

**UNAPREĐENJE PROCESA ODRŽAVANJA RADIJALNE MREŽE  
SREDNJEG NAPONA SA IZOLOVANOM NEUTRALNOM TAČKOM PRIMENOM SAVREMENIH  
UREĐAJA ZA SPREČAVANJE I PRIGUŠENJE FEROREZONANSE**

**S. MILORADOVIĆ, P.D.”Termoelektrane i kopovi Kostolac” D.O.O. Republika Srbija  
M. STANKOVIĆ, P.D.”Termoelektrane i kopovi Kostolac” D.O.O. Republika Srbija  
I. ANĐELKOVIĆ, ABB D.O.O. Republika Srbija**

## **SADRŽAJ**

Savremeno tehničko rešenje je neuporedivo bolji izbor u odnosu na klasično rešenje pre i nakon nastanka ferorezonanse u radijalnim mrežama srednjeg napona sa izolovanom neutralnom tačkom.

U radu je grafički analizirana efikasnost primene (slika 4) ovog uređaja u odnosu na klasično rešenje (prigušni otpornik) koja se ogleda u manjoj verovatnoći nastanka ferorezonantnih pojava u slučajevima kada se samo oscilacije javljaju između nelinearne induktivnosti mernih naponskih transformatora i kapacitivnog dela razvoda, u neosetljivosti na asimetriju u mreži, u kraćem vremenu prigušenja ferorezonansi u manjoj disipaciji toplote pri ovim pojavama, kao i nižim prenaponima u toku ferorezonanse.

Prednost primene savremenog tehničkog rešenja je i u slučajevima kada se, izmeštanjem dela kablovske trase, smanjuje verovatnoća nastanka ferorezonanse pojedinih izvoda.

Ključne reči: ferorezonansa, prigušni otpornik, grafička analiza, neselektivnost, zemljospojna usmerena zaštita, naponski transformator, srednjenaponska mreža, transformatorska stanica, transformatorski senzori.

## **SUMMARY**

The modern technical solution is much better solutions of selection in comparison to the classical one, before and after the formation of ferorezonance in radial networks of medium voltage,with isolated,neutral point. This paper iz graphically analyze the efficient application (fig.4) of modern devices compared to the classical solution is reflected in less likelihood of forming ferorezonant phenomena in cases when only oscilations occur between nonlinear inductivity of measurable vltge transforme and capacitance part of usherette. It is also reflected in insensibility on asumetry in the network,in shorter period of ferorezonance damping and releasing less dissipation of heat during this phenomena, like lower overvoltage during ferorezonance.

The advantage while applying the modern devices is also seen in cases when during dislocating part of the cable run there is less likelihood of forming ferorezonance in certain derivative outlet cells in substations cells.

Key words: ferorezonance, damping resistor, graphical analysis, non-selectivity, directional earth-full protection, voltage transformenr, medium voltage network, substation, trasformer-sensore.

## UVOD

U mreži sa izolovanom neutralnom tačkom zemljospoji mogu da se pojave kao intermitirajući ili kruti. Intermitirajući zemljospoj, u čijem trajanju dolazi do višestrukog gašenja i ponovnog paljenja električnog luka, dovodi do prelaznih naponskih i strujnih procesa. Tek njegovim prestankom uspostavlja se stacionarno stanje. Intermitirajući zemljospoj je najveći nedostatak ove mreže i najviše moguće kod malih kapacitivnih struja zemljospoja, što može dovesti do visokih prenapona.

Kod velike struje zemljospoja mogućnost samogašenja električnog luka je mala, a ako duže traje, na mestu kvara, može da poveća verovatnoću prelaska jednogpolnog na dvopolni i trolni spoj. Pri ovim strujama je moguća 2. subharmonijska ferorezonansa (frekvencija njenih oscilacija nije tačno dvostruko manja od frekvencije mreže). U oscilovanju podjednako učestvuju sve tri faze. Uspostavljanje i prekidanje krutog zemljospoja prate prelazni procesi u razvodu. Po završetku ovih procesa uspostavlja se stacionarno stanje. Kod krutih zemljospoja visoki prenaponi su najčešće ispod  $2,5 U_f$ . Oni su najčešće uzrok ferorezonanse u razvodu, što je objašnjeno u poglavlju 3. na slici 4. U pomenutoj mreži moguće su i ostale vrste ferorezonanse i to:

- Treća harmonijska ferorezonansa se javlja u mrežama sa malim vrednostima kapaciteta prema zemlji. Frekvencija njenih oscilacija je tačno trostruka frekvencija mreže. Opasna je za izolaciju mreže i naponskih transformatora. U oscilovanju podjednako učestvuju sve tri faze;
- Druga harmonijska ferorezonansa nastaje pri višim naponima u mreži. Frekvencija njenih oscilacija nije tačno dvostruko veća od frekvencije mreže. U oscilovanju podjednako učestvuju sve tri faze;
- Mrežna ferorezonansa nastaje češće u mreži i naponski transformatori mogu da budu veoma ugroženi. Frekvencija njenih oscilacija je identična frekvenciji mreže. Na dve faze se javljaju visoki prenaponi, dok na trećoj napon pada i ispod nominalnog napona mreže (kao da se desio zemljospoj preko nekog otpora).

Iako retko u ovoj mreži ferorezonansa je moguća i između energetskog transformatora (potrošač) i kapacitivnog dela razvoda (objašnjeno u oblasti 4) kod asimetrije u pogonu u sledećim slučajevima:

- kada dođe do prekida faznog provodnika sa ili bez spajanja sa zemljom,
- kod nepunofaznog sistema rada (jedan ili dva pola prekidača nisu uključili ili isključili),
- usled pregorevanja topljivog osigurača u pogonu.

Ferorezonansa u rednoj vezi može da se pojavi kod podzemnih kablova kod kojih je armirani oplet od čelične žice ili trake. Pri zemljospoju jedne faze oko kabla nastaje rezultujuće polje koje pobuđuje mehaničku zaštitu - nelinearna induktivnost. Ona je redno vezana za dozomnu kapacitivnost mreže čineći kolo koje je više verovatno da izazove ferorezonansu kod mreže koju sačinjavaju pomenuti tipovi plastičnih kablova. Ova greška se kompenzuje, tako što se pletenica od opleta vrati kroz obuhvatni strujni transformator.

Mogućnost nastanka ferorezonanse u pomenutim mrežama se javlja i kod uključenja neopterećenih energetskih transformatora.

Prednost ove mreže u odnosu na druge je nesmetani rad potrošača za vreme zemljospoja sve do njenog eliminisanja. Zato je za rad naponskog induktivnog transformatora u ovoj mreži propisan faktor napona  $V_f 1,9U_n/8$  h. Takođe, propisano je: dozvoljeno trajanje opterećenja uzemljivača za različite tipove uzemljivača, specifična otpornost tla i vreme potrebno da se dobije propisani napon dodira i napon koraka (na primer zemljospoj se signalise u vremenu ne dužem od 2 sata za struje manje od 20 A, 10 kV).

## 1. SPREČAVANJE I PRIGUŠENJE FEROREZONANSE U MREŽI SA IZOLOVANOM NEUTRALNOM TAČKOM

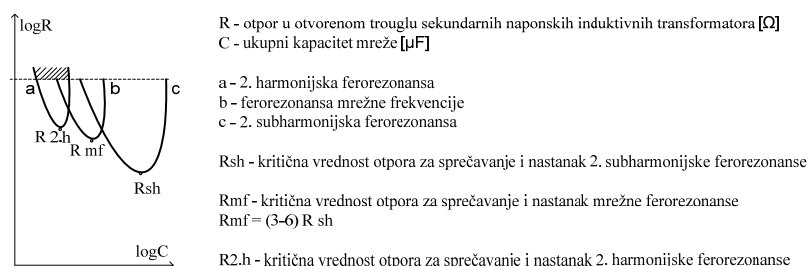
Karakteristične krive otpora za sprečavanje nastanka pomenutih ferorezonansi u funkciji kapaciteta mreže predstavljene su slikom 1.

Vrednosti otpora u otvorenom trouglu sekundarnih namotaja naponskih transformatora za sprečavanje nastanka svake od navedenih vrsta ferorezonanse opadaju, pre svega sa povećavanjem kapaciteta, prolaze minimum, koji se označava kao kritična vrednost za sprečavanje te vrste ferorezonanse i ponovo brzo rastu preko granične oblasti te vrste ferorezonanse.

Priključi li se kritični otpor  $R_{sh}$  (klasično rešenje) za sprečavanje druge subharmonijske ferorezonanse ili niži u otvoreni trougao sekundarnih namotaja naponskih transformatora, efikasno se prigušuju sve vrste ferorezonanse nezavisno od konfiguracije mreže, broja uključenja naponskih transformatora, kapaciteta mreže i visine naponskih poremećaja mreže.

