

Ferorezonansa u distributivnoj mreži sa izolovanim zvjezdištem

Ernad Šabanović

Student drugog ciklusa studija
Elektrotehnički fakultet

Istočno Sarajevo, Bosna i Hercegovina
ernad_shabanovic@hotmail.com

Sažetak— Ferorezonansa je specifičan problem koji se javlja u elektroenergetskim mrežama i koji može prouzrokovati dielektrične i termičke probleme na samim postrojenjima. Velike struje i veliki naponi su značajke ovog problema. U trofaznoj mreži s izolovanim zvjezdištem (IT sistem) i jednofazno izolovanim naponskim induktivnim transformatorima moguća je ferorezonansa, nelinearna rezonantna pojava koja nastaje između kapaciteta mreže prema zemlji i nelinearnih induktiviteta naponskih transformatora. Najbolji i najjednostavniji način sprječavanja ferorezonanse kroz primar naponskih transformatora, jeste postavljanjem odgovarajućeg prigušnog otpornika na sekundar ili tercijar naponskih transformatora. Pomoću programskog paketa EMTP urađena je simulacija ferorezonanse u IT sistemu gdje je prikazano i prigušenje visokih napona uslijed ferorezonanse.

Ključne riječi— ferorezonansa; IT sistem; EMTP

I. UVOD

Pod linearnom rezonansom u električnom kolu sa konstantnim parametrima podrazumijeva se režim pri kome je prinudna učestanost izvora bliska sopstvenoj učestanosti kola. U tom slučaju se javljaju povećanja amplitude struje i napona. Amplituda je u ovom slučaju ograničena omskim otporom kola.

Pod nelinearnom rezonansom podrazumijeva se pojava da se u kolu sa nelinearnim parametrima, promjenom režima mijenja sopstvena učestanost kola. U energetske sistemima je nelinearni parametar najčešće induktivnost sa gvozdenim jezgrom, pa se iz tog razloga ova pojava naziva „fero“-rezonansa.

Uzrok nastanka ferorezonanse najčešće predstavljaju manipulacije sklopnih aparata. Nakon sklopnog manevra, pojavljuju se tranzijentni (prijelazni) prenaponi koji se mogu dugo zadržati u sistemu i prouzrokovati neželjene kvarove. Tokom nelinearnog režima u energetske mreži postoji mogućnost formiranja ferorezonanse. Postoji i osnovna podjela ove pojave, u zavisnosti od frekvencije napona ili struje, na četiri vrste i to: ferorezonansa sa osnovnim harmonikom, sa subharmonikom, sa aperiodičnim signalom i haotični režim. U mrežama sa izolovanim zvjezdištem transformatora najčešće se pojavljuje ferorezonansa sa osnovnim harmonikom ($f_0, 3f_0, 5f_0, \dots$) i subharmonikom

($\frac{f_0}{n}, \frac{f_0}{3}, \dots, f_0$). Kada bi mreža bila uzemljena bilo direktno ili putem malog otpora, fazni naponi bi bili čvrsti i ne bi bilo moguće doći do tačke ferorezonanse. U izolovanoj mreži, međutim, dovoljno je prolaznim zemljospojem zatirati potencijal izolovane mreže prema zemlji, pa da se dogodi ferorezonansa [1].

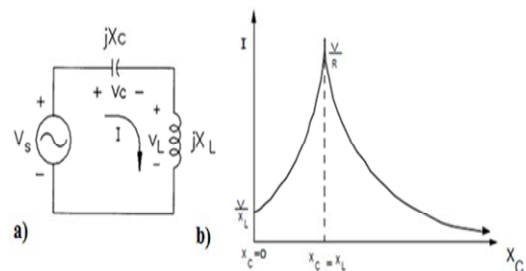
II. FEROREZONANSA

A. Princip ferorezonanse

Najlakši način razumijevanja ferorezonanse u elektroenergetskim (EE) mrežama jeste preko jednostavnog RLC kola, Sl. 1.a.

