trenutku

Nakon svakog uključanja sa kontrolera su preuzeti oscilografski zapisi i liste događaja. Na osnovu njih se mogu očitati vrednosti i uporediti talasni oblici napona i struja prigušnice, kao i statusi pomoćnih kontakata prekidača.

4.1 Konvencionalno uključanje prekidača

Konvencionalno uključanje karakteriše istovremeno generisanje komande uključanja sva tri pola prekidača. Kontroler se u ovom slučaju ponaša kao pasivan element koji ne uvodi vremensku zadržku na registrovan nalog od sistema upravljanja. Kako je trenutak izdavanja komande nasumičan, stepen nesimetrije kao i amplituda udarnih struja prigušnice zavise od trenutka izdavanja naloga, kao i operativnog vremena prekidača. Oscilografski zapis (slika 7) potvrđuje istovremeno uključanje sva tri pola prekidača.



Slika 7: Talasni oblici struje i napona pri konvencionalnom uključanju

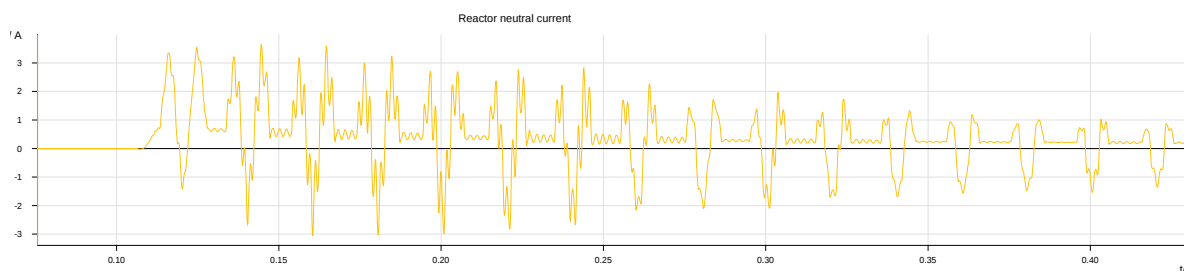
Na njemu je uočljiva zavisnost vrednosti udarne struje od trenutne vrednosti napona u trenutku uključenja. Izražen je udarni period velike vremenske konstante, tj. dužine trajanja. Pomenuto dovodi do приметnog izobličenja talasnih oblika napona i struja, ali i velikih vrednosti udarnih struja. U ovom slučaju vršne vrednosti su iznosile $I_{AMAX} = 1,63 \text{ kA}$, $I_{BMAX} = -2,88 \text{ kA}$ i $I_{CMAX} = 955 \text{ A}$. Vrednost udarne struje provodnika neutralne tačke iznosi $I_N = -1,86 \text{ kA}$.

4.2 Kontrolisano uključenje svakog pola prekidača u najnepovoljnijem trenutku

Kako je prigušnica element induktivne prirode, kontrolisano uključenje svakog pola prekidača u trenutku prolaska napona kroz nulu u svakoj od faza predstavlja najnepovoljniji slučaj. Tada je izobličenje talasnih oblika najizraženije. Premda upotreba kontrolera teži da ograniči tranzijent uključenja, pogrešnim odabirom parametara može doći do uključenja pri kome su negativni efekti najizraženiji. Talasni oblici napona prikazani su na slici 11, a struja na slici 12.

Ovakvo uključenje praćeno je izuzetno visokim vrednostima udarnih struja $I_{AMAX} = 3,47 \text{ kA}$, $I_{BMAX} = 3,64 \text{ kA}$ i $I_{CMAX} = -3,80 \text{ kA}$. Do izražaja dolazi nesimetrija udarnih struja pa vrednost struje provodnika za uzemljenje prigušnice dostiže svoj maksimum od $I_N = 3,33 \text{ kA}$ (slika 8). S obzirom na dužinu trajanja udarnog perioda, u zavisnosti od vremenskog zatezanja zemljospojne zaštite, može doći do njene nepotrebne prorade.