Karakteristike pod b) i c) imaju iste početne vrednosti potrebne otpornosti za sprečavanje navedenih njihovih ferorezonansi. Karakteristika pod a) ima tu vrednost otpornosti neznatno veću kao na slici 1 (šrafirano). U tom delu oblasti pod a), mreža pri višim naponima (slika 4 tačka T') ima nemerljivu kapacitivnost tj. usled nedostatka energije njene buduće ferorezonantne oscilacije će se same prigušiti. To znači da je u ovom slučaju ta početna potrebna pomenuta otpornost manje značajna za prigušenje. Da bi se bilo koja od pomenutih ferorezonansi efikasno prigušila, potrebno je da se one precizno detektuju pre njenih prolaska kroz kritičnu

vrednost otpora u vidu promena napona i frekvencije njenih oscilacija u tercijaru naponskog induktivnog transformatora. Prema navedenoj literaturi, istraživanjem na modelima i ispitivanjem realnih mreža za otklanjanje najvećeg broja slučajeva ferorezonanse kod klasičnog rešenja utvrđeno je da se vrednost otpora u otvorenom trouglu sekundarnih namotaja naponskih transformatora kreće između 20 Ω do 40 Ω za 6 i 10 kV mrežu.



Slika 1. Vrednost otpora za sprečavanje ferorezonanse u funkciji kapaciteta mreže

## 2. NAČINI SPREČAVANJA FEROREZONANSE

Sprečavanje ferorezonanse u mreži sa izolovanom neutralnom tačkom možemo postići:

- primenom mreže uzemljena preko visokoomskog otpora,
- primenom kompenzovane mreže,
- primenom povećanja relativne magnetne permeabilnosti feromagneta naponskih transformatora,
- primenom senzora za sprečavanje ferorezonanse,
- promenom uklopnog stanja izvoda, i
- primenom mikroprocesorskih zaštita.

### 2.1. PRIMENOM MREŽE UZEMLJENE PREKO VISOKOOMSKOG OTPORA

Ova mreža ima prednosti u odnosu na izolovanu ( $I_r = 0.1 \cdot I_c$ ) tek ako je aktivna komponenta 50-100% kapacitivne komponente struje. U njoj se ne pojavljuju intermitirajući zemljospoj i ferorezonansa. Ovakva mreža može nesmetano da napaja potrošače (izuzimajući rešenja sa kratkospojenim trouglom sekundarnih namotaja naponskih transformatora) sve do njenog planiranog isključenja.

Prenaponi pri uspostavljanju zemljospoja, kao i stacionarni naponi su niži, te je verovatnoća nastanka dvopolnog i trolnog kratkog spoja manja.

Prednost ove mreže je i kod zaštite čoveka od opasnog napona koraka i napona dodira, ali su ukupni troškovi veći u poređenju sa izolovanom mrežom zbog ugradnje sistema za uzemljenja. Olakšano je otklanjanje mesta kvara.

### 2.2 PRIMENOM KOMPENZOVANE MREŽE

Na sekundaru energetskog transformatora sprega namotaja mora da bude Y (zvezda).

Struja zemljospoja se kompenzovanjem svodi na malu vrednost pa nema dvopolnih i trolnih zemljospojeva. Prednost je i u nepojavljanju intermitirajućih zemljospoja kao i nemogućnosti pojavljivanja ferorezonanse, ali je moguća određena vrsta rezonanse-linearna. Pogon je složeniji i zahteva kontrolu podešenja prigušnica i pridržavanja određenih pravila pri manipulacijama. Poteškoće su i kod otklanjanja zemljospoja i kod izbora zaštite koja je složena i nedovoljno efikasna (kod dugačkih radijalnih vodova struja kratkog spoja na kraju rezervne zone šticeja ima približnu vrednosti po intezitetu struji potrošača pa se ne razlikuju ova dva stanja).

### 2.3. PRIMENOM POVEĆANJA RELATIVNE MAGNETNE PERMEABILNOSTI FEROMAGNETA NAPONSKIH TRANSFORMATORA

Tehnološkim povećavanjem mesta preloma indukcije (povećanjem relativne magnetne permeabilnosti) se postiže sigurno sprečavanje pojave ferorezonanse u pomenutoj mreži. Da bi se sprečila veća mogućnost pojavljivanja mrežne ferorezonanse, karakteristika dela induktivnosti zasićenja  $L_z$  naponskog induktivnog transformatora mora da je više na gore tj. treba da je ugao  $\alpha_z$  veći (slika 4).

