Broj rada: R2-06
DOI:10.46793/CIRED2026.R2-06_199

MERE ZA UBLAŽAVANJE UTICAJA FERO REZONANSE NA INDUKTIVNE NAPONSKE TRANSFORMATORE

MEASURES FOR SUPPRESSION OF FERRORESONANCE EFFECT ON INDUCTIVE VOLTAGE TRANSFORMERS

Irena CVETIĆ, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Srbija
Jelisaveta KRSTIVOJEVIĆ, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Kvalitet električne energije i stabilnost sistema jedni su od primarnih aspekata u elektroenergetskim sistemima. Različite pojave mogu negativno uticati na ove karakteristike elektroenergetskog sistema. Jedna od njih je i pojava ferorezonanse, kao nelinearnog oblika rezonantne pojave. U mreži koja sadrži nelinearne elemente promenom režima rada menja se i sopstvena učestanost kola. Nelinearni element je najčešće induktivitet sa gvozdenim jezgrom te odatle i naziv ferorezonansa. Posledice pojave ferorezonanse mogu biti ozbiljne za mrežu u kojoj se javljaju, jer dovode do pojava visokih vrednosti napona i struje, prenapona, povećanog zagrevanja, viših harmonika; ugrožavanja kvaliteta napona i generalno nestabilnosti elektroenergetskog sistema. Po tipu konstrukcije i naponskom nivou na kojem se koriste samim tim i principu rada, naponske transformatore delimo na induktivne i kapacitivne. Induktivni naponski transformatori pogodni su za niski i srednji naponski nivo, dok su za više naponske nivoe prikladniji kapacitivni naponski trasnformatori. Zbog postojanja magnetnog jezgra i izraženog induktivnog karaktera, naponski transformatori predstavljaju jedan od delikatnijih elemenata. S obzirom na to da ferorezonansa može imati destruktivne efekte na naponske transformatore, neophodno je primeniti adekvatne mere zaštite. Kapacitivni naponski transformatori svojom konstrukcijom redne veze kondenzatora i prigušnice prave preduslov za stvaranje feroreznoanse pa se zaštita po pravilu integriše. Dok se kod induktivnih naponskih transformatora ferorezonansa javlja kao posledica određenih operacija i pojava u mreži, a mere zaštite se mogu realizovati na više načina. U praksi se primenjuju brojna rešenja za zaštitu naponskih transformatora, međutim nisu sva podjednako delotvorna niti imaju isti efekat u različitim tipovima mreže. U ovom radu će biti analiziran efekat i mere za smanjenje uticaja ferorezonanse na induktivne naponske transformatore u srednjenaponskoj distributivnoj mreži. U programskom alatu EMTP/ATP biće izmodelovana srednjenaponska mreža u kojoj će biti simulirane stadardne operacije neizbežne za funkcionisanje sistema, a koje dovode do pojave ferorezonanse. Zatim će na istom modelu biti ispitana primena mera za umanjenje uticaja ferorezonanse kroz sagledavanje tranzijentnih pojava izazvanih njihovom primenom. Uporedna analiza efekata primene različitih mera pružiće prikaz njihove efikasnosti, kao i da li je njihovom primenom moguće smanjiti ili potpuno eliminisati negativne efekte ferorezonanse na naponske transformatore.

Ključne reči: ferorezonansa, induktivni naponski transformator, tranzijentne pojave, prenaponi

* Irena Cvetić inflowers4@gmail.com; Jelisaveta Krstivojević j.krstivojevic@etf.rs

ABSTRACT

Power quality and system stability are one of the primary aspects in power systems. Various phenomena can negatively affect the characteristics of the power system. One of them is the occurrence of ferroresonance, as a non-linear form of resonant phenomenon. In a network that contains non-linear elements, changing the operating mode also changes the circuit's own frequency. The non-linear element is most often an inductance with an iron core, hence the name ferroresonance. The consequences of the occurrence of ferroresonance can be serious for the network in which they occur, because they lead to the occurrence of high values of voltage and current, overvoltage, increased heating, higher harmonics; jeopardizing power quality and general instability of the power system. According to the type of construction and the voltage level at which they are used and therefore the principle of operation, voltage transformers can be divided into inductive and capacitive. Inductive voltage transformers are suitable for low and medium voltage levels, while capacitive voltage transformers are more suitable for higher voltage levels. Due to the existence of a magnetic core and their inductive character, voltage transformers represent one of the delicate equipment in the power system. Given that ferroresonance can have destructive effects on voltage transformers, it is necessary to apply adequate protection measures. Capacitive voltage transformers, with their construction form of series connection of capacitors and inductor, create a prerequisite for the occurance of ferroresonance, so the protection elements are usually integrated. While with inductive voltage transformers, ferroresonance occurs as a consequence of certain operations and phenomena in the network, and protection measures can be implemented in several ways. In practice, numerous solutions are applied to protect voltage transformers, however, they are not all equally effective or have the same effect in different types of networks. This paper will analyze the effect and measures to reduce the influence of ferroresonance on inductive voltage transformers in the medium voltage distribution network. In the EMTP/ATP software, a medium voltage network will be modeled in which the standard operations inevitable for the functioning of the system, which lead to the occurrence of ferroresonance, will be simulated. Then, on the same model, the application of measures to suppress the influence of ferroresonance will be examined through the observation of transient phenomena caused by their application. A comparative analysis of the effects of the application of various measures will provide an overview of their effectiveness, as well as whether their use can reduce or completely eliminate the negative effects of ferroresonance on voltage transformers.

