

Uroš N. Njegovan^{1,2}, Zoran N. Stojanović¹, Aleksandar D. Marjanović^{1,3}

Ograničenje sklopnih tranzijenata primenom tehnike kontrolisanog uključenja prekidača (Point-on-Wave)

¹ Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija*² Siemens Energy d. o. o. Beograd – Beograd, Srbija³ Siemens d. o. o. Beograd – Beograd, Srbija

Originalni naučno-istraživački rad

Ključne poruke

- Predstavljeni efekti sklopnih tranzijenata usled priključenja različitih vrsta opterećenja
- Opisana tehnika kontrolisanog uključenja prekidača
- Efekti primene tehnike testirani na simulatoru u realnom vremenu
- Izvršeno poređenje sa konvencionalnim uključenjem prekidača kompenzacione prigušnice

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 (Point-on-Wave), kroz pojedinačno uključenje/isključenje svakog pola prekidača u najpovoljnijem trenutku, u velikoj meri se mogu ograničiti vrednosti udarne struje uključenja prigušnice i povratnog napona pri isključenju. U radu su predstavljeni negativni efekti nekontrolisanog priključenja paralelnih prigušnica na prenosni sistem. Opisana je tehnika kontrole trenutka uključenja 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 simulatora u realnom vremenu (HIL – Hardware-in-the-Loop) 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 uključenja kompenzacione prigušnice.

Ključne reči

Kompenzaciona prigušnica, kontrolisano uključenje prekidača, simulacija *Hardware-in-the-Loop*, udarna struja prigušnice

Primljeno: 26. decembar 2025. Recenzirano: 19. mart 2026.

Izmenjeno: 6. maj 2026. Odobreno: 12. maj 2026.

*Korespondirajući autor: Uroš N. Njegovan, +381 60/81-70-242

Imejl: uros.njegovan@siemens-energy.com

Napomena:

Ovaj članak predstavlja proširenu, unapređenu i dodatno recenziranu verziju rada „Primena tehnike kontrolisanog uključenja prekidača (Point on Wave) na primeru kompenzacione prigušnice 400 kV u mreži” (<https://doi.ub.kg.ac.rs/doi/cigre37-b5-08/>), nagrađenog u Studijskom komitetu STK-B5 Zaštita i automatizacija, na 37. Savetovanju CIGRE Srbija, Zlatibor, 26-30. maja 2025.

1. UVOD

Sklopni tranzijenti predstavljaju jedan od glavnih uzroka prekomernog naprežanja opreme elektroenergetskog sistema (EES). Na primer, uključenje kompenzacione prigušnice može dovesti do izobličenja talasnih oblika napona i pojave udarnih struja velike amplitude, dok uključenje kondenzatorskih baterija može biti praćeno prekomernim povećanjem napona. Tehnika kontrolisanog uključanja/isključanja prekidača primenjuje se u cilju ograničavanja i eliminacije sklopnih tranzijenata koji su posledica uključanja ili isključanja kompenzacionih prigušnica, energetskih transformatora i kondenzatorskih baterija. Pomenuta tehnika poslednjih godina beleži porast primene na nadzemnim i kablovskim vodovima visokog napona.

Kombinacija visokonaponskih (VN) prekidača sa stabilnim operativnim karakteristikama i savremenih mikroprocesorskih uređaja dovela je do usavršavanja algoritama kontrolera prekidača, pojednostavila njihovu integraciju u primarnim i sekundarnim kolima i omogućila primenu na različitim vrstama opterećenja. Usled značajnog porasta njene primene prethodnih godina postala je prepoznata kao pouzdano sredstvo ograničenja efekata sklopnih tranzijenata.

Kontroler optimizuje trenutak operacije VN prekidača uvođenjem odgovarajućeg kašnjenja izvršenja komande u zavisnosti od vrste opterećenja. Na taj način, teži se ograničenju negativnih uticaja sklopnih operacija u EES-u. Osnovne prednosti primene modernih kontrolera su, [1]:

- povećanje pouzdanosti EES-a kao rezultat ograničenja varijacije napona i redukcije viših harmonika;
- poboljšanje kvaliteta električne energije;
- produžetak životnog veka opreme;
- ograničenje amplitude prenapona i udarne struje magnećenja.

1.1 Uključenje prekidača kompenzacione prigušnice

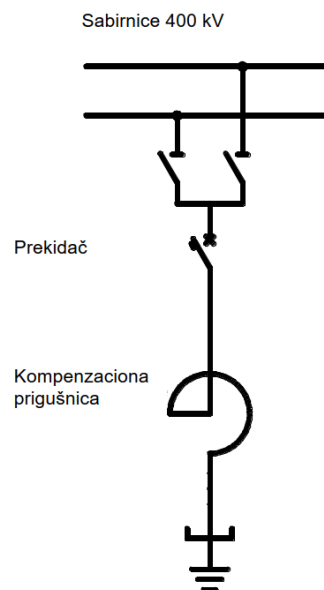
Naponi potrošačkih čvorova, zajedno sa frekvencijom i stepenom harmonijskih izobličenja, predstavljaju osnovne pokazatelje kvaliteta električne energije. Kod podopterećenih prenosnih mreža do izražaja dolaze kapacitivnosti dugačkih visokonaponskih vodova koji postaju značajan izvor reaktivne snage sa 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 EES-a 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, kao što su sinhroni kompenzatori, kompenzacione prigušnice (*Shunt Reactor*), statički VAR kompenzatori (SVC), statički sinhroni kompenzatori (STATCOM), kombinovani serijsko-paralelni FACTS kontroleri UPFC (Unified Power Flow Controller) i IPFC

(Interline Power Flow Controller), kao i FACTS kontroleri kombinovani sa transformatorima, poput TCPST (Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer) i TCVR (Thyristor Controlled Voltage Regulator).

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 otcsepima ili bez regulacionih otcepa (neupravljive). Na mrežu se priključuju ili direktno na sabirnice 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 naprežanja opreme prenosnog sistema, pre svega prekidača, dok dodatno imaju negativan uticaj na kvalitet električne energije i mogu dovesti do nepotrebnih reagovanja uređaja relejne zaštite.

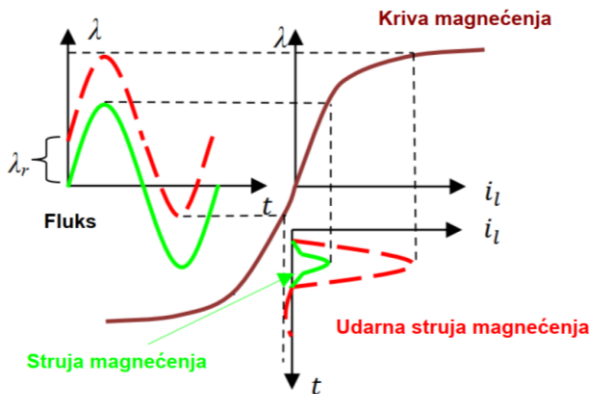


Slika 1. Direktno priključenje kompenzacione prigušnice na sabirnice postrojenja VN

1.2 Uključenje prekidača energetskog transformatora

Energetski transformatori igraju jednu od ključnih uloga u pouzdanom radu EES-a. Usled značajnog porasta zahteva za besprekidnom isporukom električne energije prethodnih decenija postavljeni su visoki kriterijumi pouzdanosti rada energetskih transformatora (u daljem tekstu transformator).

Udarana struja magnećenja transformatora (Slika 2), [2], pojava je koja nastaje prilikom uključivanja neopterećenog transformatora. U određenim slučajevima ona može dostići vrednosti bliske struji kvara, [3]. Njen uticaj je manje izražen u poređenju sa strujom kvara, ali učestalost njene pojave i dužina trajanja mogu imati negativan uticaj na životni vek VN opreme. Osim velike amplitude udarne struje, uključivanje transformatora može biti praćeno pojavom viših harmonika, ima negativan uticaj na kvalitet električne energije i može dovesti do nepotrebnih reagovanja uređaja relejne zaštite.



