Broj rada: R3-13
DOI:10.46793/CIRED2026.R3-13_179

UTICAJ „ZERO-MISSING“ FENOMENA NA UKUPNO VREME ISKLJUČENJA PRILIKOM KVAROVA NA KOMPENZOVANOM VISOKONAPONSKOM KABLU

IMPACT OF THE ZERO-MISSING PHENOMENON ON THE TOTAL FAULT CLEARING TIME IN A COMPENSATED HIGH VOLTAGE CABLE

Uroš NJEGOVAN, Siemens Energy doo Beograd, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Srbija*
Aleksandar MARJANOVIĆ, Siemens doo Beograd, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Srbija
Zoran STOJANOVIĆ, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Visokonaponski kablovski vodovi, usled svoje izražene kapacitivnosti, predstavljaju značajan izvor reaktivne snage, što za posledicu ima povećanja napona iznad maksimalno dozvoljenih vrednosti na njihovim krajevima. Kako bi se napon održao u propisanim granicama, jedno od najjednostavnijih rešenja je upotreba kompenzacione prigušnice (eng. Shunt reactor), priključene na jednom ili oba kraja kabla. Primena ovakvog rešenja predmet je velikog broja akademskih studija koje ukazuju na mogućnost pojave „zero-missing” fenomena prilikom uključenja kompenzovanog visokonaponskog kabla u prazan hod, u trenutku prolaska napona kroz nulu. U tom slučaju se u kompenzacionoj prigušnici može indukovati značajna jednosmerna komponenta struje. Zbir jednosmerne i naizmenične komponente struje koja prolazi kroz prekidač može biti takav da ona ne postiže nultu vrednost tokom dužeg vremenskog intervala nakon uključenja prekidača, čak i nekoliko sekundi. Upravo po tome je fenomen dobio naziv „zero-missing”, odnosno „izostanak prirodnog prolaska kroz nulu“. Ova pojava može značajno uticati na rad sistema relejne zaštite jer, u slučaju uključenja prekidača na kvar, prekidač neće uspeti da ugasi luk u zdravim fazama sve dok struja ne dostigne nultu vrednost. Posledično, ukupno vreme isključenja može biti produženo, što nepovoljno utiče na stabilnost elektroenergetskog sistema i dovodi do dodatnog termičkog i mehaničkog opterećenja opreme. U radu su predstavljeni negativni efekti „zero-missing“ fenomena. Na simulatoru u realnom vremenu (HIL – Hardware in the Loop) razvijen je model kompenzovanog kablovskog voda, na kojem su analizirani talasni oblici napona i struja tokom trajanja ovog fenomena. Posebna pažnja posvećena je analizi uticaja stepena kompenzacije kabla i različitih tipova kvarova na dužinu njegovog trajanja. Na kraju je dat pregled dostupnih mera za ublažavanje i suzbijanje ovog fenomena.

Ključne reči: fenomen „zero-missing“, kompenzacija reaktivne snage, kompenzaciona prigušnica, simulacija Hardware-in-the-Loop, uključenje kablovskog voda

* Uroš Njegovan, uros.njegovan@siemens-energy.com

ABSTRACT

High voltage cable lines, due to their pronounced capacitance, represent a significant source of reactive power, which may lead to voltage levels rising above the maximum permissible limits at their terminals. To maintain the voltage within the prescribed range, one of the simplest solutions is the application of a shunt reactor installed at one or both ends of the cable. The use of such compensation has been the subject of numerous academic studies, which highlight the possibility of the zero-missing phenomenon occurring when a compensated high-voltage cable is energized under no-load conditions at the instant of voltage zero crossing. In this situation, a substantial direct-current (DC) component is induced in the shunt reactor current. The combined DC and AC components of the current flowing through the circuit breaker may be such that the current does not reach its natural zero value for an extended period after energization, potentially lasting several seconds. This characteristic behavior is the origin of the term "zero-missing". This phenomenon can significantly affect the performance of protection systems since in the event of energization onto an existing fault, the circuit breaker will be unable to extinguish the arc in the healthy phases until the current reaches its natural zero value. Consequently, the total fault clearing time may be extended, which adversely impacts the stability of the power system and results in additional thermal and mechanical stress on the equipment. The paper presents the adverse effects associated with the zero-missing phenomenon. A model of a compensated cable line was developed on a real time Hardware in the Loop (HIL) simulator, where the voltage and current waveforms during the phenomenon were analyzed. Particular attention is given to the influence of the cable compensation level and various fault types on the duration of the phenomenon. Finally, an overview of the available measures for mitigating and suppressing this phenomenon is provided.