Ukoliko se uzme u obzir da su induktivna (X_L) i kapacitivna (X_C) reaktansa konstantni ili linearni, a da je aktivna otpornost kola uveliko manja od reaktansi, struja u kolu je približno jednaka [2]:

$$I = \frac{V}{R + X_L - X_C} \cong \frac{V}{X_L - X_C} \quad (1)$$

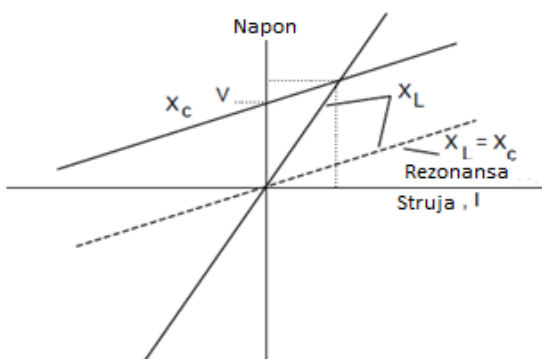


Slika 1. a) RLC kolo, b) Struja u RLC kolu sa različitim vrijednostima reaktanse X_C [2]

Ukoliko je X_C jednako nuli, u tom slučaju vrijednost struje zavisi samo od induktivne reaktanse u kolu, a ako je X_C značajno veliko tada je struja zanemariva. Najteži slučaj za povećanje struje je kada su reaktanse jednake ($X_L = X_C$) i tada struja značajno proizvodi velike prenapone, jer zavisi samo od aktivne otpornosti. Upravo ova zavisnost struje od reaktanse X_C prikazana je na Sl. 1.b. Vjerovatnoća da će se u kolu

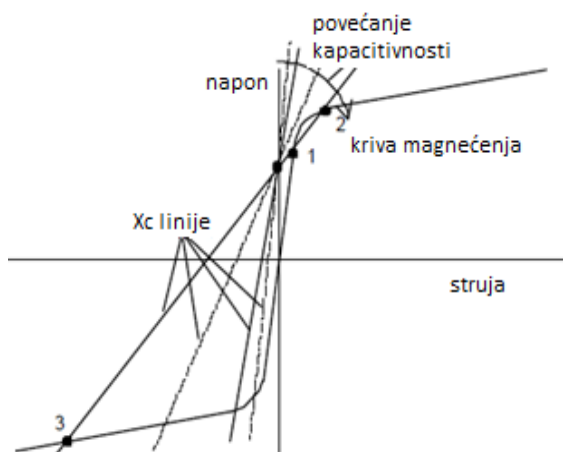
pojaviti režim koji izjednačuje reaktanse je jako mala, s obzirom da su sve vrijednosti linearne. No međutim, ukoliko postoji promijenljiva vrijednost induktivne reaktanse, kao na primjer gvožđe transformatora u izolovanom sistemu, tada se ta vjerovatnoća povećava.

Na Sl. 2 prikazani su odnosi reaktansi i time njihove mogućnosti da se izjednače u kolu i proizvedu neželjenu rezonansu. Prikazani su linearni elementi X_L i X_C gdje se vidi da nastupanjem rezonanse linija X_L dolazi u paralelnu vezu sa linijom X_C i u tom slučaju teoretski struja i napon se povećavaju beskonačno. U slučaju da postoji nelinearana reaktansa X_L tada se reaktansa ne može prikazati pravom linijom i u tom slučaju javlja se više tačaka u kojima se izjednačuju kapacitivna i induktivna reaktansa, što je prikazano na Sl. 3.



Slika 2. Odnos reaktansi za linearno LC kolo [2]

Sa Sl. 3 očigledno je da postoje minimalno tri presječne tačke, linija koja predstavlja kapacitivnu reaktansu i krive induktivne reaktanse, a sa povećanjem kapacitivnosti povećava se i vjerovatnoća pojave ferorezonanse.



Slika 3. Odnos reaktansi u LC kolu pri nelinearnoj induktivnosti [2]

B. Simptomi ferorezonanse

Zajednička za sve vrste ferorezonanse je to da magnetno jezgro transformatora odlazi u zasićenje i na taj način se stvara velika vrijednost fluksa što uzrokuje značajnu buku uslijed

promjene gvožđa u magnetnom polju i uslijed pomijeranja laminiranog jezgra. Ta buka se može usporediti sa zujanjem koju proizvodi određene turbine udarajući u neke zavoje. U svakom slučaju zvuk se uveliko razlikuje od zvuka transformatora prilikom normalnog rada.