Takođe, zbog odnosa X/R parametara jednosmerna (DC) komponenta struje sporo opada, što povećava šansu da dođe do zasićenja strujnih transformatora.

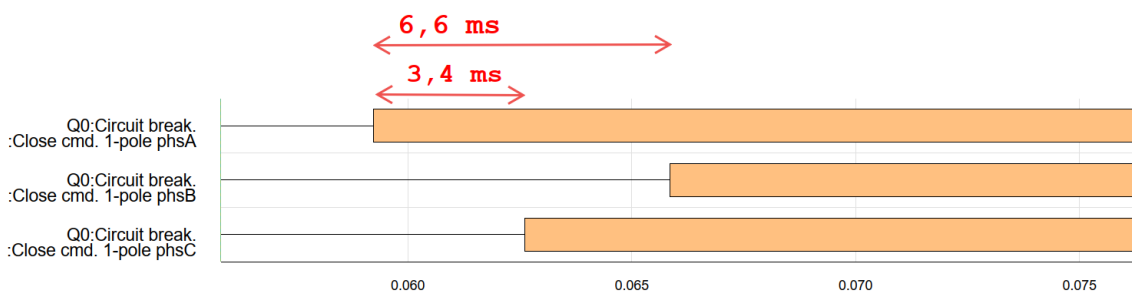


Slika 8: Talasni oblik nulte struje prigušnice

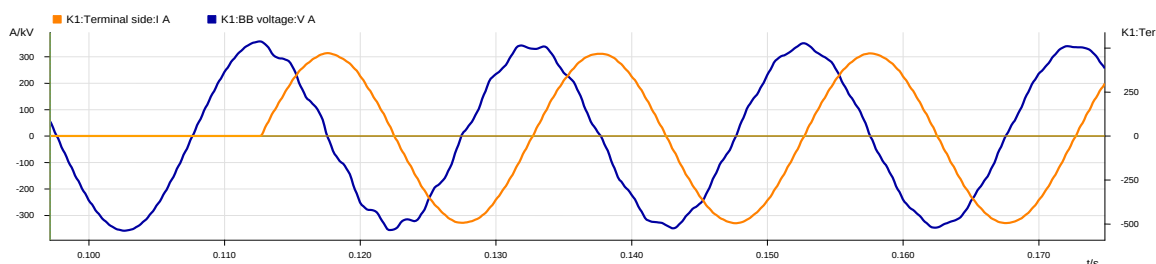
4.3 Optimalno uključenje prekidača

Optimalna strategija uključenja prigušnice se zasniva na uključenju svakog pola prekidača pri maksimalnoj vrednosti napona. Referentni trenutak je prolazak talasnog oblika napona faze A kroz nulu (eng. zero crossing). Cilj kontrolera je da obezbedi uključenje pola A sa faznim pomerajem od 90° u odnosu na referentni trenutak, odnosno u momentu kada vrednost napona faze A dostigne svoj maksimum [3]. Sledeća svoj maksimum (sa negativnim predznakom) dostiže faza C za $90^\circ + 60^\circ = 150^\circ$ odnosno sa kašnjenjem od 3,33 ms u odnosu na fazu A. Poslednji korak je uključenje faze B, i to sa teorijskom zadržkom od $90^\circ + 120^\circ = 210^\circ$ odnosno 6,66 ms. Na slici 9 je prikazano sekvencionalno izdavanje komandi uključenja polova, dok se analizom događaja može ustanoviti da nema odstupanja tajminga kontrolera od teorijski idealnih vremena.

Analizom oscilografskih zapisa uočeno je pravovremeno uključenje svakog pola. To potvrđuje primer faze A (slika 10) gde se može videti uspostavljanje struje pri maksimalnoj vrednosti napona.