Keywords: ferroresonance, inductive voltage transformers, transients, overvoltage

UVOD

Ferorezonansa u elektroenergetskim sistemima predstavlja složen nelinearni fenomen koji se javlja u kolima sa induktivnim i kapacitivnim elementima, kako u prenosnim tako i u distributivnim sistemima. Najčešće nastaje nakon prolaznih poremećaja, poput tranzijentnih prenapona ili privremenih kvarova, kao i tokom sklopnih operacija, pri čemu se odlikuje održivim povišenim vrednostima napona i struje uz značajna izobličenja talasnih oblika [1]. Dosadašnja istraživanja obuhvatila su različite pristupe – od analize uticaja linearnog i nelinearnog gubitka jezgra na pojavu ferorezonanse [2], preko simulacija i metoda suzbijanja u naponskim transformatorima [3], pa do detaljnih studija mogućnosti nastanka fenomena u izolovanim mrežama [4]. Ipak, predikcija pojave ferorezonanse kod induktivnih naponskih mernih transformatora (INT) ostaje izazovna jer zavisi od niza faktora poput konfiguracije mreže, karakteristike magnećenja jezgra, rezidualnog fluksa i trenutka uključenja.

U savremenim elektroenergetskim sistemima, rizik od pojave ferorezonanse dodatno je naglašen zbog sve veće upotrebe podzemnih kablova koji imaju veliku kapacitivnost i integracije obnovljivih izvora energije [5]. Ovi trendovi čine mrežu kompleksnijom, gde su određeni kvarovi, poput ferorezonantnih oscilacija, suštinski teški za identifikaciju standardnim zaštitnim uređajima [6]. Strategije za suzbijanje ovog fenomena dele se na pasivne metode, koje ciljaju na projektovanje postrojenja tako da se minimizuje mogućnost nastanka fenomena, i aktivne mere koje podrazumevaju upotrebu uređaja za prigušenje, najčešće otpornika u sekundarnim kolima ili zvezdištu transformatora [7]. Primena kombinovanih mera često pruža najekonomičnije rešenje za očuvanje integriteta izolacije i pouzdanosti mreže.

Poseban aspekt problema predstavlja uticaj ferorezonanse na kvalitet električne energije i tačnost mernih transformatora. Visok nivo harmonijskog izobličenja napona direktno kompromituje rad mernih uređaja koji se oslanjaju na sekundarne signale mernih transformatora [7]. Budući da preciznost konvencionalnih transformatora na frekvencijama višim od nazivne često nije garantovana, ferorezonantna stanja mogu dovesti do nepredviđenih grešaka u merenju i dijagnostici.

Glavna motivacija za analizu koja je sprovedena u ovom radu, proističe iz činjenice da je ferorezonansa fenomen koji je nemoguće u potpunosti eliminisati iz elektroenergetskog sistema, zbog čega se fokus mora usmeriti na metode njegovog efikasnog suzbijanja. Uprkos dugoj istoriji proučavanja, nelinearna priroda ovog fenomena i dalje ostavlja značajan prostor za istraživanje, naročito u pogledu predvidivosti odziva sistema na različite poremećaje. Fokus će dakle u ovom radu biti upoređivanje i analiza efikasnosti i delotvornosti pojedinih metoda za suzbijanje ferorezonanse, kao i osvrt na uticaj koji ima trenutak uključenja prekidača na karakter ferorezonantnog procesa.