Slika 2. Struja magnećenja energetskog transformatora

U ustaljenom radnom režimu transformatora u praznom hodu sav fluks se zatvara u njegovom magnetskom jezgri, stoga je potrebna mala struja magnećenja, kao što je prikazano na Slici 2. Ona tipično iznosi 1-2% nazivne struje transformatora. Iz ekonomskih razloga, transformatori se konstruišu tako da vrednost radnog fluksa odgovara tački bliskoj kolenu karakteristike magnećenja. Konvencionalno uključivanje prekidača transformatora u nasumičnom trenutku može dovesti do nesimetričnog magnetskog fluksa i zasićenja jezgra. Važno je napomenuti da se prilikom isključenja transformatora u njegovom magnetskom jezgri zadržava deo fluksa, poznat kao remanenti, odnosno zaostali fluks (λ_r). On može imati uticaj na amplitudu udarne struje magnećenja prilikom narednog uključivanja transformatora u zavisnosti od vrednosti napona u trenutku uključivanja. S obzirom na to da transformatori predstavljaju važan element EES-a i da prekid njihovog rada može biti kritičan u trenucima visokog opterećenja EES-a, značajan korak ka mogućem produženju životnog veka može se postići kontrolisanjem trenutka njihovog uključivanja.

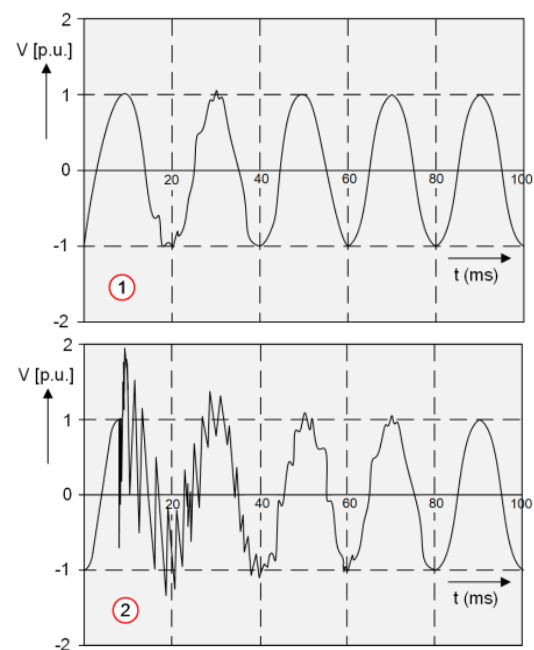
1.3 Uključenje prekidača kondenzatorskih baterija

Kada se prekidač kondenzatorskih baterija ili harmonijskog filtera isključi, potrebno je određeno vreme da se zaostala energija akumulirana u bateriji isprazni. Kako bi se izbeglo ponovno uključivanje prekidača pre potpunog pražnjenja baterije, obično se primenjuje vremenski relej sa ciljem da određeni vremenski period blokira mehanizam prekidača. Ugrađeni otpornici za

pražnjenje će osigurati da se baterija isprazni pre nego što istekne vreme blokade prekidača. Tipično podešenje vremenskog releja iznosi 10 minuta od trenutka isključenja prekidača do prvog narednog dozvoljenog uključivanja.

Ispražnjene kondenzatorske baterije kratkotrajno predstavljaju kratak spoj u trenutku uspostavljanja napona na njihovim priključcima, odnosno uključivanja prekidača. Ukoliko do uključivanja dođe prilikom maksimalne vrednosti napona, varijacije napona i struje mogu biti značajne. U zavisnosti od konfiguracije mreže, prenaponi koji mogu nastati prilikom uključivanja kondenzatorskih baterija mogu dovesti do oštećenja, pa čak i proboja izolacije pojedinih elemenata elektroenergetskog sistema, kao što su transformatori, izolatori, kablovi i dr. Kod određene konfiguracije kondenzatorskih baterija uključivanje može biti praćeno strujama visoke amplitude i frekvencije. U ekstremnim slučajevima to može ugroziti mehanički integritet kako kondenzatorske baterije tako i prekidača.

Pomenuti tranzijenti se mogu značajno ograničiti kontrolisanjem prekidača kondenzatorskih baterija tako da do uključivanja dođe pri nultom naponu (Slika 3), [4].



Slika 3. Talasni oblik napona kontrolisanog (gore) i nekontrolisanog (dole) uključivanja kondenzatorskih baterija

2. TEHNIKA KONTROLE TRENTUTKA UKLJUČENJA PREKIDAČA

Jedna od najzastupljenijih tehnologija kontrole prekidača zasnovana je na odabiru optimalnog trenutka na naponskom talasu (*Point-on-Wave*). Ovakvim uključivanjem značajno se mogu redukovati neželjeni efekti sklopnih tranzijenata koji mogu nastati u slučaju konvencionalnog uključivanja u nasumičnom trenutku. Algoritam koji određuje najpovoljniji trenutak uključivanja svake od faza na osnovu ulaznih veličina implementiran je u kontroleru

prekidača, koji je po svojim karakteristikama sličan savremenim mikroprocesorskim uređajima za relejni zaštitu i upravljanje.

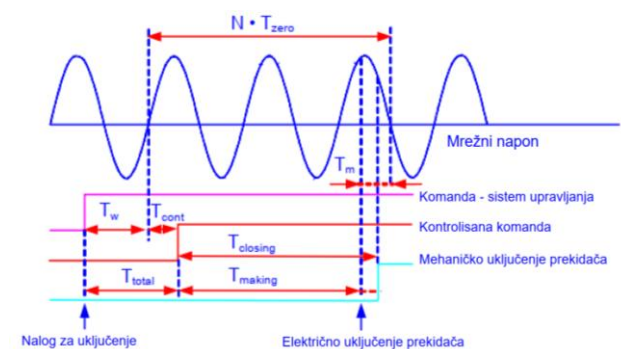
Njegova uloga se ogleda u tome da nakon prijema naloga za uključenje prekidača proceni optimalan trenutak uključenja na osnovu merenog naponskog talasa i shodno tome izračuna potrebno vremensko kašnjenje izvršenja komande kako bi se svaki pol prekidača nezavisno uključio u optimalnom trenutku. Očekivana ponovljivost kontrolera i preciznost uspostavljanja struje u odnosu na optimalnu tačku na naponskom talasu je ± 1 ms. Algoritam kontrolera proverava sva odstupanja u frekvenciji referentnog napona detekcijom prolaska signala napona kroz nulu (*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, [5]. Može se uočiti da, pre uspostavljanja mehaničkog kontakta polova prekidača, odnosno njegovog mehaničkog uključenja, dolazi do dielektričnog proboja izolacionog medijuma kada se kontakti prekidača dovoljno približe i uspostavlja se električni luk. To predstavlja električni kontakt polova, odnosno električno uključenje prekidača. Vreme mehaničkog uključenja ($T_{CLOSING}$) karakteristika je 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 uključenja 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 kašnjenja 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 uključenja prekidača

Veliki uticaj na efekat kontrolisanog uključenja imaju doslednost mehaničkih performansi prekidača i njegove dielektrične karakteristike. Pored toga, značajan faktor predstavlja i sposobnost kontrolera da precizno predvidi ponašanje prekidača tokom njegovog radnog veka.

Potrebne karakteristike prekidača za primenu u šemama kontrolisanog uključenja su:

- nezavisno upravljanje polovima;
- stabilno vreme uključenja uz mehaničku pouzdanost;
- izvanredne dielektrične osobine, tj. strma stopa opadanja dielektrične čvrstoće (RDDS).

Naime, operativna vremena prekidača značajno variraju zavisno od tipa prekidača, kao i radnih i ambijentalnih uslova. Deo ukupne varijacije vremena prekidača se može predvideti. Osim predvidljivih, postoje i varijacije koje nije moguće predvideti, jer su čisto statističke prirode. Operativno vreme prekidača se može predstaviti sledećim izrazom (2):

$$T_{Oper} = T_{Nom} + \Delta T_{Comp} + \Delta T_{Drift} + \Delta T_{Statistic} \quad (2)$$

gde je:

- T_{Oper} – operativno vreme prekidača;
- T_{Nom} – nazivno vreme prekidača pri nominalnim uslovima;
- ΔT_{Comp} – predvidljivo odstupanje koje kontroler može kompenzovati;
- ΔT_{Drift} – odstupanje usled eksploatacije prekidača tokom njegovog radnog veka;
- $\Delta T_{Statistic}$ – statističko odstupanje.