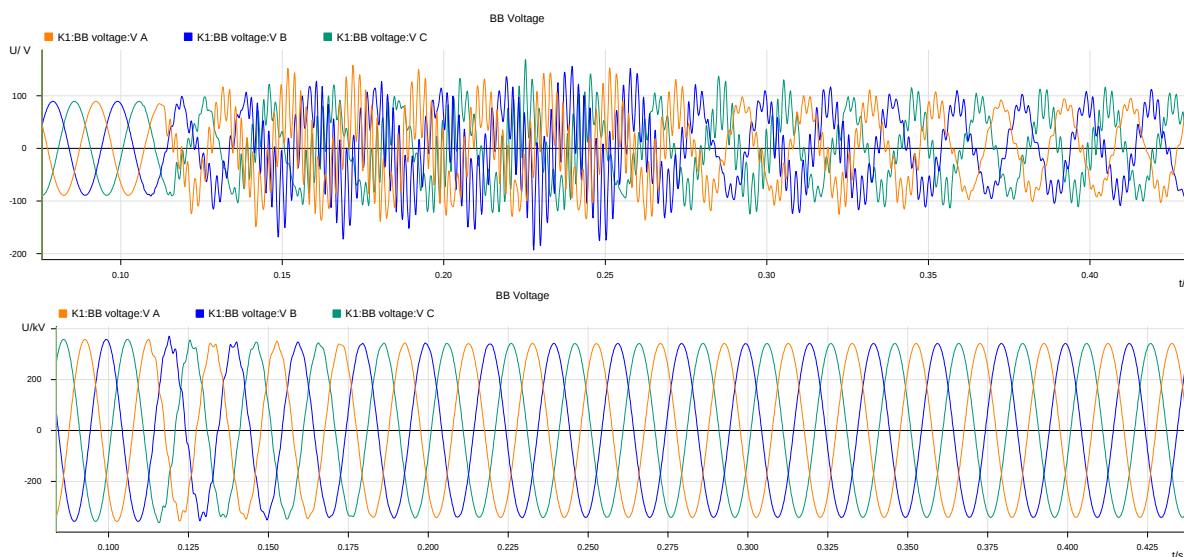


Slika 9: Redosled izdavanje komandi uključenja polova prekidača



Slika 10: Trenutak uspostavljanja struje u odnosu na talasni oblik napona

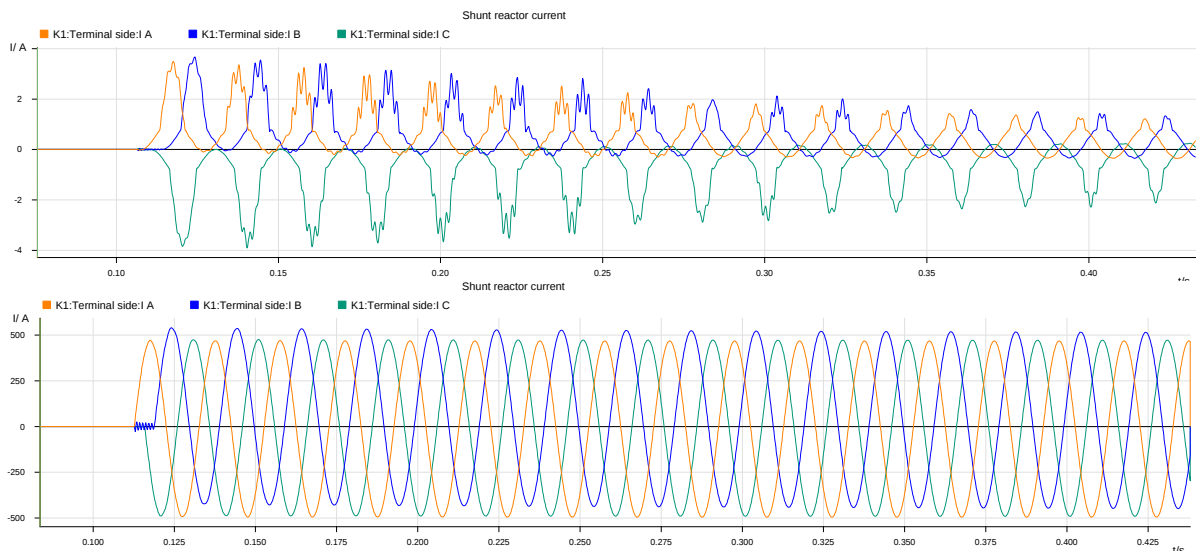
Poređenjem talasnih oblika napona (slika 11) i struje (slika 12) može se zaključiti da se primenom tehnike kontrolisanog uključenja potpuno eliminiše udarni period. Optimalnim uključenjem izobličenje talasnog oblika napona je gotovo neprimetno uz eliminaciju viših harmonika.