Da bi se to dokazalo analiziraćemo paralelno R,  $L(\mu)$ , C (kao model za izolovanu mrežu) kolo čiji bi modul admitanse bio:

$$|Y| = I G^2 + (C\omega - 1/\omega L(\mu))^2 I \quad [1]$$

što predstavlja propusni filter široke sopstvene frekvencije tj.  $\omega = \omega_s$ .

Ako bi napon u propusnom opsegu bio  $U > U_{max} / \sqrt{2} = I/G * \sqrt{2}$ , tada bi granična vrednost učestanosti ovog opsega bila:

$$\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 = G/C \text{ a za } \omega_s = \omega_{50} = 1/LC, \text{ i pri } L(\mu) = L_z$$

propusni opseg postaje:

$$\Delta\omega = \omega_{50}^2 * L_z/C \quad [2]$$

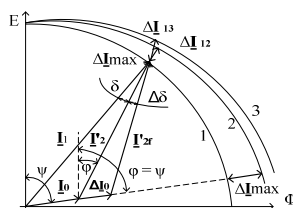
Sad se može zaključiti da i pri većim kapacitivnostima mreže (većim strujama zemljospoja) sa smanjenjem induktivnosti zasićenja naponskog transformatora povećava se mogućnost nastanka ferorezonanse mrežne frekvencije.

Iz navedenog razloga, izborom oblika u-i karakteristike naponskog transformatora možemo uticati na visinu prenapona nakon ferorezonanse kao i na mogućnost njenog nastanka. Pored toga, možemo da izaberemo odgovarajuće magnetne limove čija je maksimalna relativna magnetna permeabilnost znatno viša od 56 000 (neki materijali dostižu vrednost do 250 000) nego što je to kod lima 3406 (29Q130) i tada sigurno sprečiti nastanak ferorezonanse. Ovo su neki od razloga zbog kojih se induktivni naponski transformatori i njihova primena negativno odražavaju na mrežu sa izolovanom neutralnom tačkom.

## 2.4. PRIMENOM SENZORA ZA SPREČAVANJE FEROREZONANSE

Danas se proizvode strujni nemagnetni senzori, čija ugaona i strujna greška ne zavise od opterećenja duž čitavog opsega merenja. Primenom ovih senzora u mreži može se ostvariti visoka osetljivost zemljospojnih zaštita.

Da bi se uočio nedostatak dvodelnog obuhvatnog strujnog transformatora pri pojavi ferorezonanse, pretpostavimo da je na sekundaru strujnog transformatora priključena impedansa kojoj se menja fazni stav, a ne modul, odnosno da se struja primara ne menja. Ako promenimo ugao  $\varphi$ , struja  $I_2$  će zatvoriti nov ugao i novu tačku na krugu 1. Ako nacrtamo novi krug iz vrha vektora  $I_0$ , sa istim poluprečnikom kao i krug 1, onda će razmak između krugova predstavljati strujnu grešku. Najveća strujna greška pojaviće se kada bude  $\varphi = \psi$  tj. pri izrazito induktivnom opterećenju strujnog transformatora. Ovo je prikazano na slici 2.



E - elektromotorna sila [ V ]  
 $\Phi$  - magnetni fluks [ Wb ]  
 $I_2, I_2r$  - svedena struja sekundara na primar pre i u toku ferorezonanse  
 $I_0 + \Delta I_0$  - struja magnećenja strujnog transformatoru u toku ferorezonanse  
 $I_0$  - struja magnećenja strujnog transformatora pre ferorezonanse  
 $I_1$  - struja primara strujnog transformatora pre i posle ferorezonanse  
 $\Delta I_{12}, \Delta I_{13}$  - strujna greška strujnog transformatora pre i posle ferorezonanse  
 $\delta$  - ugaona greška strujnog transformatora (maksimalna greška pri 0.1 In u zavisnosti od klase tačnosti merenja kreće se od 10' do 120')

Slika 2. Zavisnost strujne ( $\Delta I$ ) i ugaone greške ( $\delta$ ) od faktora snage impedanse sekundarne strane strujnog transformatora (svedene vrednosti na primar). Grafikon važi u slučaju kada su  $I_0$  i  $I_2$  u fazi, pri konstantnim opterećenjem i faktorom snage.