Dakle, postoji varijabilni deo operativnog vremena prekidača koji se može predvideti i uvažiti u samom kontroleru (ΔT_{Comp}). Promena operativnog vremena prekidača uzrokovana je promenama vrednosti kontrolnog napona i ambijentalne temperature, a u slučaju pneumatskih prekidača, i promenom pritiska. Stoga se ove varijacije mogu predvideti, a na osnovu veličina izmerenih putem senzora i dostavljenih kontroleru moguće je kompenzovati njihov uticaj na operativno vreme prekidača.

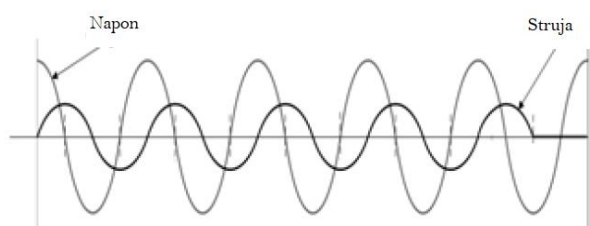
3. STRATEGIJA KONTROLISANOG UKLJUČENJA U ZAVISNOSTI OD OPTEREĆENJA

U narednim poglavljima dat je pregled strategija kontrolisanog uključenja prekidača za tri osnovna tipa opterećenja. U zavisnosti od očekivanja korisnika i dostupnih funkcionalnosti kontrolera, moguće je konfigurisati ga za neki od standardnih tipova opterećenja i, ukoliko je potrebno, za oba smera rada – uključenje i isključenje.

3.1 Kontrolisano uključenje prekidača kompenzacione prigušnice

U slučaju idealne kompenzacione prigušnice talasni oblik struje zaostaje približno 90° u odnosu na napon na njenim priključcima, [6]. Na taj način trenutna vrednost napona dostiže maksimum u trenutku prolaska struja kroz nulu, kao što je prikazano na Slici 5.

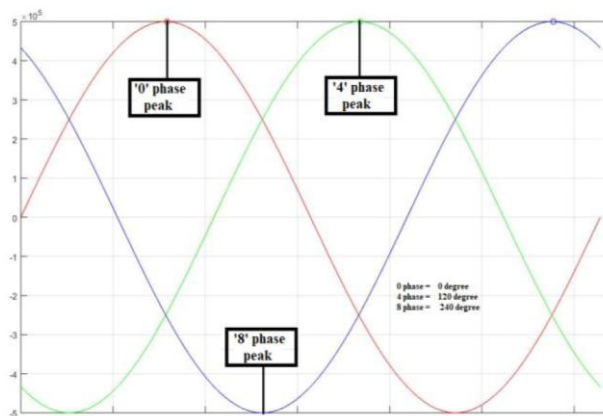
Amplituda udarne struje prigušnice i stepen izobličenja naponskog talasa zavise od vrednosti napona mreže u trenutku izdavanja naloga za uključanja i operativnog vremena prekidača.



Slika 5. Talasni oblik struje i napona kompenzacione prigušnice

Konvencionalno uključenje kompenzacione prigušnice u nasumičnom trenutku dovodi do pojave nesimetričnih struja, povećanja elektromehaničkih naprežanja 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 uključanja dođe u trenutku kada je vrednost napona u jednoj od faza bliska nuli, sklopni tranzijent će biti najizraženiji.

U slučaju trofaznih sistema maksimumi vrednosti signala faznih napona su uvek inverznog redosleda (L1-L3-L2) u odnosu na fazni redosled napona mreže (L1-L2-L3) i međusobno pomereni za trećinu periode, odnosno 6,66 ms kod sistema nazivne frekvencije 50 Hz (Slika 6).



Slika 6. Talasni oblik tri fazna napona i njihovi maksimumi

Optimalna strategija uključanja prigušnice se zasniva na uključanju svakog pola prekidača pri maksimalnoj vrednosti napona. Pošto je prigušnica induktivan element, prilikom uključanja prekidača pri maksimalnoj vrednosti napona nivo magnetskog fluksa je teorijski minimalan, pa se samim tim ograničava i vrednost udarne struje. Referentni trenutak je prolazak talasnog oblika napona faze L1 kroz nulu (*zero crossing*). Cilj kontrolera je da obezbedi uključanje pola L1 sa faznim pomerajem od 90° u odnosu na referentni trenutak, odnosno u momentu kada vrednost napona faze L1 dostigne svoj maksimum [7].

Svoj maksimum (sa negativnim predznakom) sledeća dostiže faza L3 za $90^\circ + 60^\circ = 150^\circ$ odnosno sa kašnjenjem od 3,33 ms u odnosu na fazu L1. Poslednji korak je uključanje faze L2, i to sa teorijskom zadržkom od $90^\circ + 120^\circ = 210^\circ$, odnosno 6,66 ms.

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 akumuliranom u prigušnici kao induktivnom elementu, kao 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 kontrolera prilikom isključenja prekidača prigušnice ogleda se u iniciranju mehaničkog odvajanja 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, trebalo bi da kontakti prekidača budu dovoljno udaljeni jedan od drugog da dielektrična čvrstoća nadjača povratni napon i ne dođe do ponovnog paljenja luka.

3.2 Kontrolisano uključenje prekidača energetskog transformatora

Kod trofaznih transformatora koji su formirani od tri monofazne jedinice ne postoji magnetska sprega između faza jednog namotaja, pa se sa aspekta strategije uključanja mogu posmatrati kao kompenzacione prigušnice, odnosno teži se uključanju svake faze pri maksimumu odgovarajućeg napona.

Na našim prostorima preovladavaju trofazni transformatori sa zajedničkim magnetskim jezgrom i kućištem, kod kojih primarni i sekundarni namotaj mogu biti spregnuti u zvezdu (uzemljena ili izolovana neutralna tačka) ili trougao. U pojedinim slučajevima transformatori sadrže i tercijerni namotaj. Ukoliko transformator poseduje tercijer ili je konstruisan kao trofazna jedinica sa zajedničkim jezgrom, tada postoji magnetska sprega između njegovih faza, što se odražava i na strategiju njegovog optimalnog uključanja.

U Tabeli I dat je pregled optimalnih trenutaka uključanja pojedinačnih faza prekidača transformatora u zavisnosti od sprege i načina uzemljenja neutralne tačke primarnog namotaja. Željeni trenutak uključanja prikazan je u formi faznog stava (ugla) svake od pojedinačnih faza u odnosu na referentni trenutak, odnosno prolazak signala napona faze L1 kroz nulu. Strategija uključanja podrazumeva energizaciju namotaja koji je prvi naveden u tabeli.

Opisana tehnika uključanja zasnovana je na merenju referentnog napona i ne uzima u obzir remanentni fluks transformatora.

Tabela I Optimalan trenutak uključanja u zavisnosti od sprege transformatora

Sprega transformatora	Faza L1 [°]	Faza L2 [°]	Faza L3 [°]
YNd; YNyn	90	180	180
Yd; Yy; Dd; Dyn; Dy	60	60	150

3.2.1 Transformator sa uzemljenom neutralnom tačkom (YNd; YNyn). U nastavku je opisana strategija uključanja transformatora čiji je namotaj koji se energizuje spregnut u zvezdu, sa uzemljenom neutralnom tačkom. Pri takvoj konfiguraciji, prvo se uključuje faza L1 i to pri maksimalnoj vrednosti njenog napona, kada je nivo fluksa najmanji. U pomenutoj fazi se uspostavlja struja magnećenja koja se zatvara preko uzemljenja neutralne tačke namotaja. Struja magnećenja u fazi L1 dovodi do indukcije simetričnog fluksa u preostalim fazama (L2 i L3), čija je vrednost jednaka polovini vrednosti fluksa faze L1 i suprotnog je polariteta. Zbog toga uspostavljena struja magnećenja u fazi L1 ima 1,5 puta veću vrednost od struje magnećenja u ustaljenom režimu kada su sve tri faze uključene.