U okviru ovog rada, u softverskom paketu EMTP/ATP modelovana je trofazna srednjenaponska mreža naponskog nivoa 20 kV. Težište rada je na simulaciji procesa priključenja induktivnih naponskih transformatora na mrežu, što predstavlja jedan od najčešćih operativnih "okidača" za iniciranje ferorezonanse. Analiza obuhvata ispitivanje odziva kod tri različita modela za aktivno suzbijanje ovog fenomena, sa ciljem da se utvrdi njihova pojedinačna efektivnost i brzina prigušenja nepoželjnih oscilacija. Kroz sistematičnu promenu vremena uključenja prekidača, rad će ispratiti kako i ovaj parametar modifikuje odziv sistema u svakom od posmatranih slučajeva, pružajući uporedni prikaz efikasnosti primenjenih metoda prigušenja.

1 TEORIJSKI OSVRT

1.1 Ferorezonansa

Razlikujemo dva tipa rezonanse: linearna rezonansa u električnom kolu sa konstantnim parametrima podrazumeva režim pri kome je prinudna učestanost izvora bliska sopstvenoj učestanosti kola; dok nelinearna rezonansa podrazumeva pojavu da se u kolu sa nelinearnim parametrima, promenom režima menja sopstvena učestanost kola. U energetskim sistemima je nelinearni parametar najčešće induktivnost sa gvozdenim jezgrom, pa se iz tog razloga ova pojava naziva „fero“- rezonansa. Ferorezonansa se definiše kao posebna vrsta rezonantnog procesa u kojem učestvuje nelinearna induktivnost, najčešće induktivnost transformatora sa

feromagnetnim jezgrom, u kombinaciji sa kapacitivnim elementima mreže [1]. Karakterišu je visoke vrednosti napona (prenapona) i nepravilni odzivi električnih signala .

U trofaznim mrežama sa jednopolno izolovanim induktivnim naponskim transformatorima, energija oscilacija se prenosi između faza, što dodatno komplikuje dinamiku procesa. Pojava stacionarnih oscilacija zavisi od odnosa kapaciteta prema zemlji i gubitaka u kolu – veći kapaciteti mogu dovesti do samoprigušenja, dok manji omogućavaju dugotrajno održavanje oscilacija.

Ferorezonantni odzivi se mogu klasifikovati kao četiri glavna tipa odziva koji se razlikuju po karakteristikama talasnih oblika i spektralnom sadržaju [5]. Razlikuju se: periodične oscilacije na osnovnoj frekvenciji (ustaljeni, nesinusoidalni signali nakon prelaznog procesa), subharmonične oscilacije (dominacija podumnožaka osnovne frekvencije sa dužim periodom), kvaziperiodične oscilacije (složene oscilacije sa dominantnim višim harmonicima i interharmonicima) ili haotični režimi (širokopojasni spektar sa nasumičnim ponašanjem bez jasnog obrasca).

Najčešći uzrok ferorezonanse u mreži, mogu biti sledeće pojave [5]:

- Nepotpuno napajanje transformatora - kada se transformator slučajno uključi pod napon preko samo jedne ili dve faze (umesto sve tri);
- Rad sa kapacitivnim opterećenjem - Napajanje transformatora koji je povezan sa kapacitivnim opterećenjem usled otvaranja/zatvaranja nekog prekidača u mreži;
- Serijska kompenzacija - Povezivanje transformatora na prenosni vod koji ima serijsku kompenzaciju (kondenzatore za smanjenje padova napona);
- Izolovana neutralna tačka -Transformator povezan na distributivni sistem koji ima izolovanu neutralnu tačku (nulu);
- Kapacitivni naponski transformatori (KNT) - Kada je merni transformator povezan na neaktivni vod koji se nalazi paralelno sa drugim vodom pod naponom ili kablom male snage kratkog spoja.

1.2 Induktivni naponski transformatori

INT zauzimaju posebno mesto u proučavanju ferorezonanse jer rade u režimima bliskim praznom hodu, pri čemu se njihova nelinearna karakteristika magnećenja lako dovodi u interakciju sa kapacitivnim elementima mreže.

Dosadašnja istraživanja pokazala su da se ferorezonantne oscilacije u INT-u mogu ublažiti uvođenjem prigušnih kola na sekundarnoj strani. Najčešće se koriste otpornici kao metode prigušenja efekata ferorezonanse a vezuju se ili u otvorenom trouglu sekundara ili na svaki od sekundara monofaznih INT-a. Posebno su osetljivi INT-i sa otvorenim trouglom veza otpornika na krajeve jer njegova stalna primena može izazvati probleme u izolovanim sistemima, naročito tokom dugotrajnog rada pod zemljospojevima [6]. Tada dolazi do visokih prenapona u otvorenom trouglu i značajnog termičkog opterećenja otpornika, što može ugroziti bezbednost. Problem je izraženiji kod savremenih INT-a sa malim gubicima, gde otpornik mora imati vrlo nisku vrednost.