Ako bi sada na struju magnećenja dodali priraštaj struje magnećenja ( $\Delta I_0$ ) strujnog transformatora usled povećanja harmonijske distorzije struje zemljospoja primara, tada bi se stekao utisak da se ugaona greška strujnog transformatora povećala. Ovo je slično kao kod graničnog faktora tačnosti strujnog transformatora samo se ovde ne radi o prekostrujnom domenu.

Kod induktivnih naponskih transformatora najveća greška merenja je moguća kod merenja u praznom hodu, zbog uticaja struje magnećenja. Tada se rasipna reaktansa povećava zbog delovanja kapacitivne struje visoke učestanosti, pri uspostavljanju zemljospoja, pa napon na sekundaru raste (naponska greška je manja). Gornje učestanosti za naponski transformator iznose od 500 Hz do 5000 Hz i zavise od njegove konstrukcije. Ovo govori da naponski induktivni transformator dobro prenosi više frekvencije.

Kod naponskih senzora nemamo nelinearne promene induktivnosti zasićenja kao kod naponskih induktivnih transformatora jer postoji samo rezistansa. Zato njihova primena u pomenutoj mreži sigurno sprečava ferorezonansu nastalu u delu razvoda.

## 2.5. PROMENOM UKLOPNOG STANJA IZVODA

Prednost primene savremenih rešenja je značajna i kod transformatorskih radijalnih izvoda kod kojih se češće javlja ferorezonansa nego kod ostalih. Ako su ti izvodi značajniji, na primer, za proizvodni proces, onda je verovatnoću nastanka ferorezonanse moguće delimično smanjiti izmeštanjem delova kablovskog razvoda sa nje na druge, manje značajne izvode.

Ovo je moguće primeniti ako je dovoljno dimenzionisan nadzemni ili kablovski razvod.

## 2.6. PRIMENOM MIKROPROCESORSKIH ZAŠTITA

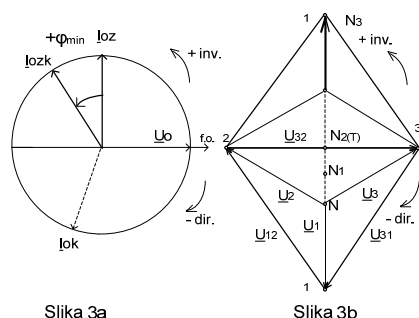
Releji za zemljospojnu zaštitu, u mreži sa izolovano neutralnom tačkom, trebalo bi da imaju što veću strujnu i naponsku osetljivost, ali se, najčešće, zbog mogućih mernih grešaka, ne postavljaju na naponsku mernu osetljivost manju od 2% nominalnog napona. Nulta komponenta struje meri se obuhvatnim mernim transformatorom, ili u krugu zvezdišta tri paralelno spojena strujna transformatora.

Veličine kapacitivnih struja zemljospoja nadzemnih vodova su male, na 10 kV iznose oko 0,03 A/km, dok su kod kablovskih vodova znatno veće i iznose oko 1,4 A/km. Zemljospojna usmerena homopolarna zaštita se obavezno primenjuje ako ukupna kapacitivna struja zemljospoja u mreži 10 kV (20 kV) prelazi 10 A, može da se primeni i pri nižim vrednostima struje zemljospoja, ali ne ispod 1 A.

Strujna osetljivost ovih releja nove generacije je najmanje 1% nominalne vrednosti. Tačnost podešenosti struje i vremena ovih releja je temperaturno zavisna od uslova temperaturnog područja okoline. Ovaj koeficijent kod mikroprocesorskih zaštita iznosi  $\pm 0.1\% / ^\circ\text{C}$  za područje temperature okoline od  $-10\text{ }^\circ\text{C}$  do  $55\text{ }^\circ\text{C}$ .

Na slici 3 je prikazano kako dolazi do neselektivnog ispada izvoda kod kojih se koriste usmereni statički releji za zemljospojnu zaštitu.