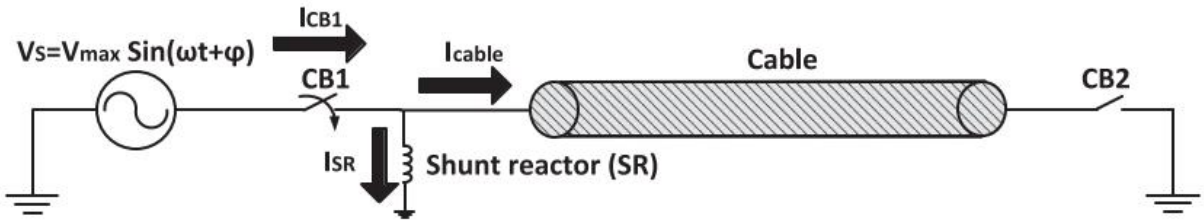
Keywords: Hardware-in-the-Loop simulation, HV cable switching, Reactive power compensation, Shunt reactor, Zero-missing phenomenon

1 UVOD

Visokonaponski (VN) kablovi postaju jedan od ključnih elemenata modernih elektroenergetskih sistema (EES), naročito u urbanim regionima, sredinama gde instalacija nadzemnih vodova nije tehnički izvodljiva i usled potrebe za povećanjem prostorne efikasnosti. Sve se ćešće primenjuju za prenos energije proizvedene u obnovljivim izvorima, dok u slučaju vetroelektrana na moru predstavljaju i jedino praktično moguće rešenje. Povećavanjem dužine kablovskih vodova do izražaja dolaze njihove kapacitivnosti i tada postaju značajan izvor reaktivne snage u mreži. Kapacitivna struja punjenja VN kabla proporcionalna je njegovoj dužini i značajno nadmašuje vrednosti nadzemnih vodova istih dužina. Generisanjem reaktivne snage, kablovski vodovi dovode do neželjenog lokalnog povećanja napona, naročito izraženog pri malim opterećenjima i u režimu praznog hoda.

Zbog toga se u praksi sve češće primenjuju neke od dostupnih tehnologija kompenzacije reaktivne snage, a paralelno priključena kompenzaciona prigušnica (eng. Shunt reactor), na jednom ili oba kraja VN kabla, predstavlja jednu od najzastupljenijih. Kompenzacione prigušnice uobičajeno se povezuju direktno na dugačke kablovske vodove i energizuju istovremeno, uključenjem zajedničkog prekidača, sa ciljem ograničavanja sklopnog prenapona [1], kao što je prikazano na slici 1. Njihove tehničke karakteristike određuju se uzimajući u obzir ukupnu kapacitivnost kabla i željeni stepen kompenzacije. Samim tim, pored značajne uloge tokom prelaznog procesa energizacije kabla, služe i za održavanje željenog naponskog

profila u EES-u i rasterećenje prenosne mreže od viška kapacitivne reaktivne snage u ustaljenom radnom režimu.



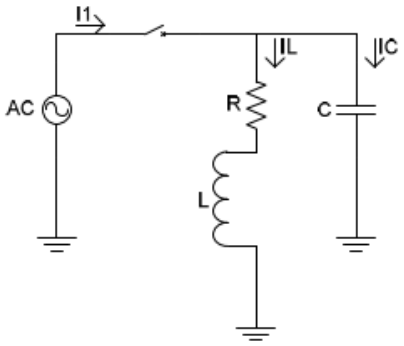
Slika 1 – Uprošćena jednopolna šema kompenzacije kabla, izvor: [2]

Međutim, interakcija kapacitivnosti kabla i induktivnosti prigušnice uvodi specifične elektromagnetske pojave sa posledicom izobličenja talasnih oblika napona i struja, koje nisu prisutne kod nadzemnih vodova. Za inženjere relejne zaštite svakako najkritičniji je fenomen izostanka prolaska struje kroz nulu (eng. Zero-missing). Obzirom da je gašenje luka u konvencionalnim prekidačima zasnovano na prirodnom prolasku struje kroz nulu, ovaj fenomen može dovesti do značajnog povećanja ukupnog vremena isključenja ali i do oštećenja prekidača.

2 ZERO-MISSING FENOMEN

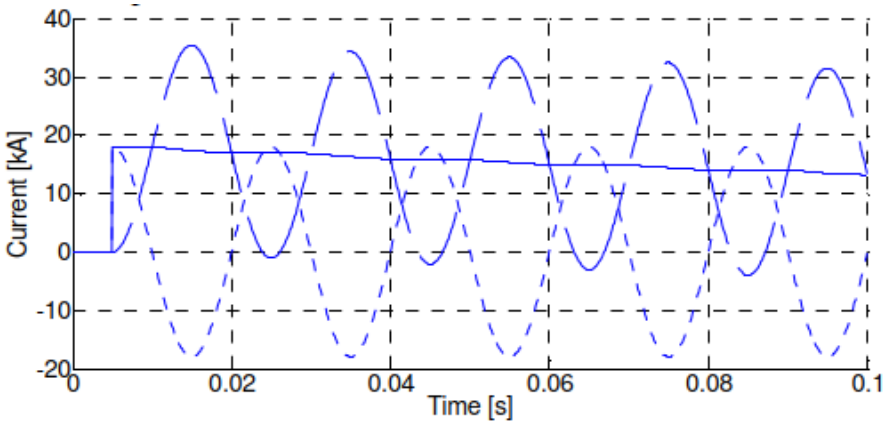
Zero-missing fenomen predstavlja izostanak prirodnog prolaska talasnih oblika struje kroz nulu tokom više uzastopnih perioda. Može se javiti prilikom istovremenog uključenja induktivnih i kapacitivnih elemenata, a naročito je izražen pri energizaciji visokonaponskih kablovskih vodova kompenzovanih paralelnim prigušnicama, kada je stepen kompenzacije reaktivne snage veći od 50% [3]. U slučaju neopterećenog kablovskog voda, struja kroz kompenzacionu prigušnicu je suprotnog faznog stava u odnosu na kapacitivnu struju punjenja kabla čime se smanjuje amplituda rezultujuće naizmenične (AC) komponente kroz prekidač [4]. Pošto struja uključenja kompenzacione prigušnice sadrži jednosmernu (DC) komponentu, rezultujuća struja kroz prekidač može imati jednosmernu komponentu veću od naizmenične. Kada se to dogodi, struja koja prolazi kroz prekidač neće proći kroz nulu sve dok jednosmerna komponenta ne postane manja od rezultujuće naizmenične. Pošto je tokom uključenja ukupna otpornost sistema veoma mala, vremenska konstanta poprima veliku vrednost. Shodno tome, prigušenje jednosmerne komponente struje može potrajati i nekoliko sekundi. U praksi, ovo može izazvati ozbiljne operativne probleme jer predstavlja kritičan period tokom kojeg nije moguće bezbedno isključiti prekidač, odnosno prekinuti struju.