Preostale dve faze potrebno je uključiti istovremeno sa pomerajem od 90° u odnosu na prvu. To je trenutak kada magnetski fluks faze L1 dostiže maksimalnu vrednost, a fluks indukovan u fazama L2 i L3 dostiže vrednosti potencijalnog fluksa koji bi u njima prouzrokovao mrežni napon u datom trenutku. Iako se uključanje faza L2 i L3 ne ostvaruje pri maksimumu odgovarajućih mrežnih napona, trenutak uključanja odgovara maksimumu magnetskog fluksa koji u tim fazama indukuje faza L1.

3.2.2 Transformator sa izolovanom neutralnom tačkom (Yd; Yy; Dd; Dyn; Dy). U slučaju transformatora sa izolovanom neutralnom tačkom, uključanjem samo jedne faze ne može se uspostaviti struja magnećenja zbog izolovane neutralne tačke ili sprege namotaja u trougao (D). Stoga se faze L1 i L2 uključuju istovremeno, pri maksimalnoj vrednosti međufaznog napona U_{L1-L2} , odnosno sa pomerajem od 60° u odnosu na referentni trenutak (prolazak napona faze L1 kroz nulu). U trenutku uključanja amplituda fluksa faza L1 i L2 jednaka je nuli. Napon faze L3 dostiže svoj maksimum sa kašnjenjem od 90° ($60° + 90° = 150°$ u odnosu na referentni trenutak). Njenim uključanjem u ovom trenutku postiže se uključanje pri minimalnom fluksu.

3.3 Kontrolisano uključanje prekidača kondenzatorske baterije

Kada se na ispražnjenu kondenzatorsku bateriju, kao element male impedanse, dovede napon u trenutku njegove maksimalne vrednosti, dolazi do izraženog prelaznog procesa u vidu prenapona i udarnih struja visoke amplitude.

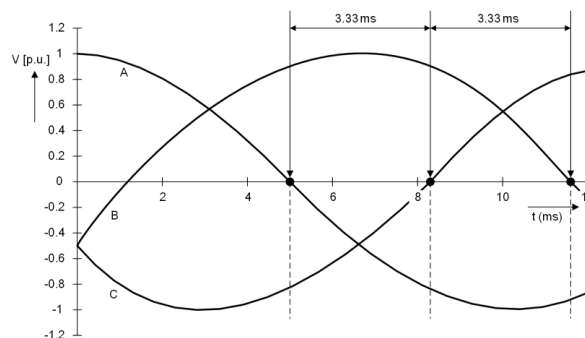
Da bi se postigla najmanja razlika potencijala prilikom kontrolisanog uključanja, ono se treba obaviti što bliže prolasku napona svake od faza kroz nulu. U Tabeli II dat je prikaz optimalnih trenutaka uključanja pojedinačnih faza prekidača u zavisnosti od načina uzemljenja neutralne tačke kondenzatorskih baterija.

Tabela II Optimalan trenutak uključanja u zavisnosti od načina uzemljenja kondenzatorskih baterija

Neutralna tačka kondenzatorske baterije	Faza L1 [°]	Faza L2 [°]	Faza L3 [°]
Uzemljena	0	120	60
Izolovana	180	90	90

3.3.1 Kondenzatorska baterija sa uzemljenom neutralnom tačkom. U slučaju kondenzatorskih baterija sa uzemljenom neutralnom tačkom svaka faza se uključuje nezavisno, pri prolasku njenog napona kroz nulu (Slika 7). Trenuci prolaska talasnih oblika napona kroz nulu međusobno su pomereni za 60°.

Redosled uključanja polova prekidača prikazan na Slici 7 je L1-L2-L3, sa vremenskim pomerajem od 3,33 ms za 50 Hz, odnosno 2,77 ms za 60 Hz sisteme.



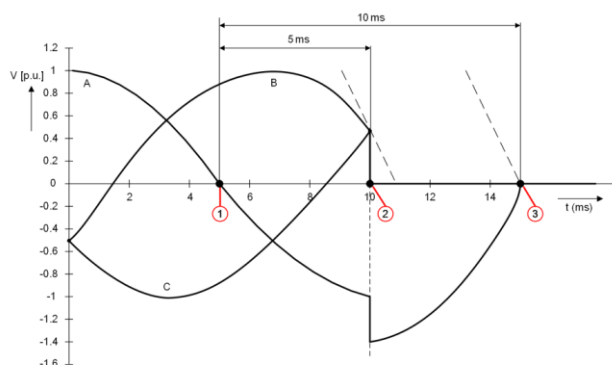
Slika 7. Optimalne tačke uključanja kondenzatorske baterije sa uzemljenom neutralnom tačkom

3.3.2 Kondenzatorska baterija sa izolovanom neutralnom tačkom. U slučaju kondenzatorskih baterija sa izolovanom neutralnom tačkom uključanje pri prolasku napona kroz nulu se drugačije interpretira u pogledu redosleda izvršenja komandi u poređenju sa kondenzatorskim baterijama kod kojih je neutralna tačka uzemljena.

Umesto da se svaka faza uključi nezavisno, u trenutku prolaska faznog napona kroz nulu, dve faze se uključuju istovremeno (Slika 8), u trenutku kada su njihovi naponi međusobno jednaki. To je momenat kada je međufazni

napon U_{L2-L3} jednak nuli, što rezultuje uključanjem faza L2 i L3 kondenzatorskih baterija pri nultom naponu.

Zatim, četvrtinu periode kasnije, faza L1 se uključuje u trenutku prolaska njenog napona kroz nulu.



Slika 8. Optimalne tačke uključanja kondenzatorske baterije sa izolovanom neutralnom tačkom

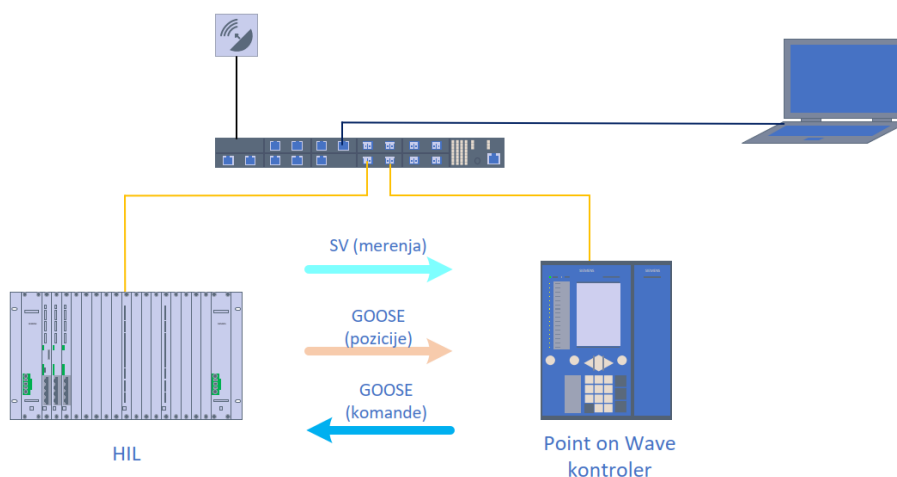
Vremenski trenuci od značaja, označeni brojevima na Slici 8, predstavljaju:

1. referentni trenutak kontrolera – prolazak napona faze L1 kroz nulu;
2. trenutak uključanja faza L2 i L3;
3. trenutak uključanja faze L1.

4. LABORATORIJSKI MODEL

Efekti primene tehnike kontrolisanog uključanja prekidača ispitani su u laboratorijskim uslovima, na primeru kompenzacione prigušnice 400 kV. U tu svrhu formirana je laboratorijska postavka (Slika 9) koju čine: mikrop procesorski uređaj za relejnu zaštitu i upravljanje kao kontroler prekidača, mrežni komunikacioni svič i Hardware-in-the-Loop (HIL) uređaj, na kome je realizovan model kompenzacione prigušnice 400 kV, prekidača VN i dela ostatka mreže.