Savremeni pristupi idu korak dalje i predlažu selektivno uključivanje otpornika samo u trenutku pojave ferorezonanse, čime se izbegava termičko opterećenje u normalnim uslovima rada. Ovakva rešenja zahtevaju pouzdane sisteme detekcije, a istraživanja se kreću u četiri glavna

pravca: analiza zasićenja jezgra, analiza prenapona, identifikacija karakterističnih talasnih oblika i slično.

1.3 Mere za ublažavanje uticaja ferorezonanse

Za ublažavanje ferorezonanse kod INT-a i njenih posledica primenjuju se dve grupe mera: pasivne, čiji je cilj da spreče samu pojavu (minimizuju mogućnost nastanka), i aktivne koje dozvoljavaju pojavu ferorezonanse, ali je potom brzo prigušuju [4]. S obzirom na to da je u izolovanom sistemu teško predvideti sve prelazne procese i uticaje, pasivni način sprečavanja često nije u potpunosti efikasan niti moguć, pa se prednost daje izboru odgovarajuće opreme i aktivnom prigušenju [2].

Cilj pasivnih mera (prevencija) je modifikacija parametara mreže kako bi se izbegli uslovi za nastanak fenomena [2,4]:

- *Mrežna konfiguracija*: Direktno uzemljenje mreže (preko otpornika ili prigušnice) ili povećanje ukupne kapacitivnosti mreže.
- *Izbor opreme*: Upotreba KNT-a umesto induktivnih, ili izbor INT-a sa otvorenim jezgrom (vazdušnim zazorom).
- *Dizajn transformatora*: Izbor transformatora čije magnetno jezgro radi sa manjom vrednošću indukcije kako prenaponi ne bi izazvali zasićenje.
- *Operativna pravila*: Izbor prekidača koji smanjuju prelazne kapacitete, izbegavanje pobude neopterećenih transformatora, izbegavanje upotrebe osigurača (da se ne izgubi faza) i izbegavanje rada na kablovima pod opterećenjem.

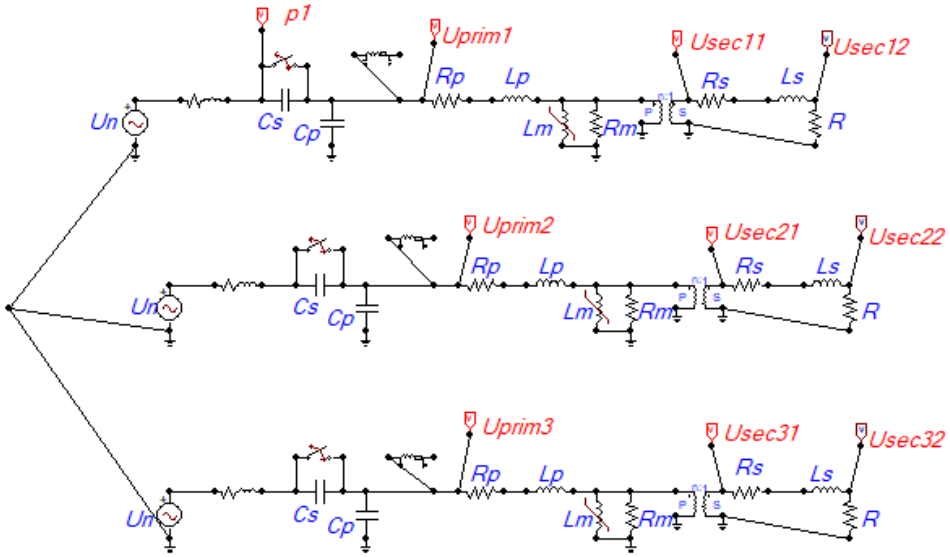
Aktivne mere (prigušenje) se zasnivaju na principu da se energija koja bi dovela do ferorezonance, što pre potroši (disipira) [2]. To se postiže povećanjem rezistivnih gubitaka u nultom sistemu [4,7]:

- *Otpornik u otvorenom trouglu*: Ovo je najčešće korišćeno rešenje jer je jednostavno, ekonomično i pouzdano [4,7]. Otpornik ne troši energiju u normalnom radu (napon na otvorenom trouglu je nula), pa ne utiče na tačnost mernih transformatora sve dok ne dođe do poremećaja [2,7].
- *Otpornici povezani paralelno sekundarnim namotajima*: Primenjuju se ako nema mogućnosti za otvoreni trougao, ali imaju manu jer stvaraju konstantne gubitke i mogu smanjiti tačnost mernih uređaja [7].
- *Otpornik sa prigušnicom povezan paralelno sa sekundarnim namotajima*: Rešenje koje sprečava stalne gubitke tako što prigušnica predstavlja veliku impedansu u normalnom radu, a zasićuje se i "uključuje" otpornik tek kada krene ferorezonanca [7].
- *Priključenje otpornika u zvezdište transformatora* tj između visokonaponskog priključka i zemlje ili u sekundar transformatora u zvezdištu [4] itd.