Za potrebe osnovne analize procesa uključenja kompenzovanog kabla može se upotrebiti pojednostavljen RLC model mreže, sačinjen od izvora naizmeničnog napona, rasklopnog elementa i paralelne veze kondenzatora i induktivnosti u pojedinačnim granama, kao što je prikazano na slici 2. Na ovom, pojednostavljenom primeru, impedanse induktivnosti i kondenzatora su jednake pa su i njihove struje istog intenziteta. Obzirom na suprotne fazne statove, zbir njihovih struja iznosi nula. U struji induktivnosti moze se javiti jednosmerna komponenta, njena amplituda zavisi od trenutka uključenja prekidača. Ukoliko do uključenja prekidača dođe pri nultoj vrednosti napona izvora, u kolu se javlja maksimalna jednosmerna komponenta struje. Tada prigušnica kao induktivni element, teži uspostavljanju vršne vrednosti struje na sinusnom talasu, ali je ne može trenutno ostvariti, pa se ta razlika manifestuje kao najveća moguća jednosmerna komponenta (slika 3) i kroz prekidač protiče samo jednosmerna komponenta kao posledica udarnog perioda uključenja induktivnog elementa.



Slika 2 – Ekvivalentan RLC model mreže; izvor: [4]

Ponašanje sistema koji se sastoji od kompenzacione prigušnice i kabla ne razlikuje se značajno od ponašanja modela prikazanog na slici 2. Kompenzaciona prigušnica može se modelovati kao induktivnost u rednoj vezi sa otpornikom, dok se kabl može aproksimirati kao pretežno kapacitivni element [4].



Slika 3 – Struja kroz induktivnost (I_L, isprekidanom linijom), struja kroz kondenzator (I_C, tačkastom linijom) i struja kroz prekidač (I_1, punom linijom), izvor: [4]

Ipak, postoje određene razlike između jednostavnog RLC modela mreže i realnog sistema kabl/prigušnica, kao što su, na primer, sklopni prenaponi. Sklopni prenaponi nastaju usled procesa punjenja kapacitivnosti kabla i oscilovanja energije između kapacitivnosti kabla i induktivnosti prigušnice. Kao i kod zero-missing fenomena, amplitude sklopnih prenapona zavise od trenutne vrednosti napona u momentu uključenja prekidača. Međutim, da bi se izbegao zero-missing fenomen, uključenje bi trebalo izvršiti u trenutku maksimalne vrednosti napona, dok se za ograničavanje sklopnih prenapona preporučuje suprotan princip, odnosno uključenje pri nultoj vrednosti napona. U praksi se ipak najčešće primenjuje uključenje pri nultom naponu, jer je ograničavanje sklopnih prenapona prioritetnije sa aspekta EES-a od smanjenja rizika od zero-missing fenomena. Tada se struja kroz prekidač kompenzovanog kabla (slika 1) nakon energizacije može predstaviti kao:

$$I_{CB1}(t) = I_{SR}(t) + I_{CABLE}(t) = \underbrace{I_{SR,DC}(t)}_{\text{DC komponenta}} + \underbrace{\left(I_{SR,AC}(t) + I_{CABLE}(t)\right)}_{\text{AC komponenta}} \quad (1)$$

$$I_{SR,AC}(t) = -K_{Sh} \cdot I_{CABLE}(t) \quad (2)$$

Gde je:

I_{CB1} – ukupna struja kroz prekidač;
I_{SR} – ukupna struja kompenzacione prigušnice;
$I_{SR,AC}$ – naizmenična komponenta struje kompenzacione prigušnice;
$I_{SR,DC}$ – jednosmerna komponenta struje kompenzacione prigušnice;
I_{CABLE} – struja kabla;
K_{Sh} – stepen kompenzacije kabla.

U jednačini (1), radi pojednostavljenja, pretpostavlja se da je kabl idealan kondenzator i da je otpornost kompenzacione prigušnice zanemarljiva za naizmeničnu komponentu (ove pojednostavljenja imaju zanemarljiv uticaj). Kao što je prikazano u jednačini (2), naizmenična komponenta struje prigušnice ima suprotan fazni stav u odnosu na struju punjenja kabla. Zbog toga se u jednačini (1) naizmenična komponenta struje prigušnice delimično (ili potpuno, ukoliko je stepen kompenzacije 100%) poništava strujom punjenja kabla. Kada je stepen kompenzacije veći od 50%, naizmenična komponenta u jednačini (1) može postati manja od jednosmerne komponente, tako da struja ne prolazi kroz nulu sve dok se jednosmerna komponenta dovoljno ne priguši.