Procesna mreža (prema standardu IEC 61850) na modelu je uprošćena, realizovana u topologiji „zvezda”, sa jednim mrežnim komunikacionim svičem. Komunikacioni svič ima ulogu i izvora vremenske sinhronizacije po protokolu IEEE 1588 *Precision Time Protocol* – PTP, koji je neophodan za generisanje validnih odbiraka mernih veličina – *Sampled Values*.



Slika 9. Blok-šema laboratorijske postavke

4.1 Model kompenzacione prigušnice

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

Prekidač prigušnice modelovan je kao rasklopni element sa nezavisno upravljivim polovima, tehničkih karakteristika datih u Tabeli IV.

Tabela III Tehničke karakteristike kompenzacione prigušnice

Nazivni napon	420 kV
Nazivna frekvencija	50 Hz
Reaktivna snaga	250 Mvar
Nazivna struja	343,66 A
Sprega	Yn
Induktivnost namotaja	2,25 H (po fazi)

Tabela IV Tehničke karakteristike prekidača

Vreme mehaničkog uključenja prekidača	50 ms
Vreme mehaničkog isključenja prekidača	30 ms

Mreža je modelovana kao Thevenin-ov ekvivalent koji sledi iz snage kratkog spoja na mestu priključenja prigušnice. Amplituda i prigušenje udarnih struja prigušnice dominantno zavise od parametara prigušnice i trenutka uključenja prekidača, dok uticaj udaljenosti i „jačine” mreže ima sekundarni efekat i uglavnom utiče na amplitudu prenapona, a ne na efikasnost kontrolisanog uključenja. Uvažavanje otpornosti u kolu dovodi do dodatnog prigušenja tranzijenta i blagog faznog pomeraja optimalne tačke uključenja, ali nema suštinski uticaj na strategiju kontrolisanog uključenja niti značajno povećava grešku određivanja optimalnog trenutka.

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

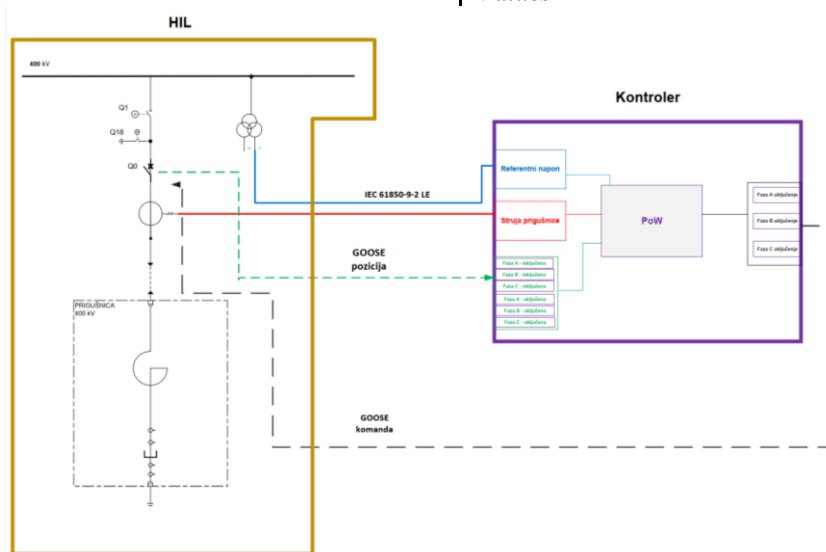
- ne postoje međusobne varijacije u operativnim vremenima polova prekidača; ona uvek odgovaraju zadatim vrednostima u sve tri faze;

- postavka uvodi kašnjenje komande od trenutka izdavanja sa kontrolera do njene registracije od strane uređaja HIL; kako se razmena informacija između kontrolera i uređaja HIL odvija porukama GOOSE, 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.

4.2 Kontroler prekidača

Funkcija kontrolera implementirana je u okviru mikroprocesorskog uređaja za relejnu zaštitu i upravljanje (Slika 10). Na osnovu analize referentnog naponskog talasa, uzimajući u obzir podešene parametre, kao što su strategija uključenja i vremenske karakteristike prekidača, kontroler računa i uvodi optimalnu vremensku zadržku aktiviranja kalema za uključenje prekidača.

Referentni signal se dobija sa naponskog transformatora priključenog na sabirnicama 400 kV. Njega generiše uređaj HIL kao *SV publisher*, a kontroler preuzima kao *SV subscriber* u okviru formirane *Process Bus* mreže. Trenutne vrednosti napona se šalju u formi paketa odabiraka definisanih kao IEC 61850-9-2 *Sampled Values* strimovi.



Slika 10. Logički dijagram razmene informacija uređaja HIL i kontrolera

Sadržaj paketa prikazan je u Tabeli V. U svakom paketu merenja, pored odabiraka tri fazna i nultog napona, nalaze se i vrednosti faznih struja merenih na priključcima kompenzacione prigušnice, kao i računski vrednost nulte struje.

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

Tabela V Sadržaj paketa odabiraka merenja

IEC 61850-9-2 <i>Sampled Value</i> strim							
Napon sabirnica				Struja prigušnice			
U _{L1}	U _{L2}	U _{L3}	3U ₀	I _{L1}	I _{L2}	I _{L3}	3I ₀
Poz 1	Poz 2	Poz 3	Poz 4	Poz 5	Poz 6	Poz 7	Poz 8

U kontroleru su aktivirane funkcije nadzora. Nakon svakog uključenja kontroler prikuplja podatke, analizira ih i po potrebi generiše alarm na uočenu neispravnost. Implementirane su sledeće funkcije:

- beleži vrednost izmerene udarne struje i poredi sa podešenim limitom, što na našem primeru odgovara vrednosti dvostruke nazivne struje prigušnice;
- meri mehaničko vreme uključanja prekidača na osnovu informacije o signalnim kontaktima prekidača, modelovanih na HIL uređaju, i registruje njegovo odstupanje u odnosu na podešenu vrednost;
- meri električno vreme uključanja prekidača na osnovu detekcije uspostavljanja struje i registruje njegovo odstupanje u odnosu na računatu vrednost.

5. REZULTATI ISPITIVANJA

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

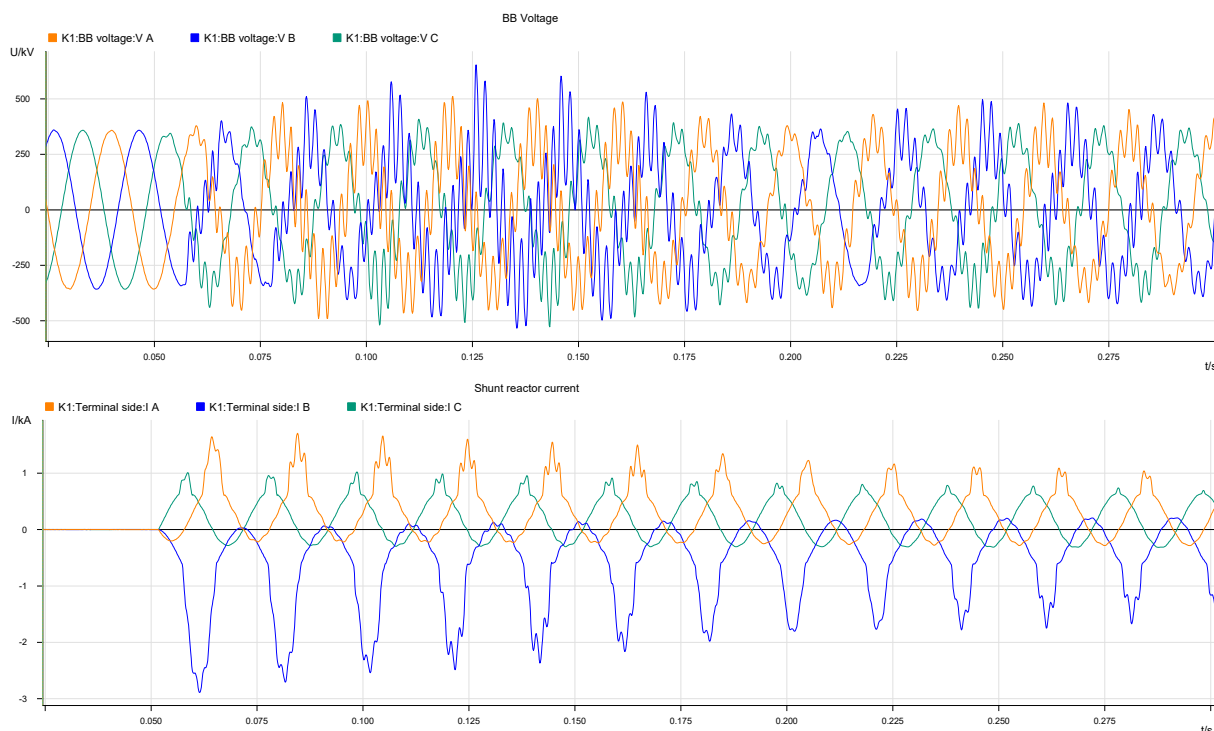
1. konvencionalno – nasumično istovremeno uključanje sva tri pola prekidača;

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.