Sljedeći važan simptom jeste zagrijavanje transformatora uslijed povećanja magnetnog fluksa koji počinje zahvatati metalne dijelove koji nisu predviđeni da budu obuhvaćeni magnetnim fluksom. Pregrijavanje samog transformatora i u ovom slučaju zavisi od njegovih karakteristika, jer neki transformatori ne idu duboko u zasićenje tako da mogu izdržati određeno vrijeme prenapone uzrokovane ferorezonansom. Pored transformatora i odvodnik prenapona može lako da strada, zbog njegove same uloge da odvodi prenapone koje kratko traju, a ferorezonansa se duže zadržava u sistemu i time onemogućuje da odvodnik prenapona apsorbira toliku energiju.

Uslijed ferorezonanse dolazi i do pojava flikera u sistemu koji značajno ugrožavaju osvjtljenje priključeno na taj sistem. Pored toga flikeri mogu napraviti i značajnu štetu na samim elektroničkim uređajima.

III. POJAVA FEROREZONANSE U MREŽAMA SA IZOLOVANIM ZVJEZDIŠTEM

Ukoliko se posmatraju izvori kapacitivnosti i nelinearne induktivnosti, kao i širok opseg operativnih procesa u distributivnim mrežama sa izolovanim zvjezdištem, konfiguracije pri kojoj nastaje ferorezonansa su beskonačne.

Najčešći vid uzroka nastanka ferorezonanse jesu prijelazni (tranzijentni) prenaponi nastali sklopnim operacijama u sistemu (ispad potrošača, djelovanje zaštite radi otklanjanja zemljospoja i sl.). U distributivnim mrežama sa izolovanim zvjezdištem najčešći kvarovi su zemljospojevi koji odvođe, zbog nastanka prenapona u sistemu, transformatore u zasićenje. Time se ferorezonansa može pratiti kroz fazne napone, ali i na naponu nultačke [3].

Zemljospoj je spoj faznog vodiča sa zemljom u mreži s izolovanim zvjezdištima energetskih transformatora. Kod zemljospoja, dominantne veličine koje određuju iznos struje kvara su nulti kapaciteti vodova budući da se struja kvara koja protiče kroz zemlju ne može zatvoriti kroz zvjezdišta transformatora, već samo kroz nulte kapacitete vodova (kapaciteti faznih vodiča prema zemlji). Modul (iznos) struje zemljospoja je:

$$I_z = 3 \cdot V_n \cdot \omega \cdot \sum_i C_o^i \quad (2)$$

Za sredjenaponske mreže u kojima zvjezdište nije uzemljeno, ukupni nulti kapacitet je mali, pa je i struja relativno mala i iznosi do nekoliko desetaka ampera. Kod velikih kablovskih sredjenaponskih (SN) mreža (gradske mreže), struja zemljospoja može doseći relativno velike iznose (preko 100 A) [4].

Sljedeća situacija u kojoj može doći do ferorezonanse jeste napajanje transformatora preko jedne ili dvije faze, a što je prouzrokovao neki kvar (ispad jedne faze zbog izgorjenog osigurača, prekidač jedne faze nije bio u funkciji i sl.), stim da je transformator slabo opterećen, a kako danas skoro sva zaštita ide preko strujnih transformatora vjerovatnoća ove pojave je povećana.

Ukoliko se desio zemljospoj na visokonaponskoj strani transformatora visoki potencijal neutralne tačke putem kapaciteta se može odraziti i na srednjonaponsku stranu i može da prouzrokuje ferorezonansu, naravno opet u zavisnosti od kapacitivnosti mreže i karakteristike zasićenja transformatora. Ukoliko se zemljospoj otkloni na visokonaponskoj (VN) strani neuravnoteženi sistem koji je nastao tokom kvara može i dalje da podržava formiranu ferorezonansu. Najčešći oblik ferorezonanse u ovom slučaju biva sa osnovnim harmonikom [3].