Praktično, posle isključenja izvoda, koji je bio pod zemljospojem pri čemu je došlo do asimetrije u impedansama faza prema zemlji u trofaznom sistemu. Nulta tačka trougla linijskih napon tačka N na slici 3 b) se kreće u pravcu faznog napona  $U_1$  ali u suprotnom smeru. Napon  $U_1$  se povećava a smanjuju se naponi  $U_2$  i  $U_3$ . Za napon  $U_T$  sa slike 4 ukupna impedansa prema zemlji teži beskonačnosti, što odgovara tački N2 na slici 3 b. Pri daljem povećavanju napona, ukupna impedansa postaje induktivna, nulta tačka trougla linijskog napona izlazi iz okvira trougla i istog je smera, sve dok se ne pojavi zasićenje magnetnog kola naponskog transformatora u druge dve faze, koje učestvuju u oscilovanju tj. do tačke N3 što je prikazano strelicom „+ inv.“ na slici 3b i 3a. Ovo je praćeno naglom nelinearnom promenom struje induktivnog karaktera u zdravom vodu tj. razlikom struja  $i_{L1}-i_{C1}$  povlačeći više harmonike kroz strujni obuhvatni transformator iz izvora stvarajući veću ugaonu grešku, nego kada ferorezonanse nema.



$I_{0k}$  - nulta komponenta kapacitivne struje zemljospoja u razvodu u kome je nastao zemljospoj

$I_{0z}$  - nulta komponenta kapacitivne struje zemljospoja u ispravnom izvodu u trenutku kada je prisutna  $I_{0k}$  u mreži

$I_{0zk}$  - nulta komponenta struje zemljospoja u ispravnom izvodu u kojem je nastupila ferorezonansa u trenutku kada nije prisutna  $I_{0k}$  u mreži

Indeksi 1, 2, 3 - oznake fazora faznih i linijskih napona

Slika 3.a) Kompleksna nulta komponenta struje u direktnom i inverznom sistemu

Slika 3.b) Linijski i fazni naponi u toku uspostavljanja ferorezonanse

Novonastali priraštaj ugaone greške  $\Delta\delta$  sa slike 2. uočava se kao rotacija nulte komponente struje ( $I_{0zk}$ ) induktivnog karaktera u smeru kao na slici 3 a) i može se primetiti neselektivno reagovanje zemljospojne statičke zaštite u tom izvodu. Polaritet faznog stava  $+\varphi_{min}$  nulte komponente struje nastaje od induktivnog karaktera nastalog usled zasićenja naponskog transformatora u razvodu pri ferorezonansi, a njegova minimalna vrednost, od ugaone greške strujnog transformatora.

Drugim rečima, prednjačenje nulte komponente struje u direktnom smeru isto je što i prednjačenje nulte komponente struje u inverznom smeru u odnosu na nultu komponentu napona sa gledišta zemljospojne usmerene statičke zaštite, jer će ona u oba slučaja reagovati.

Iz ovog proizilazi da pri izboru zemljospojne zaštite u mrežama sa izolovanom neutralnom tačkom, usmerenost zemljospojne zaštite nema veliku ulogu, već samo polarizacija rotacije nulte komponente struje.

Mikroprocesorski releji pri podešavanju imaju mogućnost da im se izabere sistem i to direktan ili inverzan.

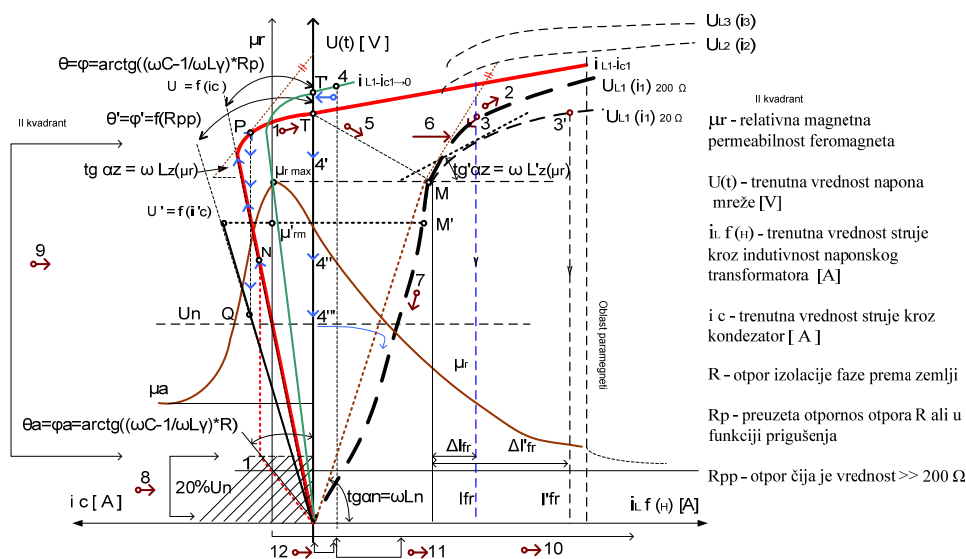
Ako bi se na nekoj transformatorskoj stanici podesio parameter na svakom izvodu sredjenaponske izolovane mreže sa izolovanom neutralnom tačkom kao npr.:0=Forward, onda će svako okretanje nulte komponente u suprotnom smeru blokirati mikroprocesorsku zaštitu.