5.1 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 11) potvrđuje istovremeno uključanje sva tri pola prekidača.



Slika 11. Talasni oblici struje i napona pri konvencionalnom uključanju

Na njemu je uočljiva zavisnost vrednosti udarne struje od trenutne vrednosti napona u trenutku uključanja. Izražen je udarni period velike vremenske konstante, tj. dužine trajanja. Pomenuto dovodi do primetnog izobličenja talasnih oblika napona i struja, ali i velikih vrednosti udarnih struja.

U ovom slučaju vršne vrednosti su iznosile $I_{L1} = 1,63 \text{ kA}$, $I_{L2} = 2,88 \text{ kA}$ i $I_{L3} = 955 \text{ A}$. Vrednost udarne struje provodnika neutralne tačke iznosi $I_N = 1,86 \text{ kA}$.

5.2 Kontrolisano uključanje svakog pola prekidača u najnepovoljnijem trenutku

Kako je prigušnica element induktivne prirode, kontrolisano uključanje 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 uključanja, pogrešnim odabirom njegovih parametara može doći do uključanja pri kome će negativni efekti biti najizraženiji.

Talasni oblici napona prikazani su na Slici 15, a struja na Slici 16.

Ovakvo uključanje praćeno je izuzetno visokim vršnim vrednostima udarnih struja $I_{L1} = 3,47 \text{ kA}$, $I_{L2} = 3,64 \text{ kA}$ i $I_{L3} = 3,80 \text{ kA}$. Do izražaja dolazi nesimetrija udarnih struja, pa vrednost struje provodnika za uzemljenje prigušnice dostiže svoj maksimum od $I_N = 3,33 \text{ kA}$ (Slika 12).

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 verovatnoću da dođe do zasićenja strujnih transformatora.

5.3 Optimalno uključanje prekidača

Optimalna strategija uključanja prigušnice se zasniva na uključanju svakog pola prekidača pri maksimalnoj vrednosti napona. Referentni trenutak je prolazak talasnog oblika napona faze L1 kroz nulu (*zero crossing*). Cilj

kontrolera je da obezbedi uključanje pola L1 sa faznim pomerajem od 90° u odnosu na referentni trenutak, odnosno u momentu kada vrednost napona faze A dostigne svoj maksimum.

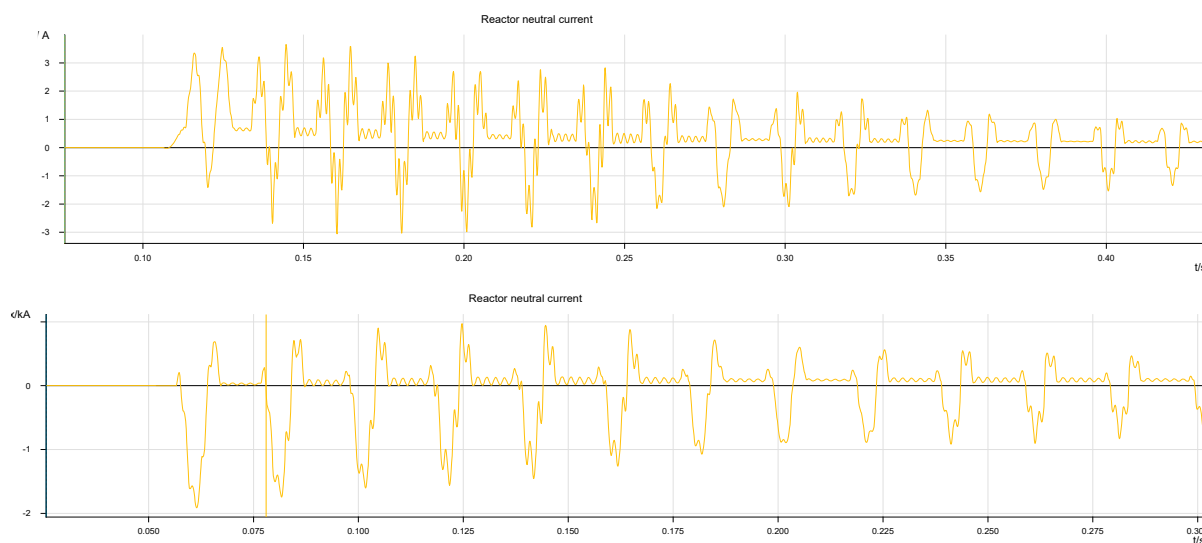
Svoj maksimum (sa negativnim predznakom) sledeća dostiže faza L3 za $90^\circ + 60^\circ = 150^\circ$, odnosno sa kašnjenjem od 3,33 ms u odnosu na fazu L1.

Poslednji korak je uključanje faze L2, i to sa teorijskom zadržkom od $90^\circ + 120^\circ = 210^\circ$, odnosno 6,66 ms.

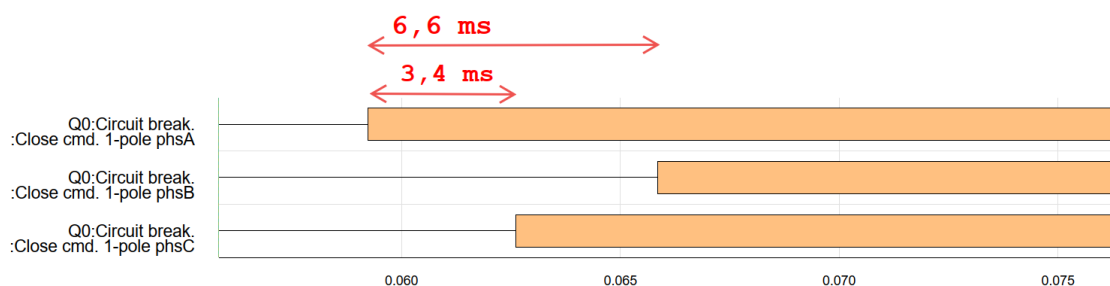
Na Slici 13 prikazano je sekvencionalno izdavanje komandi uključanja polova, dok se analizom događaja može utvrditi da ne postoje odstupanja operativnog vremena kontrolera od teorijski idealnih vrednosti.

Analizom oscilografskih zapisa uočeno je pravovremeno uključanja svakog pola. To potvrđuje primer faze L1 (Slika 14), gde se može videti uspostavljanje struje pri maksimalnoj vrednosti napona.

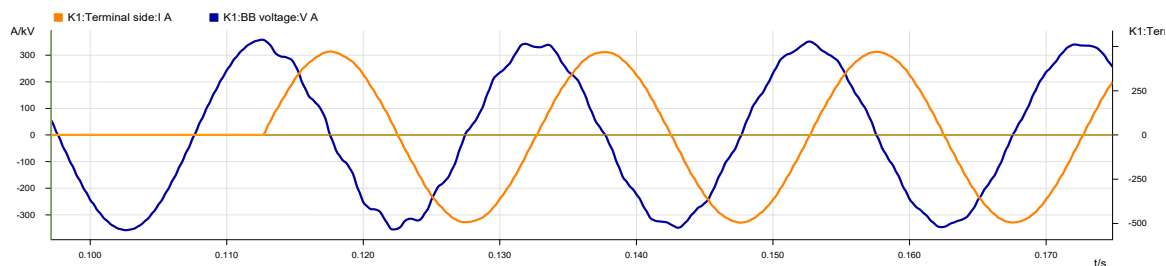
Poređenjem talasnih oblika napona (Slika 15) i struje (Slika 16) može se zaključiti da se primenom tehnike kontrolisanog uključanja potpuno eliminiše udarni period. Optimalnim uključanjem, izobličenje talasnog oblika napona je gotovo neprimetno, uz eliminaciju viših harmonika.