U trofaznoj mreži s izolovanim zvjezdištem i jednopolno izolovanim naponskim induktivnim transformatorima moguća je ferorezonansa, nelinearna rezonantna pojava koja nastaje između kapaciteta mreže prema zemlji i nelinearnih induktiviteta jednopolno izolovanih naponskih transformatora. Manifestira se dugotrajnim povišenjem faznih napona izolovane mreže prema zemlji, dok linijski naponi ostaju nepromijenjeni. To znači da trokut napona titra prema zemlji zadržavajući svoje dimenzije i fazni pomak. Drugim riječima, za vrijeme ferorezonanse, sva tri fazna napona mrežne frekvencije dobivaju jednaku istofaznu komponentu napona titranja trokuta linijskih napona prema zemlji. Frekvencija tog nultog (istofaznog) titranja može, ali ne mora, biti jednaka frekvenciji mreže. Ako je frekvencija nultog titranja jednaka frekvenciji mreže, tada govorimo o ferorezonanciji s osnovnim harmonikom. Pri ferorezonanciji s osnovnim harmonikom amplitude dva fazna napona su i do tri puta veće od amplitude nazivnog faznog napona, a amplituda trećeg faznog napona je znatno manja. Uz ferorezonansu s osnovnim harmonikom, u izolovanom sistemu tercijara javlja se i ferorezonansa drugog subharmonika. To je pojava kada trokut napona tercijara titra prema zemlji frekvencijom od oko 25 Hz. Pri ferorezonansi s drugim subharmonikom, fazni naponi tercijara su suma odgovarajućih simetričnih faznih napona tercijara frekvencije mreže i obično nešto višeg napona dvostruko niže frekvencije, tako da je vršna vrijednost ovakvih ferorezonantnih napona obično nešto veća od dvostruke amplitude faznih napona osnovne frekvencije [1].

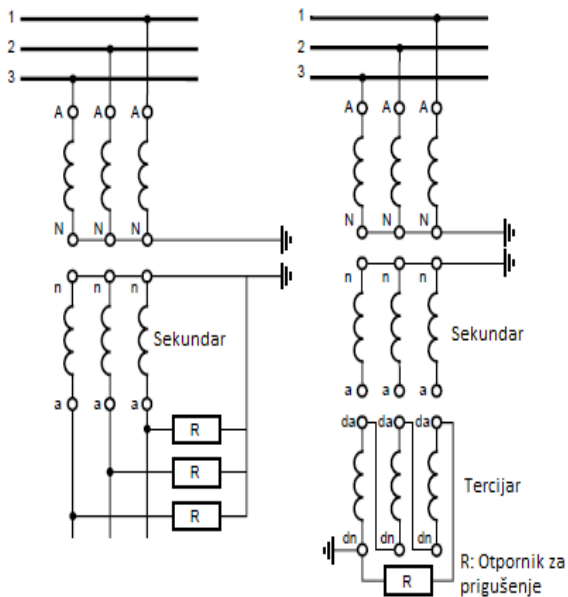
IV. NAČINI PRIGUŠENJA FEROREZONANSE

Postoji nekoliko načina pomoću kojih se može onemogućiti nastajanje neželjene ferorezonanse u sistemu. Prilikom projektovanja nekog izolovanog sistem teško je obuhvatiti sve uticaje koje mogu izazvati ferorezonansu stoga taj način nije niti efikasan, a niti moguć. U značenju efikasnosti misli se na nemogućnosti predviđanja svih prijelaznih procesa u mreži, stoga taj način se rijetko uzima u obzir. Ono na što se može uticati jeste izbor određene opreme koja može onemogućiti formiranje ferorezonanse:

- Izbor odgovarajućih prekidača koji će umnogome smanjiti prijelazne kapacitete koje utiču na ukupnu kapacitivnost sistema i time povećavaju mogućnost izjednačenja sa nelinearnom induktivnosti jezgre nekog transformatora, ukoliko je taj transformator zbog nekog uzroka otišao u zasićenje;
- Izbjegavanje pobuđivanja transformatora kada na njemu nema nikakvog opterećenja;
- Izbjegavanje upotrebe osigurača, ukoliko je to moguće, kako ne bi došlo do gubitka jedne ili dvije faze i time prouzrokovalo prenapone i povećanje kapaciteta sistema, kao moguće stanje pri kojem nastaje ferorezonansa;
- Ne raditi na kablovima koji napajaju transformator pri opterećenju, kako ne bi došlo do mogućeg prekida i izazivanja visokih prenapona i kapaciteta sistema;
- Izabrati naponski transformator čije magnetno jezgro radi sa manjom vrijednosti indukcije, tako da se onemogućí da prenaponi izazovu ferorezonansu.