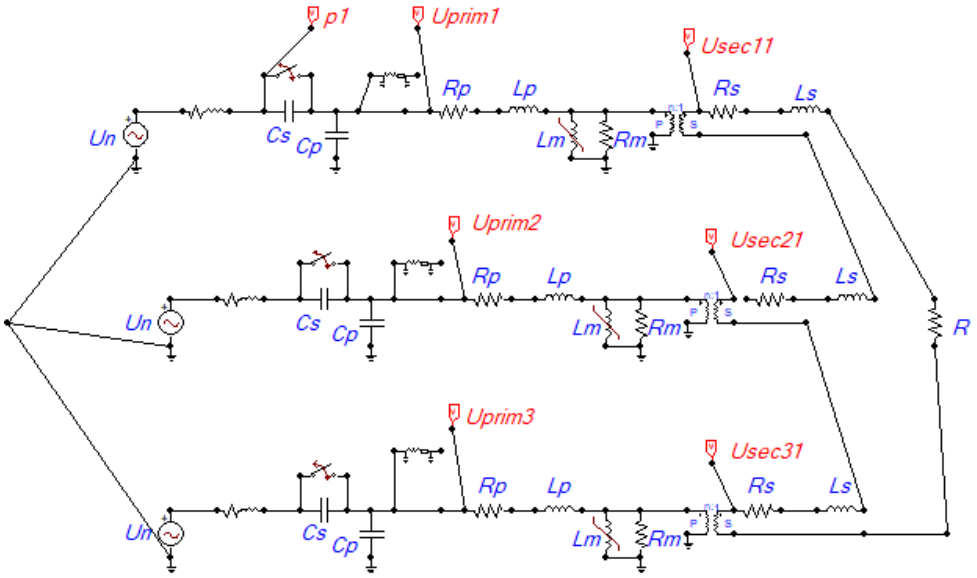
2 MODELI I SIMULACIJE

Za potrebe simulacije formiran je model trofazne elektroenergetske mreže naponskog nivoa 20 kV, 50 Hz u programskom paketu EMTP/ATP. Kao izvor su korišćena tri naponska generatora $Umax = 20$ kV fazno pomerena za 120 ° sa karakterističnom impedansom za 20 kV mrežu. U nastavku je modelovan prekidač sa svojom otočnom i serijskom kapacitivnošću, srednjenaponski kablovski vod koji se nalazi u praznom hodu i INT. U ovom radu biće analizirane dve aktivne mere za suzbijanje uticaja ferorezonanse. Na Slici 1 je prikazana šema za simulaciju primene aktivne mere 1: Otpornici povezani paralelno sekundarnim namotajima

gde je model mernog INT-a sa prenosnim odnosom ($20/\sqrt{3}$ / $0{,}1/\sqrt{3}$) kV, dok je na Slici 2 šema za aktivnu meru 2: Otpornik u otvorenom trouglu, a model mernom INT-a je sa prenosnim odnosom ($20/\sqrt{3}$ / $0{,}1/3$) kV. Kao šema magnetskog jezgra, u modelu je uneta nelinearna induktivnost sa odgovarajućom karakteristikom magnećenja (I, Φ) kako bi se što preciznije reprodukovalo zasićenje.



Slika 1 – Aktivna mera 1: otpornik na krajevima sekundara 3 monofazna INT-a



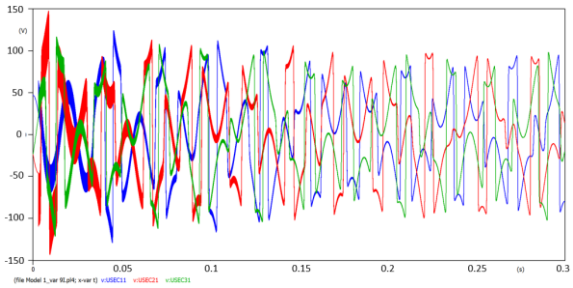
Slika 2 – Aktivna mera 2: otpornik za prigušenje u otvorenom trouglu sekundara INT-a