Slika 12. Talasni oblik nulte struje prigušnice najnepovoljnijeg (gore) i konvencionalnog (dole) uključanja prigušnice



Slika 13. Redosled izdavanja komandi uključanja polova prekidača



Slika 14. Trenutak uspostavljanja struje u odnosu na talasni oblik napona

Kontrolisanim uključenjem prekidača prigušnice ograničavaju se amplitude udarnih struja na $I_{L1} = 469 \text{ A}$, $I_{L2} = 523 \text{ A}$ i $I_{L3} = 488 \text{ A}$. Efektivna vrednost (RMS) struje uključivanja u prvoj periodi iznosi približno 340 A, što odgovara nazivnoj struji prigušnice.

Kontrolisano uključivanje 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 17).

Sa oscilografskog zapisa se može primetiti da je impuls tranzijenta nulte struje trajao približno 6 ms u slučaju optimalnog uključivanja, dok je na primeru

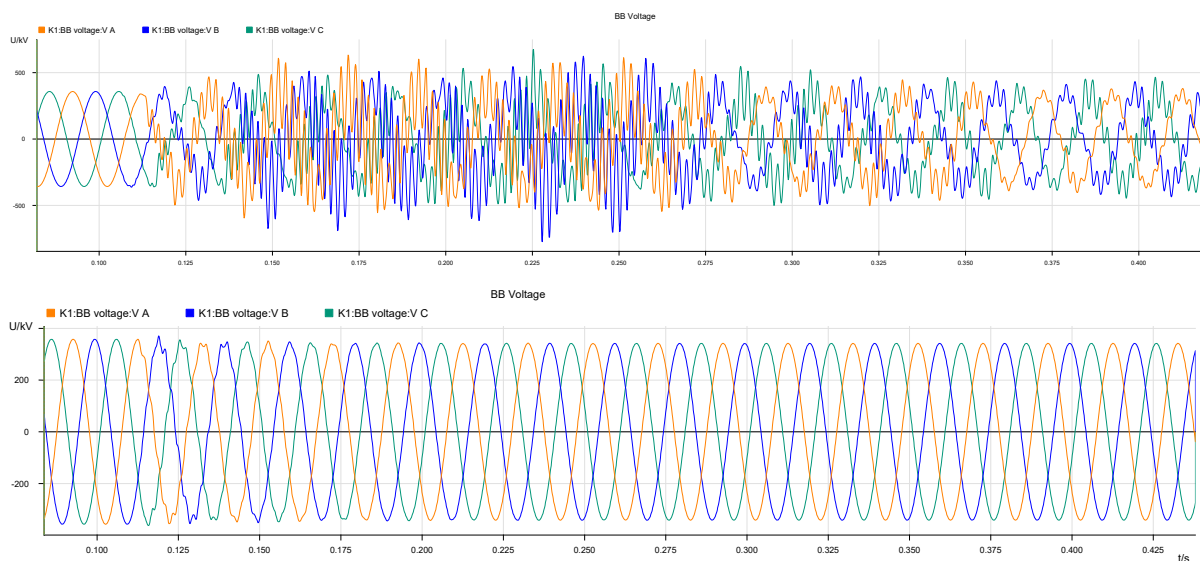
najnepovoljnijeg trajao duže od 500 ms. Tačno vreme nije izmereno jer je trajanje zapisa ograničeno.

Uticaj primene kontrolisanog uključivanja na ograničavanje vrednosti udarne struje prigušnice može se sagledati poređenjem izmerenih vrednosti sve tri strategije ispitane na laboratorijskom modelu (Tabela VI).

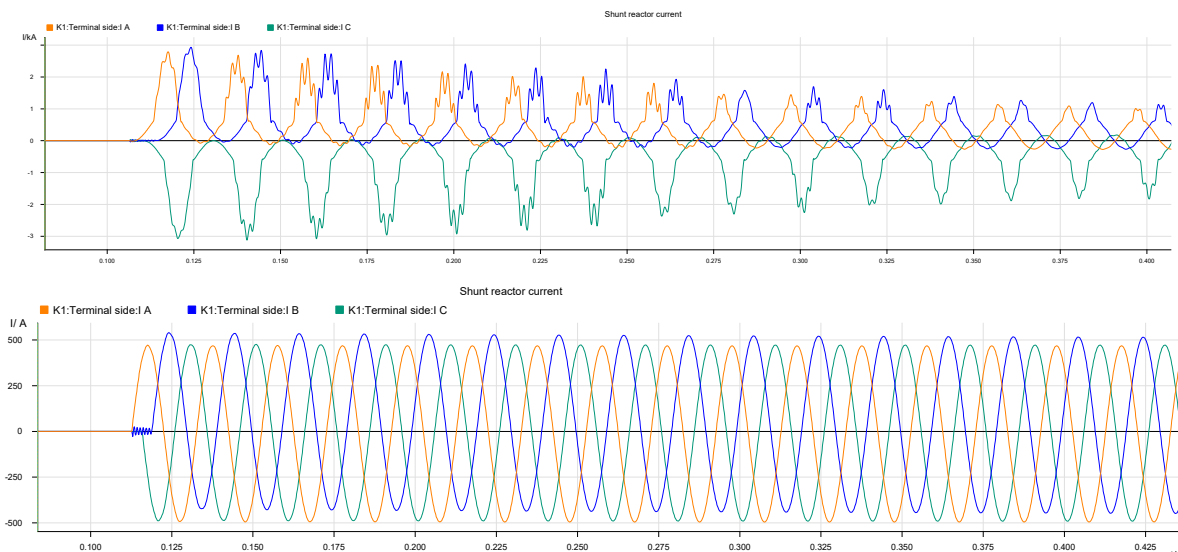
Maksimalna vrednost udarne struje je 3,80 kA, dok se kontrolisanim uključenjem ona ograničava na maksimalno izmerena 0,52 kA. Takođe, suzbijanje nesimetrije struja dovodi do ograničavanja vrednosti udarne struje provodnika za uzemljenje prigušnice sa $I_N = 3,33 \text{ kA}$ na $I_N = 0,36 \text{ kA}$.

Tabela VI Vrednosti udarnih struja prigušnice

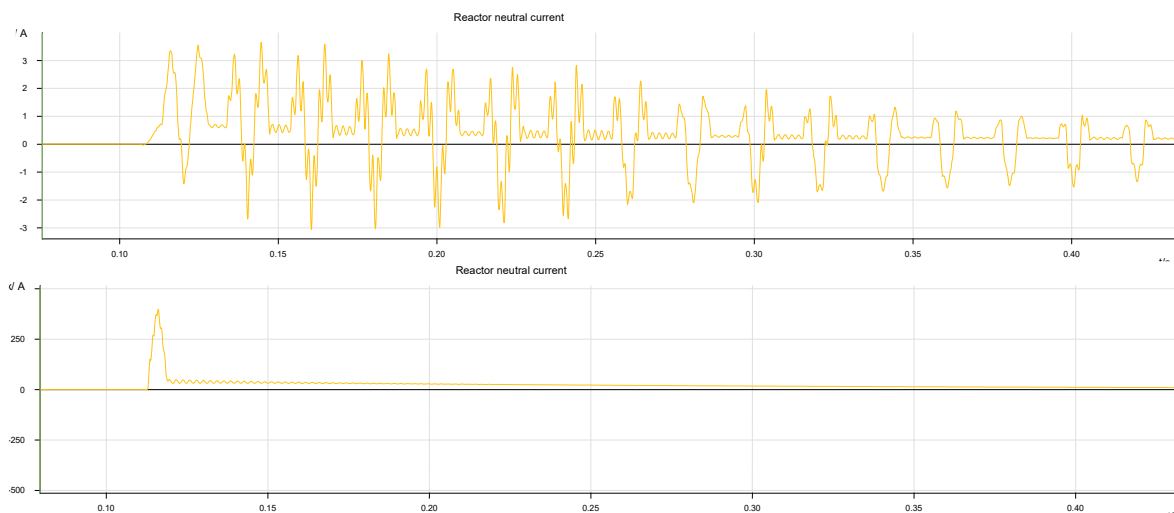
Udarana struja prigušnice	Faza L1 [kA]	Faza L2 [kA]	Faza L3 [kA]	I_N [kA]
Konvencionalno – nekontrolisano uključivanje	1,63	2,88	0,95	1,86
Kontrolisano – najnepovoljnije uključivanje	3,47	3,64	3,80	3,33
Kontrolisano – optimalno uključivanje	0,47	0,52	0,42	0,36