Najbolji način, a ujedno i najjednostavniji jeste izbor odgovarajućeg prigušnog otpornika koji se stavlja u otvoreni krug sekundara ili tercijara naponskih transformatora. Za dimenzionisanje otpornika R u otvorenom trokutu postoje dva uslova. Prvi uslov je da pri trajnom zemljospoju u postrojenju, kada se na otvorenom trokutu, pa prema tome i na otporniku R, javlja napon 100 V, struja ne smije biti veća od trajne termičke struje sekundarnog ili tercijarnog namota. Drugi uslov slijedi iz uvjeta da energiju poticaja treba što prije potrošiti. Naime, da bi se dogodila ferorezonansa mora postojati sklonost sistema ferorezonansi i poticaj koji je u stanju sistem dovesti do ferorezonanse. Poticaj je zapravo količina energije koju treba ubaciti u sistem, da bi se odvelo u ferorezonansu. Ideja kako izbjeći ferorezonansu zasniva se na tome, da se energija poticaja, ako se pojavi u sistemu, što brže potroši i tako onemogućí nastajanje ferorezonanse. Budući da je u normalnom pogonu napon na otvorenom trokutu nula, otpornik ne opterećuje naponske transformatore i ne utiče na tačnost, sve dok ne dođe do translacije trokuta napona prema zemlji [1], [3].

Na Sl. 4 dati su šematski prikazi povezivanja otpornika na naponske transformatore sa jednim i sa dva sekundara, kao i sa različitim vezama u zvijezdu i trokut.



Slika 4. Povezivanje otpornika na sekundare naponskih transformatora [3]

Vrijednosti otpornika u zavisnosti od vrste naponskih transformatora (NT) bira se prema sljedećim formulama [3]:

- za NT sa jednim sekundarom:

$$R = \frac{U_s^2}{kP_t - P_m}; P_R = \frac{U_s^2}{R} \quad (3)$$

- za NT sa dva sekundara:

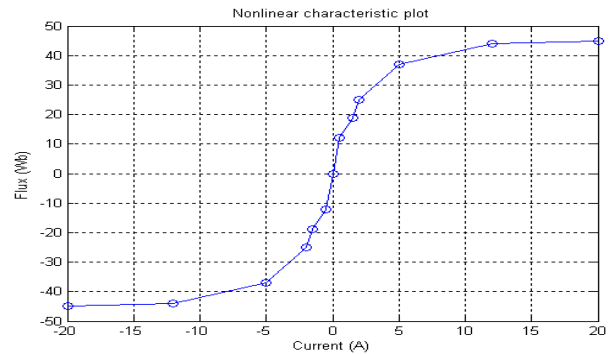
$$R = \frac{3\sqrt{3} \cdot U_s^2}{P_e}; P_R = \frac{(3U_s)^2}{R} \quad (4)$$

gdje su: R minimalna vrijednost otpornika, P_R minimalna snaga otpornika, U_s nominalna vrijednost sekundarnog napona NT, k posebni faktor čija je vrijednost između 0,25-1 koji uzima u obzir određene greške samog NT, P_t nominalna snaga NT (VA), P_m snaga potrebna za mjerenje (VA), P_e snaga NT koju može izdržati, a da temperatura ne prelazi dozvoljenu vrijednost. Otpornik se mora birati tako da može izdržati svu tu energiju oslobođenu kvarom, kako bi spriječio nastanak ferorezonanse, ali s druge strane da taj otpornik ne pruzrokuje dodatne visoke napone na sekundaru transformatora kako ne bi uticao na tačnost mjerenja ili na dodatno zagrijavanje.

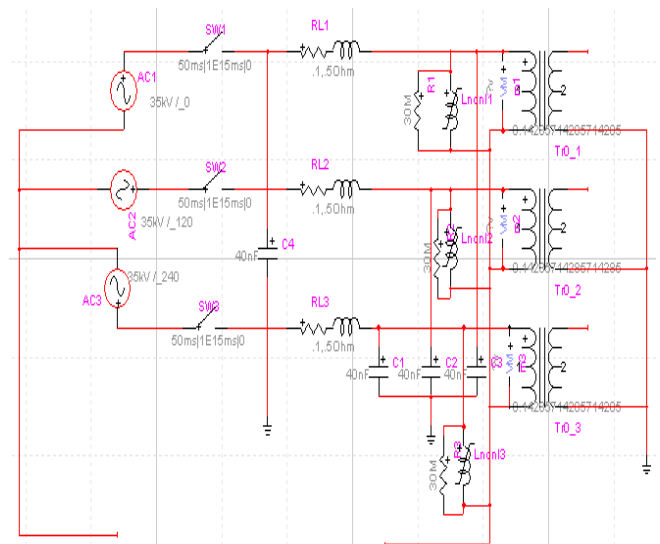
V. SIMULACIJA FEROREZONANSE U EMTP PROGRAMU