Za obe aktivne mere simuliran je proces uključenja prekidača, odnosno priključenje voda u praznom hodu, te analizirana pojava ferorezonanse koja se javlja na INT-u, kao posledica ove

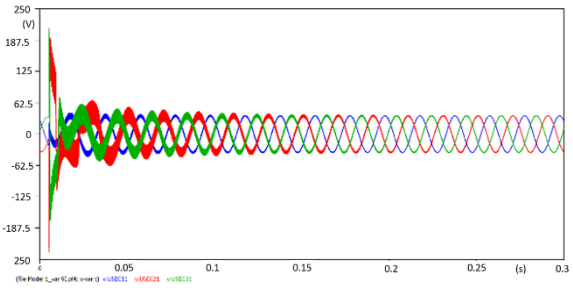
operacije. U momentima uključenja prekidača, vod i INT-i se povezuju na 20 kV distributivnu mrežu. Parametri mreže, mernih transformatora i kabla su nepromenljivi, a vrednost otpora za prigušenje, koji je vezan na svaki sekundar INT-a, je menjana. Otpornosti su varirane u zavisnosti od konkretne aktivne mere i tipa simulacije kojom je nastojano da se postigne, ferorezonantni režim ili prigušeno ferorezonantno stanje. Uticaj trenutka uključenja prekidača analiziran je za različite trenutke uključenja, s obzirom na to da trenutak uključenja utiče na amplitudu, trajanje prelaznog procesa i karakter ferorezonantnog odziva.

3 REZULTATI SIMULACIJA

U nastavku su prikazani rezultati simulacija sprovedenih na modelima koji integrišu aktivne mere za prigušenje ferorezonanse. Primena aktivne mere 1, koja se zasniva na povezivanju otpornika na krajeve sekundarnih namotaja tri monofazna INT-a, ilustrovana je na Slikama 3 i 4. Na Slici 3, prikazani su naponi na sekundarnoj strani INT-a. Simulacija je izvršena za vrednost otpora $R = 1\ M\Omega$, što približno odgovara režimu kada INT radi sa neopterećenim sekundarom. Na Slici 4 je dat efekat prigušenja ferorezonanse sa vrednošću otpora $R = 30\ \Omega$.

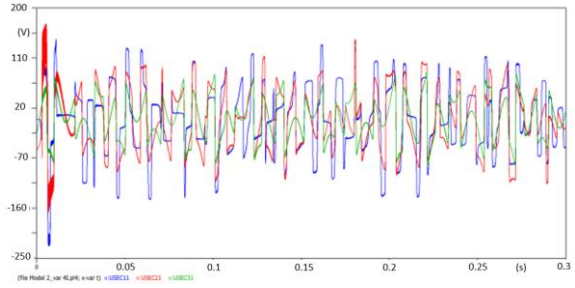


Slika 3 – Ferorezonansa: Napon sekundara INT-a pri uključenju prekidača u 0,005s, R=1MΩ

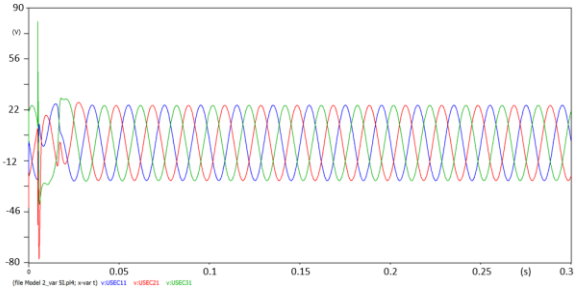


Slika 4 – Prigušenje ferorezonanse: Napon sekundara INT-a pri uključenju prekidača u 0,005s, R=30Ω

Rezultati simulacije primene aktivne mere 2, koja predstavlja povezivanje otpornika u otvorenom trouglu sekundara INT-a, dati su na Slikama 5 i 6. Na Slici 5 vidi se izraženo (haotično) ferorezonantno stanje u simulaciji gde je $R = 1\ M\Omega$, što približno odgovara režimu rada sa otvorenim sekundarom INT-a. Na Slici 6 prikazan je slučaj simulacije za $R = 50\ \Omega$ gde se može uočiti da je ferorezonansa prigušena.