Na osnovu toga može se zaključiti da do pojave zero-missing fenomena može doći ukoliko su ispunjena dva kriterijuma: (1) istovremena energizacija kompenzacione prigušnice i kabla, i (2) stepen kompenzacije veći od 50% ($K_{Sh} > 50\%$).

3 POSLEDICE ZERO-MISSING FENOMENA

Zero-missing fenomen sam po sebi ne predstavlja problem ukoliko nakon energizacije nije potrebno izvršiti isključenje prekidača pre nego što sistem dostigne ustaljeno stanje. U slučaju uključenja prekidača tokom trofaznog kvara na kablu, zero-missing fenomen takođe ne predstavlja značajan rizik, jer je amplituda naizmenične komponente struje kratkog spoja dominantna u odnosu na jednosmernu komponentu, što obezbeđuje redovan prolazak struje kroz nulu. U takvim uslovima prekidač se može bezbedno isključiti i prekinuti struju kvara.

Međutim, kod nesimetričnih kvarova, kao što su jednofazni kvar, dvofazni kvar ili dvofazni kvar sa zemljom, moguće je isključiti prekidač samo u fazama pogođenim kvarom, dok prekidanje struje u zdravim fazama može biti onemogućeno, jer u njima struja možda neće ostvariti prolazak kroz nulu u toku nekoliko narednih perioda. U tim uslovima luk u prekidaču traje duže, ukupno vreme prekidanja struje se produžava što povećava termičko i dinamičko opterećenje opreme, a selektivnost zaštite može biti narušena. Takođe, usled predugog trajanja luka u prekidaču, on može biti izložen opterećenju koje prevazilazi njegove projektovane mogućnosti što može dovesti do njegovog delimičnog ili potpunog oštećenja.

Intenzitet i trajanje zero-missing fenomena zavise od više parametara, a pre svega:

- dužine i kapacitivnosti kablovskog voda;
- stepena kompenzacije voda;
- tipa i lokacije kvara;
- strategija uključenja.

Razumevanje međusobnog delovanja ovih faktora ključno je za pravilno modelovanje i predviđanje ponašanja sistema u uslovima kvara, kao i za pouzdan rad sistema relejne zaštite.

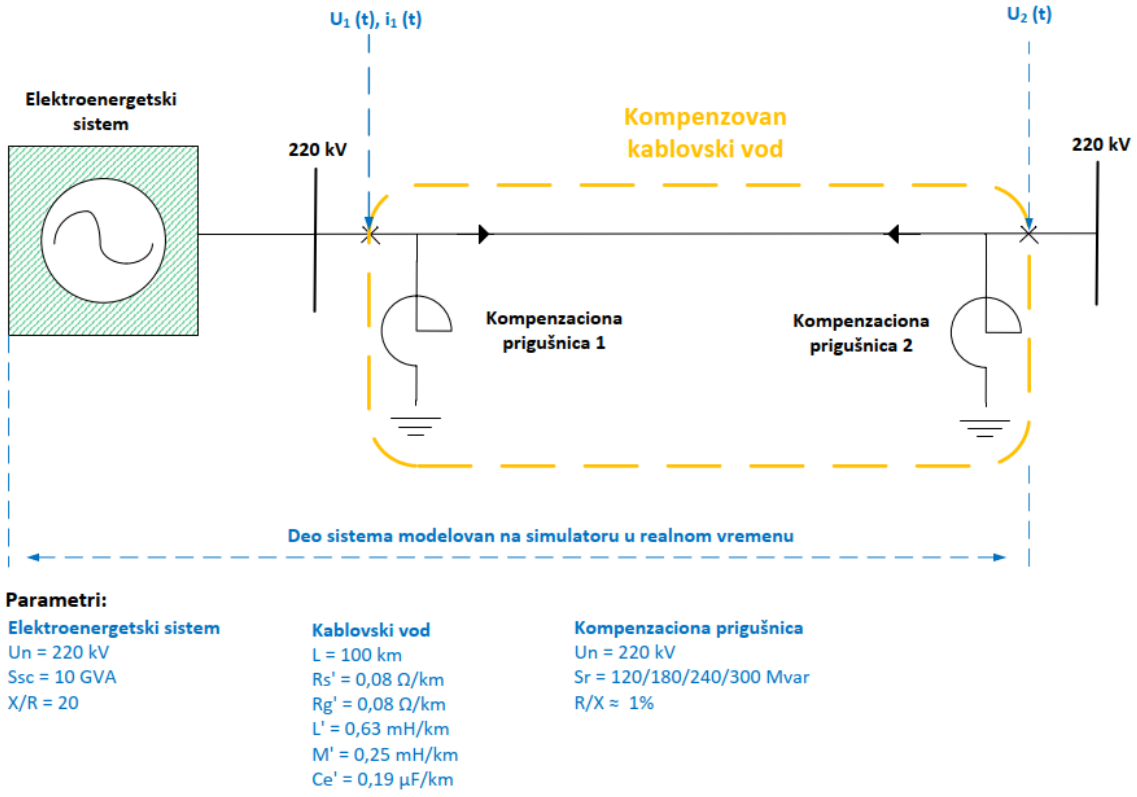
4 SIMULACIONI MODEL

U cilju praćenja prelaznih procesa i dinamičkih pojava tokom uključenja kompenzovanog kablovskog voda razvijen je model na simulatoru u realnom vremenu, odnosno HIL (Hardware in the Loop) platformi. Ovakav pristup omogućava visok stepen vernosti simulacije, jer se numerički model izvršava na specijalizovanom računarskom hardveru koji omogućava vremenski determinističko ponašanje, što je ključno za analizu brzih elektromagnetskih tranzijenata.