Programski alat EMTP namijenjen je za numeričku simulaciju elektromagnetnih i elektromehaničkih prijelaznih procesa u EE sistemu. Primjenom ovog alata moguće je simulirati kompleksnu mrežu proizvodnje strukture. Za tu svrhu koriste se modeli rotacionih mašina, transformatora, vodova, prekidača, odvodnika prenapona, kao i modeli sistema automatskog upravljanja, opreme energetske elektronike i komponenti sa nelinearnim karakteristikama. Razmatranje simetričnih i nesimetričnih režima rada izazvanih kvarovima, prenaponima atmosferskog porijekla ili sklopnim prenaponima može se izvršiti primjenom ovog programskog alata [5]. U nastavku rada data je šema koja se koristila u

simulaciji za ferorezonasu u jednom izolovanom sistemu. Model je prikazan na Sl. 6 i sastoji se od naizmjeničnog izvora, otpornika i induktivnosti koji predstavlja karakteristike kabla, kapacitivnosti prema zemlji koje predstavlja sumu kapacitivnosti sistema i prelaznih procesa uzrokovani zemljospojem i transformator kojem je dodata nelinearna induktivnost i otpornost koje predstavlja nelinearno magnetno kolo samog transformatora [6]. Krivulja magnećenja naponskog transformatora koja je korištena u simulaciji je data na Sl. 5.



Slika 5. Karakteristika magnećenja naponskog transformatora



Slika 6. Šema simulacije ferorezonanse u EMTP programskom alatu

Ovim je prikazan ekvivalentni trofazni izolovani sistem sa neopterećenim naponskim transformatorom i kvarom uzrokovanim zemljospojem, u ovom slučaju prve faze. Primarni napon na transformatoru prikazan je na Sl. 7 u kojem se formiraju visoki i izobličeni prenaponi. Prenaponi dostižu vrijednosti približno i do 45 kV. Ovakvi prenaponi mogu napraviti veliki štetu ne samo na samom transformatoru, već i na ostalim dijelovima jednog postrojenja (izolatori, sabirnice itd.) uslijed eksplozije ili izgaranja primarnog namotaja transformatora.

VI. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je bio upoznavanje sa problemom ferorezonanse koja se javlja u elektroenergetskim mrežama sa izolovanim zvjezdištem. Opisani su osnovni uzroci koji mogu sistem odvesti u ferorezonansu. Zemljospoj, kao osnovni uzrok razvoja ferorezonanse u IT sistemu pri kojem nastaju visoki prenaponi detaljnije je opisan u radu. Nije svaka izolovana mreža sklona ferorezonansi. Na osnovu poznavanja kapaciteta mreže i krivulja magnećenja naponskih transformatora moguće je ustanoviti da li je određena konfiguracija mreže sklona ferorezonansi. Međutim konfiguracije mreže se mijenjaju s uklopnim stanjem. Mnogo je jednostavnije, neusporedivo jeftinije i konačno mnogo pouzdanije onemogućiti nastanak ferorezonanse ugradnjom odgovarajućeg otpornika na sekundarni ili tercijarni namotaj naponskih transformatora. Stim u vezi urađena je i simulacija u programu EMTP koja opravdava navedeno rješenje o ugradnji otpornika.