Slika 5 – Ferorezonansa: Napon sekundara INT-a pri uključenje prekidača u 0,005s, R=1MΩ



Slika 6 – Prigušenje ferorezonanse: Napon sekundara INT-a pri uključenju prekidača u 0,005s, R=50 Ω

4 ANALIZA REZULTATA

Na osnovu sprovedenih simulacija, posmatrano je kako to izbor mere prigušenja i trenutak uključenja napona direktno utiču na karakter ferorezonantnog odziva. U okviru analize,

korišćene su različite vrednosti otpora za prigušenje (R), što je bilo neophodno da bi se simulirali najnepovoljniji uslovi rada i precizno sagledalo koliko efikasno različite vrednosti otpora suzbijaju fenomen u svakom od predloženih modela. Rezultati su pokazali da u neadekvatno prigušenim režimima prenaponi dostižu vrednosti koje su nekoliko puta veće od nominalne vrednosti napona kako sa primarne tako i sekundarne strane INT-a, za zadate parametre mreže i ostalih elemenata modela. U Tabeli I, prikazana je poredbena analiza primenjenih mera za kritične vrednosti otpora i različite vrednosti trenutka uključenja prekidača. Odabrani momenti uključenja prekidača su u 0,003 s i u 0,005 s od trenutka pokretanja simulacije.

Tabela I – Prikaz rezultata pre/posle primene analiziranih Aktivnih mera za ublažavanje uticaja ferorezonanse

Mera	Otpornik R [Ω]	Trenutak uključenja [s]	Vreme prigušenja [s]	Status ferorezonanse – [prisutna/prigušena]
Aktivna mera 1	1.000.000	0,003	/	Prisutna
	30	0,003	≈ 0,245	Prigušena
	30	0,005	≈ 0,190	Prigušena
Aktivna mera 2	1.000.000	0,003	/	Prisutna
	50	0,003	≈ 0,017	Prigušena
	50	0,005	≈ 0,020	Prigušena

Aktivna mera 1 (Otpornici na sekundarima monofaznih INT-a): Korišćenjem otpornosti (30 Ω prema tehničkim preporukama [2]) uspešno se prigušuje oscilacija u vremenskom intervalu od 0,190 s do 0,250 s. Tokom analize primene aktivne mere 1, izvršeno je više simulacija gde su varirane vrednosti otpora koja je priključena sa sekundarne strane 1f INT-a kao i trenutak uključenja prekidača odnosno voda u praznom hodu. Rezultati su pokazali da se sa otpornosti iznad 30 Ω sinusoida napona izobličuje i sve više približava haotičnom režimu dok sa vrednostima ispod 30 Ω sinusoida ostaje neizobličena ali napon drastično pada kao posledica preopterećenja INT-a. Trenutak uključenja na envelopi takođe utiče na rezultate, ali pre svega na početnu maksimalnu vrednost napona koja je gotovo duplo veća pri uključenju u 0,005 s u odnosu na uključenje u 0,003 s. Oscilacije faznih vrednosti napona se prigušuju u toku prve dve periode, dok se potpuna simetrija postiže tek posle desetak perioda.

Aktivna mera 2 (Otpornik u otvorenom trouglu sekundara INT-a): Sa ovom merom (sa otpornošću od 50 Ω prema tehničkim preporukama [8]) vreme prigušenja varira od 0,017 do 0,020 s, u zavisnosti od vrednosti trenutka uključenja prekidača. Rezultati primene ove mere takođe zavise od trenutka uključenja prekidača, pa se primećuje značajno povećanje vrednosti faznog napona kada je uključenje u najnepovoljnijem trenutku. Potpuno prigušenje i simetrija odziva postiže se već u toku prve periode. U praksi se ova aktivna mera najčešće primenjuje u svrhu prigušenja efekata ferorezonanse, naročito u srednjenaponskim distributivnim sistemima.

U svim režimima gde je došlo do pojave ferorezonanse uočena je izražena nesimetrija, odstupanja i distorzije talasnog oblika usled nelinearnog zasićenja jezgra. Primenjene aktivne mere su efikasne u ograničavanju trajanja ovih pojava, čime se sprečava termičko oštećenje transformatora i proboj izolacije.

5 ZAKLJUČAK

Ferorezonansa u elektroenergetskim sistemima je nelinearni fenomen koji nastaje interakcijom kapacitivnosti mreže i zasićenog magnetskog jezgra INT-a. Zbog svoje nepredvidivosti i visokih prenapona koje generiše, neophodno je primeniti mere za njeno prigušenje. U ovom radu su, kroz simulacije u softveru EMTP/ATP, analizirane pojave uključenja voda u praznom hodu, koje su u analiziranoj mreži uzrokovale pojavu ferorezonanse. Analizirana je primena dve aktivne mere za njeno suzbijanje, odnosno ublažavanje: priključenje otpornika na krajeve 1f sekundara i priključenje otpornika u otvoreni trougao sekundara.