Primena HIL modela omogućava:

- posmatranje talasnih oblika struja i napona u realnom vremenu;
- analizu uslova pod kojima dolazi do pojave zero-missing fenomena;
- procenu posledica ovog fenomena na rad prekidača i ukupno vreme isključenje usled delovanja zaštite.

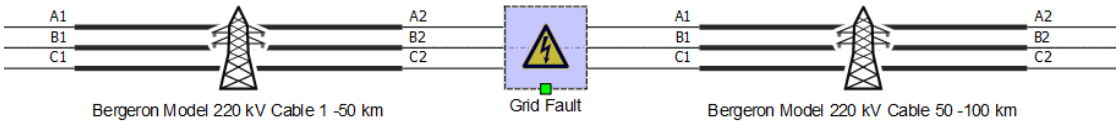
Model obuhvata 220 kV kompenzovani kablovski vod dužine 100 km, sistem kompenzacije u vidu kompenzacionih prigušnica na krajevima voda, kao i deo ostatka mreže koji predstavlja nadređeni elektroenergetski sistem (slika 4). Ovakva konfiguracija odgovara realnim uslovima u prenosnim vodovima vetroparkova na moru, gde se kablovski vodovi velikih dužina kombinuju sa induktivnom kompenzacijom.



Slika 4 – Blok dijagram modela 220 kV kompenzovanog kablovskog voda

U okviru razvijenog simulacionog modela korišćen je standardni bibliotečki element „Three Phase Bergeron Model“, zasnovan na teoriji voda sa raspodeljenim parametrima. Za razliku od koncentrisanih modela, Bergeronov model uzima u obzir prostiranje elektromagnetskih talasa

duž voda, karakterističnu impedansu i vreme propagacije talasa, čime omogućava vernije prikazivanje brzih prelaznih pojava. Kablovski vod je podeljen na dve jednake deonice (slika 5), pri čemu je svaka deonica modelovana kao zaseban trofazni vod sa raspodeljenim parametrima. Ovakva segmentacija omogućava formiranje različitih vrsta kvarova tokom procesa uključenja kabla.



Slika 5 – Model 220 kV kablovskog voda

HIL platforma omogućava simulacije u realnom vremenu sa korakom od 2 μs, što obezbeđuje dovoljno visoku vremensku rezoluciju za hvatanje brzih elektromagnetskih procesa u kablovskom sistemu. Model se izvršava korišćenjem exact diskretizacione metode.

5 ISPITIVANJE I REZULTATI

Ispitivanja na simulacionom modelu su izvršena sa ciljem analize trajanja zero-missing fenomena tokom uključenja kompenzovanog kablovskog voda, u zavisnosti od sledećih faktora:

- stepena kompenzacije kabla;
- lokacije kompenzacione prigušnice (na jednom ili oba kraja voda);
- tipa kvara prisutnog na kablu.

Na osnovu podataka o kablu (slika 4) ukupna kapacitivnost modelovanog kablovskog voda određena je izrazom:

$$C_{uk} = C' \cdot L \tag{3}$$

Dok njegova ukupna reaktivna snaga u praznom hodu iznosi:

$$Q_C = \omega \cdot C_{uk} \cdot {U_n}^2 \tag{4}$$

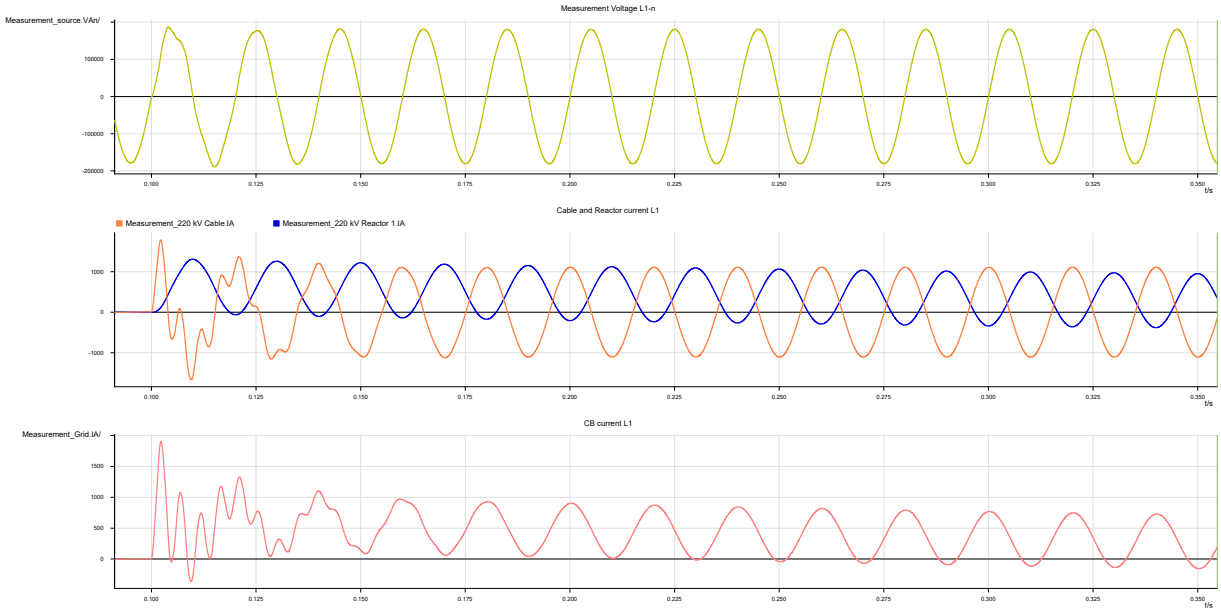
$$Q_C \approx 300\ Mvar$$

Uzimajući u obzir ukupnu reaktivnu snagu kablovskog voda od 300 Mvar, forminarno je nekoliko ispitnih scenarija, definisanih stepenom kompenzacije i položajem prigušnica. Za svaki scenario simulirano je uključenje prekidača u sledećim uslovima:

- bez kvara na kablu;
- sa jednofaznim kratkim spojem faze L2 sa zemljom (L2-E);
- sa međufaznim kratkim spojem faza L2-L3.

Radi obezbeđivanja međusobne uporedivosti rezultata, sva uključenja prekidača izvršena su u trenutku prolaska napona faze L1 kroz nultu vrednost. Zbog toga je za analizu zero-missing fenomena najrelevantnija struja faze L1 koja protiče kroz prekidač, jer se u njoj efekat najjasnije ispoljava.

Analizom talasnih oblika sa jednog od preuzetih oscilografskih zapisa (slika 6) tokom uključenja voda bez kvara (kompenzovan 60%, prigušnicom na njegovom početku) potvrđeno je uključenje prekidača prilikom prolaska napona mreže kroz nulu. Uočava se suprotan fazni stav između kapacitivne struje kabla i induktivne struje prigušnice. Kao posledica visokog stepena kompenzacije (60%) i prisustva jednosmerne komponente struje prigušnice rezultujuća struja faze L1 dostiže nultu vrednost tek 129 ms nakon uključenja prekidača.



Slika 6 – Talasni oblici faze L1: napon mreže (prvi grafik), struja prigušnice i kablovskog voda (drugi grafik) i rezultujuća struja prekidača (treći grafik)

5.1 Uključenje voda bez kvara

Na osnovu simulacija na modelu izmerene su vrednosti trajanja odsustva prirodnog prolaska struje prekidača kroz nulu (tabela I), pri čemu je trenutak uključenja uzet kao referentni.

Tabela I – Rezultati trajanja zero-missing fenomena u fazi L1 prilikom uključenja bez prisutnog kvara

Kompenzacija 220 kV kablovskog voda			Vreme izostanka prolaska kroz nulu bez prisustva kvara [ms]
Na početku [Mvar]	Na kraju [Mvar]	Kompenzacija [%]	
120	0	40	4,2
0	120	40	4,2
180	0	60	129,6
0	180	60	48,9
240	0	80	429,9
0	240	80	108,5
120	120	80	309,5
300	0	100	974,6
0	300	100	194,3

Dobijeni rezultati pokazuju da se zero-missing fenomen manifestuje već pri kompenzaciji od 60%, a da se njegovo trajanje značajno menja u zavisnosti od položaja kompenzacione prigušnice. Kada je prigušnica postavljena na udaljenom kraju voda, odnosno kada je kompenzacija simetrično raspodeljena na oba kraja, redukuje se trajanje odsustva prirodnog prolaska struje kroz nulu, u odnosu na konfiguraciju sa prigušnicom postavljenom isključivo na početku voda.

5.2 Uključenje voda sa kvarom

U scenarijima sa prisutnim kvarom, nakon uključenja prekidača, zaštita detektuje kvar i izdaje nalog za njegovo otvaranje. Sistem zaštite voda podešen je na trenutno delovanje pri kvarovima na samom vodu. Prema kataloškim podacima zaštitnog uređaja i prekidača, ukupno vreme od detekcije kvara do mehaničkog razdvajanja kontakata prekidača iznosi približno 55 ms.

Na osnovu simulacija na modelu izmerena su vremena prekidanja struje u fazi bez kvara (L1) u odnosu na referentni trenutak, odnosno momenat uključenja prekidača, i prikazana u tabeli II.