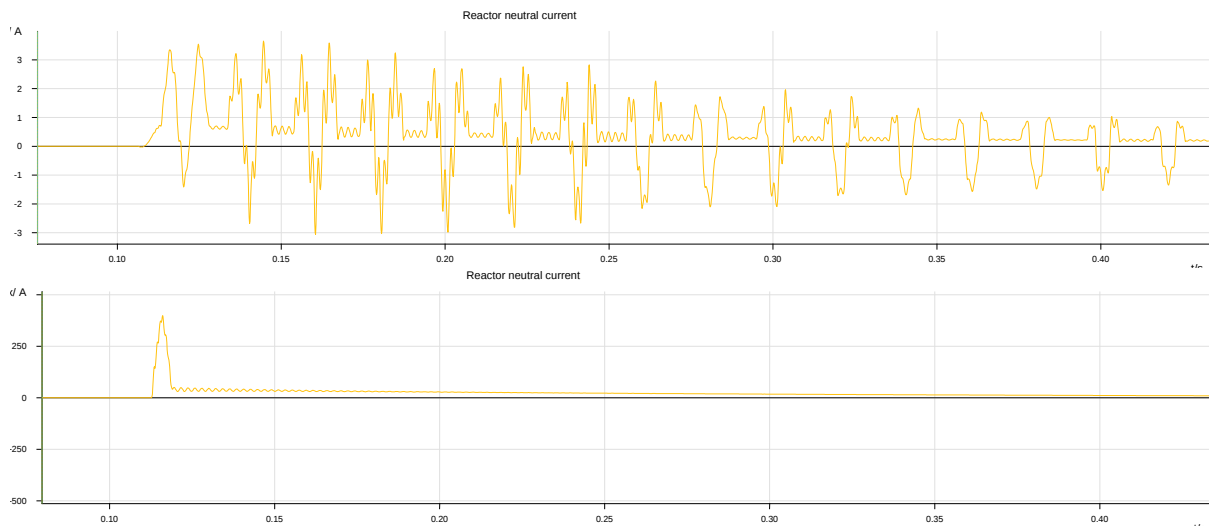
Slika 11: Talasni oblici napona najnepovoljnijeg (gore) i optimalnog (dole) uključenja prigušnice

Kontrolisanim uključenjem prekidača prigušnice ograničavaju se amplitude udarnih struja na $I_{AMAX} = 469 \text{ A}$, $I_{BMAX} = 523 \text{ A}$ i $I_{CMAX} = -488 \text{ A}$. Efektivna vrednost („RMS“) struje uključenja u prvoj periodi iznosi približno 340 A što odgovara nazivnoj struji prigušnice. Kontrolisano uključenje potvrđuje simetrične talasne oblike struja i odsustvo DC komponente. Eliminacijom tranzijentnog perioda ograničava se vrednost udarne struje provodnika za uzemljenje prigušnice na $I_N = 358 \text{ A}$ (slika 13).

Sa oscilografskog zapisa se može primetiti da je impuls tranzijenta nulte struje trajao približno 6 ms u slučaju optimalnog dok je na primeru najnepovoljnijeg uključenja trajao duže od 500 ms. Tačno vreme nije izmereno jer je trajanje zapisa ograničeno.



Slika 11: Talasni oblici struje najnepovoljnijeg (gore) i optimalnog (dole) uključanja prigušnice



Slika 13: Talasni oblik nulte struje prigušnice najnepovoljnijeg (gore) i optimalnog (dole) uključanja

Uticaj primene kontrolisanog uključanja na ograničavanje vrednosti udarne struje prigušnice može se sagledati poređenjem izmerenih vrednosti sve tri strategije ispitane na laboratorijskom modelu (tabela IV).