## 3. PRIMENA SAVREMENIH TEHNIČKIH REŠENJA PRI SPREČAVANJU I PRIGUŠENJU FEROREZONANSE U MREŽI SA IZOLOVANOM NEUTRALNOM TAČKOM

Kod uspostavljanja trajnog zemljospoja kapacitivna struja skokovito raste, i njena je vrednost mnogo veća od trajne struje krutog (metalnog) zemljospoja. Skokovi kapacitivne struje mogu biti oscilatornog karaktera različite učestanosti ili aperiodični, zavisno od otpora na mestu kvara i parametara mreže. Ako je otpor na mestu kvara

jednak nuli, učestanost slobodnih oscilacija struje zemljospoja može da se kreće od nekoliko hiljada herca do nekoliko desetina hiljada herca. Ako je otpor na mestu kvara veći od nule, onda se učestanost slobodnih oscilacija struje zemljospoja smanjuje ili proces postaje aperiodični. U trenutku uspostavljanja zemljospoja prenaponi uglavnom ne prelaze  $2,5U_f$ . Naponi faza koji nisu u zemljospoju, u ovom trenutku, sa faznog napona oscilatornim putem prelaze na linijske napone. Frekvencija tih oscilacija zavisi od kapaciteta mreže C i induktivnosti rasipanja  $L_\gamma$  sekundarnog namotaja energetskog transformatora. Povećavanjem ovih vrednosti frekvencija oscilacija se smanjuje i obrnuto. Visina oscilacija a time i visina prenapona bitno zavise od trenutka uključenja i vrednosti otpora R (slika 4 oblast 8), a njihovo trajanje, odnosno prigušenje od otpora  $R_p$  (slika 4 oblast 9). Drugim rečima, otpor R koji predstavlja otpor izolacije faze prema zemlji preuzima ulogu otpora  $R_p$  prigušenja razvoda. Porast promene napona pri uspostavljanju zemljospoja je prikazan uglom  $\theta$  na slici 4. Ukoliko se zemljospoj dogodi u blizini maksimalnog faznog napona, druge dve faze dobijaju najviši fazni napon a ako se to dešava u blizini nule onda su naponi najniži. Promenom vrednosti otpora  $R_p$ , frekvencija oscilacija ostaje ista ali se menja njihovo trajanje tj. prigušenje. Ukoliko bi iz tačke N na karakteristici  $u_1 = f(i_c)$  napon i struja počeli da rastu i da premaše vrednost M sa daljim povećanjem napona ta promena bila bi funkcija magnetne permeabilnosti feromagneta  $\mu_r$ . U ovom trenutku je potrebno u tercijaru ubaciti otpornik čija je početna vrednost znatno veća od  $200 \Omega$ . Sa ovom vrednošću otpora u kolu tercijara naponskog induktivnog transformatora može da bude pod naponom za sve vreme zemljospoja ( $V_f = 1.9 U_n/8 h$ ). Praktično to se desi na znatno nižem naponu od tog tj. na  $0,2U_f$  (videti u delu 4). Ova vrednost otpornosti rasteretiće naponski induktivni transformator od daljeg napredovanja koji vodi ka zasićenju što nije slučaj kod **klasičnog rešenja**. Radna tačka P (slika 4) vraća se na tačku Q ali sada na karakteristici  $u' = f(i_c)$ -karakteristika sa otpornikom znatno veće vrednosti od  $200 \Omega$  u tercijaru. Sad je prelomna tačka napona M ispod tačke  $\mu_r \max$  i nema mogućnost za pojavu ferorezonanse. Ukoliko do porasta napona ipak dođe, tj. radna tačka iz oblasti 1 pređe do tačke T smanjenjem induktivnosti  $L_z$  sa istim kapacitetom mreže povećavanjem ukupne impedanse faze 1 prema zemlji, dostiže se tačka T. U ovoj tački ukupna impedansa faze 1 postaje beskonačna. Otpornost znatno veća od  $200 \Omega$  ostaje u tercijaru naponskog transformatora (strelica 2) i ako izvod ne isključi, kako bi sprečila dalje povećanje zagrevanja jezgra induktivnog transformatora ne uvodeći ga u paramagnete (strelica 10) kao što bi to bio slučaj kod klasičnog rešenja.