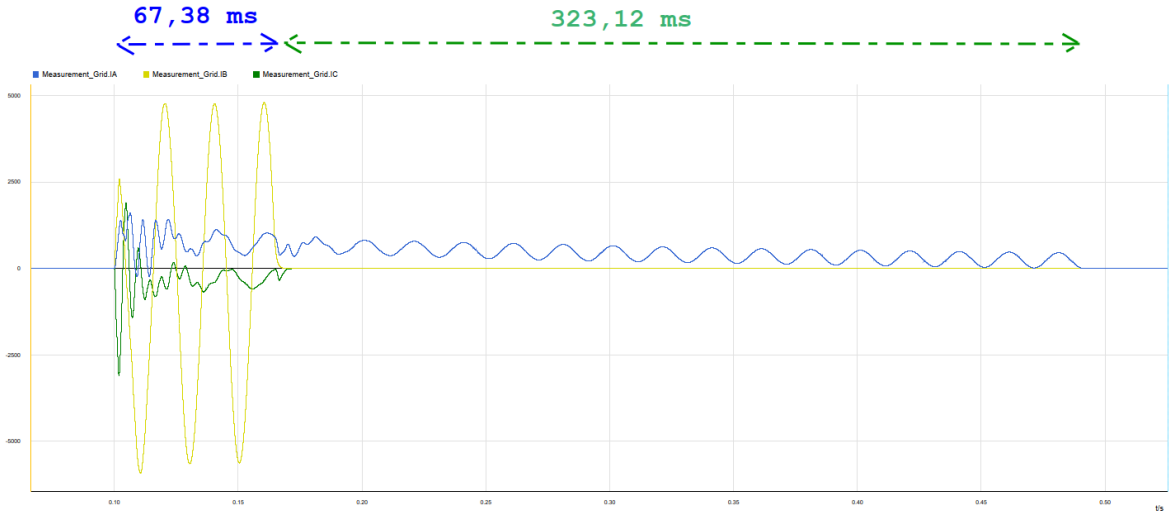
Tabela II – Vreme prekidanja struje u fazi L1 prilikom uključenja voda sa prisutnim kvarom

Kompenzacija 220 kV kablovskog voda			Vreme prekidanja struje pri kvaru na vodu	
Na početku [Mvar]	Na kraju [Mvar]	Kompenzacija [%]	L2-E [ms]	L2-L3 [ms]
120	0	40	65,6	66,6
0	120	40	65,3	65,6
180	0	60	65,8	68,6
0	180	60	65,4	66,2
240	0	80	389,9	390,0
0	240	80	65,5	67,9
120	120	80	65,9	269,1
300	0	100	834,4	835,2
0	300	100	65,6	112,5

Analizom oscilografskih zapisa uočeno je da u pojedinim scenarijima dolazi do kaskadnog prekidanja struje u fazi L1 u odnosu na fazu ili faze pogođene kvarom. Ova pojava javlja se kao posledica zero-missing fenomena i predstavlja dodatno kašnjenje prekidanja struje u zdravoj fazi u odnosu na fazu sa kvarom.

Na slici 7 prikazani su talasni oblici struja uključenja kablovskog voda sa kvarom L2-E (kompenzovan 80%, prigušnicom na početku voda). Uočljivo je kašnjenje prekidanja struja faze L1 od 323 ms usled izostanka njenog prirodnog prolaska kroz nulu. Ista pojava uočena je:

- Pri 80% kompenzacije na početku voda u trajanju od 331,2 ms (kvar L2-L3)
- Pri raspodeljenoj kompenzaciji od po 40% na početku i kraju voda u trajanju od 211,9 ms (kvar L2-L3)
- Pri 100% kompenzacije na početku voda u trajanju od 777,8 ms (kvar L2-E) i 775,7 ms (kvar L2-L3)
- Pri 100% kompenzacije na kraju voda u trajanju od 53,4 ms (kvar L2-L3)



Slika 7 – Talasni oblici struja uključenja voda sa kvarom L2-E, 80 % kompenzacije na početku voda

Produženo vreme prekidanja struje u zdravim fazama dovodi do pojave izraženih nesimetričnih struja u mreži, što može rezultirati neselektivnom proradom udaljenih zaštita zasnovanih na merenju nulte komponente sa posledicom neselektivnog isključenja susednih vodova ili transformatora. Takođe, ukoliko prekidač u predviđenom vremenskom roku ne prekine struju u fazi pogođenoj ovom pojavom, logika zaštitnih uređaja može pogrešno detektovati otkaz prekidača, što za posledicu ima isključenje svih nadređenih prekidača.

Ukupno trajanje luka u komori prekidača računa se od trenutka mehaničkog razdvajanja kontakata do prvog prolaska struje kroz nulu, odnosno:

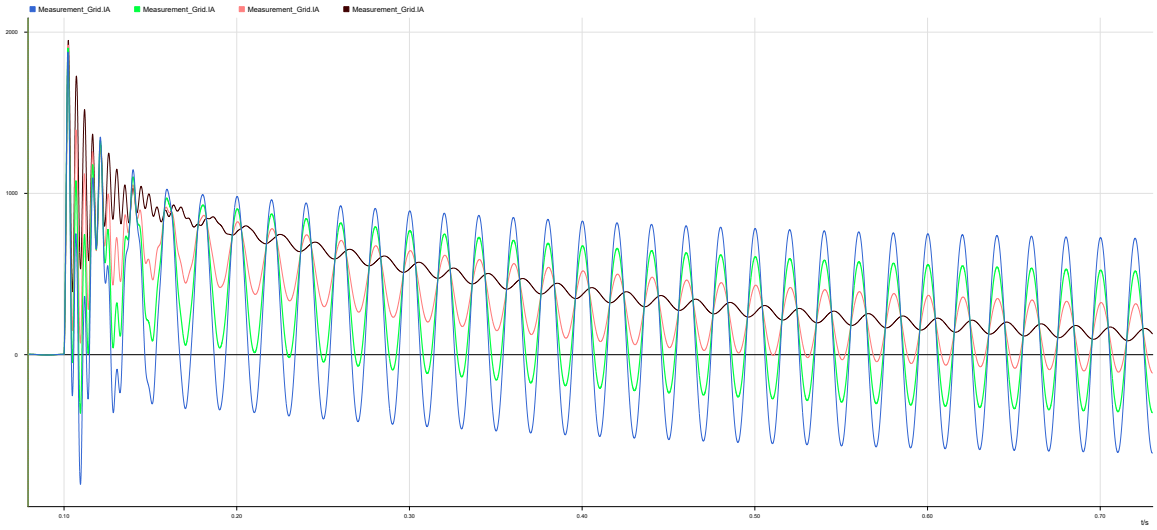
$$t_{arc} = t_{zero\ miss} - t_{opening} \tag{5}$$

Gde je:

t_{arc} – trajanje luka u komori prekidača;
$t_{zero\ miss}$ – trenutak prvog prolaska struje kroz nulu;
$t_{opening}$ – ukupno vreme mehaničkog razdvajanja kontakata prekidača.