Tabela IV: Vrednosti udarnih struja prigušnice

Udarana struja prigušnice	Faza A [kA]	Faza B [kA]	Faza C [kA]	I_N [kA]
Konvencionalno - nekontrolisano uključanje	1,63	2,88	0,95	1,86
Kontrolisano - najnepovoljnije uključanje	3,47	3,64	3,80	3,33
Kontrolisano - optimalno uključanje	0,47	0,52	0,42	0,36

Maksimalna vrednost udarne struje je 3,80 kA dok se kontrolisanim uključanjem ona ograničava na maksimalno izmerenih 0,52 kA. Takođe, suzbijanje nesimetrije struja dovodi do ograničavanja vrednosti udarne struje provodnika za uzemljenje prigušnice sa $I_N = 3,33$ kA na $I_N = 0,36$ kA.

5 ZAKLJUČAK

Konvencionalno (nekontrolisano) uključenje prekidača je nasumične prirode, odnosno talasni oblici zavise od vrednosti napona u trenutku uključjenja. Generalno posmatrano, nekontrolisano uključenje dovodi do značajnog izobličenja talasnih oblika napona praćenog dugotrajnim prelaznim procesom i visokim vrednostima udarnih struja koje dostižu desetostruku vrednost nazivne struje. Uočene su vrednosti struja provodnika neutralne tačke od 1,86 kA koje usled dugačkog trajanja udarnog perioda mogu dovesti do nepotrebnog reagovanja zaštite.

Od velikog značaja pokazala su se ispitivanja kontrolisanog uključjenja u najnepovoljnijem trenutku. Time su dobijeni dosledni rezultati koji pružaju mogućnost analize uticaja primene optimalnog („Point on Wave“) uključjenja. Rezultati ispitivanja naveli su autore da steknu uvid u ključnu ulogu precizne koordinacije parametara kontrolera i vremena prekidača. Svaka razlika podešenog i stvarnog vremena uključjenja prekidača od 1 ms reflektuje se kao odstupanje od 18° u odnosu na optimalni trenutak uključjenja. Upotreba kontrolera sa pogrešno podešenim parametrima rezultuje izraženijim sklopnim tranzijentom u odnosu na nasumično uključjenje.

Analizom oscilografskih zapisa tri različite strategije uključjenja prekidača 400 kV prigušnice, odnosno poređenjem talasnih oblika i vrednosti udarnih struja, potvrđena je potpuna eliminacija udarnog perioda primenom tehnike kontrolisanog uključjenja. Kako tehnologija napreduje, fleksibilnost, pouzdanost, jednostavnost korišćenja i ukupni trošak implementacije se poboljšava, donoseći korist sve većem delu EES-a.

Na kraju treba istaći da isključenje prekidača prigušnice takođe donosi izazove kao što su „odsecanje“ induktivne struje, ograničavanje povratnog napona i ponovno paljenja luka. Upravo će ovi problemi biti predmet istraživanja autora u narednom periodu.

6 ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, br. ugovora: 451-03-137/2025-03/200103.

7 LITERATURA

- [1] Muzamil Faiz, Abdul Qadir Chang, Baqir Ali Mirjat, Nosheen Memon: The Simulation Analysis of Shunt Reactor Controlled Switching at 500 kV Network, International Journal of Electrical Engineering & Emerging Technology, Vol. 05, No. 02, DEC 2022, pp 31-37
- [2] Dan Goldsworthy and Tom Roseburg: Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Application Examples and Benefits, 34th Annual Western Protective Relay Conference, October 2007
- [3] Ajay Kumar, Rehana Perveen, Urmil Parikh: Controlled Switching of Power Transformer and Shunt Reactors or Minimization of Switching Transients: A Review, The Institution of Engineers (India) 2021
- [4] European Network of Transmission System Operators for Electricity: Controlled Switching Device: Application, Use And Maintenance Problems, Final |16 November 2022