LITERATURA

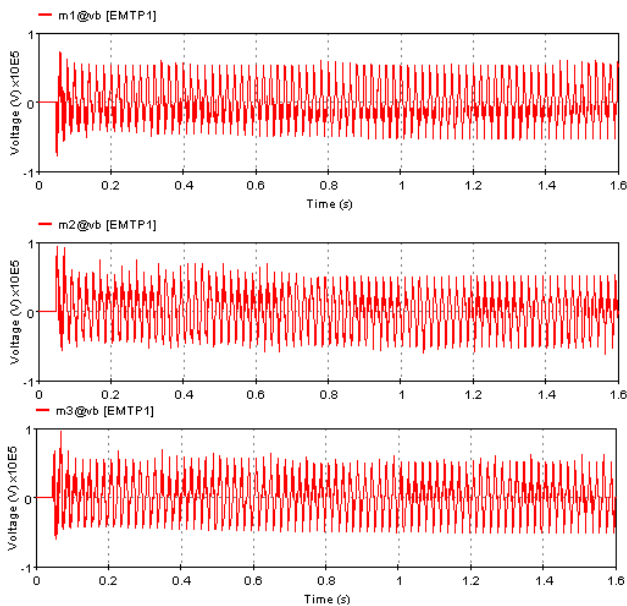
- [1] Tomislav Kelemen, „Ferorezonancija u trofaznoj mreži s izoliranim nultočkom“, HR CIGRE, Cavtat 1999, Ref. 12-01.
- [2] Surya Santoso, Roger C. Dugan, Thomas E. Grebe, Peter Nedwick, „Modeling ferroresonance phenomena in an underground distribution system“ Distribution Operatoin Planning Virginia Power, 2015.
- [3] Philippe Ferracci, „Ferroresonance“, Groupe Schneider, 1998.
- [4] Ranko Goić, Damir Jakus, Ivan Penović, „Distribucija električne energije“, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Split, 2008.
- [5] Zlatan Stojković, „Projektovanje pomoću računara u elektroenergetici – primena programskih alata“, Elektrotehnički fakultet Beograd, Akademska misao Beograd, 2009.
- [6] Ravi S. Gorayan, „Ferroresonance simulation studies using EMTP“, Indian Institute of Technology, decembar 2012.

ABSTRACT

Ferroresonance is a specific problem which occurs in the electric power supply and which may cause dielectric and thermal problems on single facilities. Large currents and large voltages are features of this problem. In the three-phase network with isolated star point (IT systems) and single-pole isolated voltage inductive transformers, ferroresonance is possible, non-linear resonance phenomenon that occurs between the capacity of the network to the ground and nonlinear inductance single-pole isolated voltage transformers. The best and simplest way to prevent ferroresonance in primary voltage transformers, is setting the appropriate damping resistor in the open secondary or tertiary of voltage transformer. Using the software package EMTP, simulation of ferroresonance in the IT system is performed where is shown damping of high voltage due to ferroresonance.

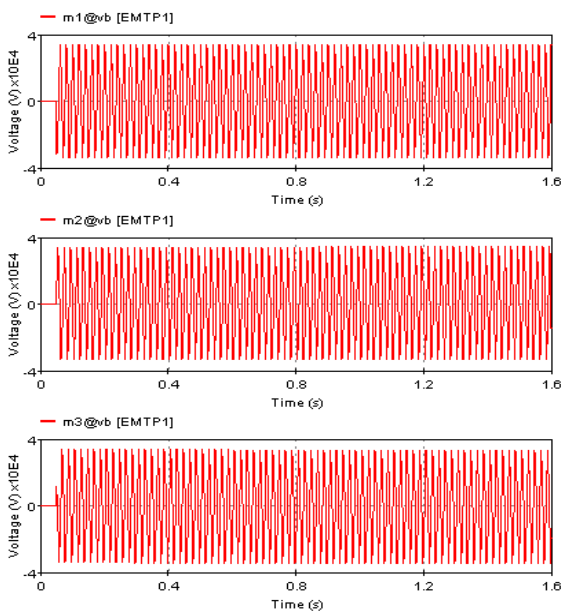
FERRORESONANCE IN DISTRIBUTION ISOLATED NEUTRAL NETWORK

Ernad Šabanović



Slika 7. Prenaponi na primaru transformatora u sve tri faze

Da bi se spriječila pojava ferorezonanse koristi se otpornik kojim će se uspješno otkloniti prenapon na primarnoj strani transformatora i tako spriječiti oštećenje transformatora. Time je sljedećom simulacijom dokazano da se korištenje otpornika na sekundar transformatora sprječava razvoj ferorezonanse, Sl. 8.



Slika 8. Napon transformatora na primaru kada je priključen otpornik za prigušenje ferorezonanse