Rezultati simulacija potvrdili su da su primenjeni modeli efikasni u ublažavanju oscilacija, kao i da njihov uspeh direktno zavisi od vrednosti otpornosti dok je trenutak uključenja prekidača analiziran za najnepovoljniji slučaj. Visoke vrednosti otpora korišćene su da generišu fenomen, pokazujući negativne efekte ferorezonanse, gde se javljaju i izraženi prenaponi. Potvrđeno je i da trenutak uključenja prekidača utiče na tip odziva, trajanje prigušenja i vrednost efektivnih vrednosti napona. Uočeno je da se primenom aktivne mere 1 ferorezonansa prigušuje u intervalu od 0,190 do 0,250 s, a oblik envelope efektivne vrednosti napona dostiže sinusoidalni oblik nakon oko 10 perioda, a primenom aktivne mere 2 prigušenje je u kraćem intervalu od 0,017 do 0,020 s i sinusoidalni oblik se postiže po prigušenju.

Ova analiza potvrđuje da je razmatranje sklopnih operacija od suštinskog značaja za razumevanje dinamike ferorezonantnih procesa. Količina energije akumulirane u jezgru pri uključenju INT-a primarno diktira amplitudu i vreme smirivanja prenaponskih fenomena nastalih u prelaznom režimu, koji se javljaju kao posledica ferorezonanse.

Buduća istraživanja mogu biti usmerena na proširenju analize na složenije modele elektroenergetskih sistema koji obuhvataju dodatne elemente mreže, različite konfiguracije i režime rada. Takođe, mogu se razmatrati i druge metode za ublažavanje ferorezonanse, uz ispitivanje njihovog uticaja na rad i pouzdanost naponskih transformatora. Poseban pravac istraživanja može predstavljati i primena neuronskih mreža za detekciju karakterističnih ferorezonantnih talasnih oblika i blagovremeno prepoznavanje nastanka ovog fenomena.

LITERATURA

[1] V. Valverde, A. J. Mazon, I. Zamora, G. Buigues, Electrical Engineering Department University of Basque Country, Spain, “Ferroresonance in Voltage Transformers: Analysis and Simulations”, *Renewable energy and power quality journal,* Vol. 1/No. 5/1392/317-valverde*,* 2007, 5 str.

[2] E. Šabanović, Elektrotehnički fakultet Istočno Sarajevo, BiH “Ferorezonansa u distributivnoj mreži sa izolovanim “, 15. međunarodni simpozijum INFOTEH-JAHORINA, Jahorina, 2016, str. (869-873) u *Zborniku radova sa konferencije*

[3] H. Radmanesh, M. Rostami, J. Khalilpour, “Ferroresonance in Voltage Transformer Considering Linear and Nonlinear Core Losses Effect”, *International Journal of Computer and Electrical Engineering,* Vol. 4/ No. 5, 2012, str. (789-793)

[4] R. Jasika, K. Maksić, J. Mrvić Elektrotehnički institut Nikola Tesla, “Analiza mogućnosti nastanka ferorezonanse u izolovanoj 6 kV mreži”, Vol. 33/No. 33, 2023, str. (1-13) u *Zborniku radova, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla"*

[5] A. B. Rasheed, J.J. Chavez, S. Das, O. Probst, J. C. C. Ortega, M. Popov - Volker Energy Solutions, Tecnologico de Monterrey, Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Science, Faculty of Electrical Engineering, mathematics and Computer Science, Delft University of Technology, „Ferroresonance identification by pattern recognition of its characteristic wavelets“, *Electric Power Systems Research,* Vol. 251/ No. 112220*,* 2026, str. (1-9)

[6] D. Filipović-Grčić, B. Filipović-Grčić, D. Krajtner Končar – Electrical Engineering Institute, University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing, Science, Končar – Instrument Transformers Inc D, „Frequency response and harmonic distortion testing of inductive voltage transformer used for power quality measurements “, *Procedia Engineering,* Vol. 202, 2017, str. (159–167)

[7] J. Mrvić dipl. inž, dr D. Salamon, van.prof. Univerzitet u Beogradu Elektrotehnički fakultet, „Naponski transformatori i ferorezonansa u izolovanim mrežama “, Magistarski rad, 2014

[8] Prof.dr.sc. T. Kelemen, dipl.ing. Končar-Institut za elektrotehniku, Zagreb, „Ferorezonancija u trofaznoj mreži s izoliranom nultom točkom”, 4. Savjetovanje HRO CIGRE, Zagreb, 1999, str. (5-12-x) u *Zborniku radova sa konferencije*