Slika 15. Talasni oblici napona najnepovoljnijeg (gore) i optimalnog (dole) uključivanja prigušnice



Slika 16. Talasni oblici struje najnepovoljnijeg (gore) i optimalnog (dole) uključanja prigušnice



Slika 17. Talasni oblik nulte struje prigušnice najnepovoljnijeg (gore) i optimalnog (dole) uključanja

6. ZAKLJUČAK

Konvencionalno (nekontrolisano) uključenje prekidača je nasumične prirode, odnosno talasni oblici zavise od vrednosti napona u trenutku uključanja. Generalno posmatrano, nekontrolisano uključanje 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 relejne zaštite.

Od velikog značaja pokazala su se ispitivanja kontrolisanog uključanja u najnepovoljnijem trenutku. Time su dobijeni dosledni rezultati koji pružaju mogućnost analize uticaja primene optimalnog (*Point-on-Wave*) uključanja. Rezultati ispitivanja naveli su autore da steknu uvid u ključnu ulogu precizne koordinacije parametara kontrolera i vremena prekidača. Svaka razlika podešenog i

stvarnog vremena uključanja prekidača od 1 ms reflektuje se kao odstupanje od 18° u odnosu na optimalni trenutak uključanja. Upotreba kontrolera sa pogrešno podešenim parametrima rezultuje izraženijim sklopnim tranzijentom u odnosu na nasumično uključanje.

Analizom oscilografskih zapisa tri različite strategije uključanja prekidača prigušnice 400 kV, odnosno poređenjem talasnih oblika i vrednosti udarnih struja, potvrđena je potpuna eliminacija udarnog perioda primenom tehnike kontrolisanog uključanja. Sa daljim razvojem tehnologije dolazi do povećanja fleksibilnosti, pouzdanosti i jednostavnosti primene, uz istovremeno smanjenje ukupnih troškova implementacije, što omogućava njenu širu primenu u okviru elektroenergetskog sistema.

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

ZAHVALNICA

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

LITERATURA

- [1] European Network of Transmission System Operators for Electricity: „Controlled Switching Device: Application, Use And Maintenance Problems”, Final 16 November 2022.
- [2] Yahiou A., Mellaha H., Bayadib A., „Inrush Current Reduction by a Point-on-Wave Energization Strategy and Sequential Phase Shifting in Three-Phase Transformer”, *International Journal of Electrical Engineering*, Vol. 35 No. 12, p.p. 2321-2328, December 2022.
- [3] Dhotre D., Rajguru G., Belhekar V., Kulkarni P., „Reduction of Transient Inrush Current in Transformer

- Using Point-on-Wave Switching Method”, *International Journal of Scientific Development and Research*, Vol. 2 No. 5, p.p. 433 – 436, May 2017.
- [4] SIPROTEC 5 Point-On-Wave Switching Manual V9.90, document reference C53000-H5040-C082-7, edition 11. 2024.
- [5] Goldsworthy D., Roseburg T., „Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Application Examples and Benefits”, *34th Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, Washington, October 2007.
- [6] Faiz M., Chang, A. Q., Mirjat, B. A., Memon N., „The Simulation Analysis of Shunt Reactor Controlled Switching at 500 kV Network”, *International Journal of Electrical Engineering & Emerging Technology*, Vol. 05, No. 02, p.p. 31-37, December 2022.
- [7] Kumar A., Perveen R., Parikh U., „Controlled Switching of Power Transformer and Shunt Reactors for Minimization of Switching Transients: A Review”, *Journal of The Institution of Engineers (India)*, Vol. 103, p.p. 1013–1024, October 2021.

BIOGRAFIJE



Uroš Njegovan je rođen u Pančevu 1990. godine. U rodnom gradu je završio gimnaziju. Dalje školovanje nastavlja na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, gde završava osnovne i master akademske studije. Godine 2024. na istom fakultetu započinje doktorske studije na Odseku za energetiku. Trenutno je zaposlen u kompaniji „Siemens Energy d. o. o. Beograd”. Oblasti rada i interesovanja su mu relejna zaštita i digitalizacija elektroenergetskih postrojenja.

ORCID: 0009-0000-5626-0969



Zoran Stojanović je rođen u Požarevcu 1979. godine. Gimnaziju opšteg smera završio je u Svilajncu. Diplomirao je, magistrirao i doktorirao na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu 2003, 2009. i 2012, respektivno. U zvanje redovnog profesora na istom fakultetu izabran je 2022, dok kao gostujući profesor predaje na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Banjaluci, Fakultetu tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu i Elektronskom fakultetu Univerziteta u Nišu. Oblasti njegovog stručnog i naučnog interesovanja su relejna zaštita, razvodna postrojenja, digitalna obrada signala, monitoring i dijagnostika visokonaponske opreme.

ORCID: 0000-0003-2432-394X



Aleksandar Marjanović je rođen u Beogradu 1991. godine. Završio je osnovnu školu i gimnaziju u Valjevu. Studije nastavlja na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, gde završava osnovne i master studije. Na istom fakultetu 2024. godine započinje doktorske studije na Odseku za energetiku. Trenutno je zaposlen u kompaniji „Siemens d. o. o. Beograd”. Oblasti rada i interesovanja su mu upravljanje elektroenergetskim sistemom i postrojenjima, digitalizacija elektroenergetskih postrojenja, integracija obnovljivih izvora i skladišta električne energije, kao i upravljanje mikromrežama.

ORCID: 0009-0004-3318-8967

Uroš N. Njegovan^{1,2}, Zoran N. Stojanović¹, Aleksandar D. Marjanović^{1,3}

Mitigation of Switching Transients Using Point-on-Wave Controlled Circuit Breaker Closing

¹ University of Belgrade – School of Electrical Engineering, Belgrade*² Siemens Energy d.o.o. Beograd – Belgrade, Serbia³ Siemens d.o.o. Beograd – Belgrade, Serbia

Original scientific research article

Highlights

- Effects of switching transients caused by the connection of different loads are presented
- The technique of controlled circuit breaker switching is described
- The effects of applying the technique were tested on a real-time simulator
- Compared controller and conventional shunt reactor circuit breaker switching

Abstract

Transmission lines loaded below their surge impedance present a significant source of reactive power in the 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. 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 de-energized. 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. The algorithm for controlled switching of the circuit breaker has been tested in the laboratory. The test setup consists of a Point-on-Wave Intelligent Electronic Device (IED) and HIL (Hardware-in-the-Loop) 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.

Keywords

Controlled switching, Hardware-in-the-Loop, Point-on-Wave, Reactor inrush, Shunt reactor

Note:

This article represents an expanded, improved and additionally peer-reviewed version of the paper "Application of Controlled (Point on Wave) Switching for 400 kV Shunt Reactor" (<https://doi.org/10.2478/epic.2025.00008>), awarded by Expert Committee EC-B5 Protection and Automation at the 37th CIGRE Serbia Conference, Zlatibor, May 26-30, 2025

Received: December 26th, 2025 Reviewed: March 19th, 2026Modified: May 6th, 2026 Accepted: May 12th, 2026

*Corresponding author: Uroš N. Njegovan, +381 60/81-70-242

E - mail: uros.njegovan@siemens-energy.com