Standard IEC 62271-100 ne definiše maksimalno dozvoljeno trajanje luka u prekidaču, već nazivno prekidno vreme, dok tipski test modelovanog SF6 prekidača deklariše maksimalno vreme trajanja luka od 38 ms. Na osnovu toga možemo zaključiti da svako izmereno vreme trajanja zero-missinga duže od ~100 ms (zbirno vreme delovanja zaštite, mehaničkog odvajanja kontakata i dozvoljenog trajanja luka) dovodi do trajanja luka izvan projektovanog opsega prekidača. Vremena luka veća od desetostruke nazivne vrednosti (~400 ms) izazivaju ekstremna termička naprezanja kontakata i mlaznica usled naglog zagrevanja SF6 gasa i porasta pritiska praćenih erozijom kontakata i značajno povećavaju rizik od potpunog oštećenja prekidača.

Na slici 8 prikazana je uporedna analiza struje prekidača u fazi L1 za različite stepene kompenzacije pri uključenju voda u prazan hod. Jasno se uočava da porast stepena kompenzacije direktno utiče na produženje trajanja zero-missing fenomena.



Slika 8 – Talasni oblik struj uključenju voda u prazan hod za različite stepene kompenzacije: 40 % (plava boja), 60 % (zelena boja), 80 % (crvena boja) i 100 % (crna boja)

6 ZAKLJUČAK

Sprovedena ispitivanja na simulatoru u realnom vremenu potvrdila su mogućnost nastanka zero-missing fenomena u uslovima uključenja kablovskih vodova sa kompenzacionim prigušnicama. Rezultati simulacija ukazali su na značajan uticaj lokacije i stepena kompenzacije na trajanje ovog fenomena, koje je u ekstremnim slučajevima dostiglo vrednosti reda nekoliko stotina milisekundi. Uopšteno, povećanje stepena kompenzacije, naročito kada je prigušnica postavljena na početku kablovskog voda (što je najčešće rešenje kod vetroparkova na moru), dovodi do povećanja verovatnoće pojave zero-missing fenomena, kao i do produženja njegovog trajanja. Značajni rizici javljaju se pri stepenima kompenzacije iznad približno 50%, što je u skladu sa dostupnom literaturom.

Prilikom uključenja kablovskog voda sa prisutnim nesimetričnim kvarom, u pojedinim scenarijima zabeleženo je značajno odlaganje prekidanja struje u zdravim fazama, što može dovesti do neselektivnog delovanja zaštitnih uređaja baziranih na merenju nulte struje, kao i do lažne detekcije otkaza prekidača. Dodatno, produženo trajanje luka u prekidaču može premašiti projektovane granice, predstavljajući ozbiljan rizik od degradacije ili trajnog oštećenja.

Imajući u vidu sve veću primenu dugih visokonaponskih kablovskih vodova, primena strategija za ograničavanje zero-missing fenomena postaje neophodna već u fazi projektovanja sistema. Aktuelne mere za njegovo ublažavanje obuhvataju:

- optimizaciju stepena kompenzacije;
- upotrebu kompenzacionih prigušnica sa zasebnim prekidačem;
- odloženo isključenje faza koje nisu pogođene kvarom;
- primenu kontrolisanog uključenja prekidača (Point on Wave) radi izbegavanja energizacije pri nepovoljnim faznim uglovima.

Dalji rad autora biće usmeren na razvoj i eksperimentalnu validaciju strategija kontrolisanog uključenja, sa posebnim fokusom na njihov uticaj na eliminaciju zero-missing fenomena u kompenzovanim kablovskim sistemima.

LITERATURA

[1] P. Thanh Chung and T. Van Top, „Analysis of the Zero-Missing Phenomenon on Mixed Overhead-Underground Cables in 220 kV Transmission Lines ”, *JST: Smart Systems and Devices*, Volume 35, Issue 2, May 2025, 043-053

[2] H. Khalilnezhad, M. Popov, L. van der Sluis and J. A. Bos, „Countermeasures of Zero-Missing Phenomenon in (E)HV Cable Systems“, *IEEE Transactions on Power Delivery,* Volume 33, Issue: 4, August 2018, 1657-1667

[3] A. Linnet, „Eliminating zero-missing phenomenon in long, high voltage, underground cables“, Degree Project in Electrical Engineering, KTH Royal Institute of Technology School of Electrical Engineering and Computer Science, Stockholm 2019

[4] F. F. da Silva, C. L. Bak, U. S. Gudmundsdottir, W. Wiechowski, M. R. Knardrupgard, „Methods to Minimize Zero-Missing Phenomenon“, *IEEE Transactions on Power Delivery,* Volume 25, Issue: 4, October 2010, 2923 - 2930