Oblast zagrevanja naponskog induktivnog transformatora je prikazana strelicom 10 koja je praćena uz povišenje napona mreže.



Slika 4. Grafičko predstavljanje krutog zemljospoja pre (II kvadrant) i u toku ferorezonanse (I kvadrant, strelica 3) kao u-i karakteristika naponskog transformatora i karakteristika relativne magnetne permeabilnosti naponskog transformatora u funkciji magnetnog polja

Isključenjem zemljospoja naponi faza na kojima nije bio zemljospoj prelaze na fazne a faza u zemljospoju dobija fazni napon. Ako se to odvija pri prolasku struje zemljospoja kroz nulu, onda u mreži nema viših prenapona od linijskih napona. Proces prate istofazne oscilacije na sva tri fazna napona sa učestanošću nekoliko Hz, ali se to oscilovanje priguši najčešće posle nekoliko stotina ms. Ovo je praćeno prenaponima koji posle njihovog prigušenja nestaju. Sada će strelica 3 krenuti prema strelici 6, izazivajući spore samooscilacije između induktivnosti naponskog transformatora i kapaciteta dela razvoda čija frekvencija i amplituda njenih oscilacija

zavisi od u-i karakteristike i otpora prigušenja  $R_p$ : ako su induktivnosti  $L_n$  i  $L_z$  veće, frekvencija oscilacija je niža.

Daljim snižavanjem napona zasićenja ispod vrednosti linijskog napona sa smanjenjem induktivnosti zasićenja  $L_z$  uz relativno visok  $R_p$  mogu da se pojave trajne oscilacije faznih napona na sve tri faze - ferorezonantne oscilacije.

Visine faznih napona u toku ferorezonanse zavise od kapaciteta faznih provodnika prema zemlji, od u-i karakteristike magnetčenja naponskih transformatora i od prigušenja usled gubitka energije. Ako naponski transformator ima malu induktivnost zasićenja  $L_z$  (brži ulazak u zasićenje  $U_{L1}(20 \Omega)$ ) i napon pri kome ulazi u zasićenje manji od linijskog napona mreže, posle isključenja zemljospoja, kada počnu ferorezonantne oscilacije i uspostavljanje i prekidanje zemljospoja, dostići će se viši prenaponi nego kada ferorezonanse nema.

Predstavljajući klasično i savremeno rešenje dvema različitim karakteristikama napona  $U_{L1}(i)20 \Omega$  i  $U_{L1}(i)200 \Omega$ , respektivno, sa grafika na slici 4 može se uočiti da početna vrednost struje (tačke 3 i 3') faze 1u trenutku nastanka ferorezonanse, nastale usled (opterećenja) otpornika u kolu tercijara, bitno utiče na visinu prenapona u mreži. Drugim rečima, što je priraštaj struje veći (slika 4), viši su prenaponi ( $\Delta I_{fr} / \Delta t$ ) u mreži i obrnuto, ukoliko su oni u tom trenutku praćeni intermitirajućim zemljospojem koji je najčešći u ovoj vrsti mreže. Pri ovim uslovima u mreži, nastali prenaponi (privremeni) kod primene **klasičnog rešenja** su viši u poređenju sa savremenim rešenjem. Zato je potrebno da otpornik ima znatno veću vrednost od  $200 \Omega$  i ostane u kolu tercijara a tek nakon daljeg smanjenja napona mreže spuštanjem strelice 3(fazni naponi sa linijskih vrednosti prelaze na fazne) kod savremenog rešenja se naglo smanjuje ta vrednost otpornosti. Praktično, to umanjeње vrednosti otpornosti za prigušenje svih vrsta ferorezonansi u tercijaru naponskog induktivnog transformatora iznosi 25% u odnosu na **klasično rešenje** tj. iznosi  $15 \Omega$ .

Sa druge strane, novonastala otpornost u tercijaru naponskog transformatora će prigušiti pojavu mnogo brže nego što je to slučaj kod klasičnog rešenja. Iz tog razloga, ovaj uređaj ne oslobađa toplotu kao što je to slučaj kod **klasičnog rešenja**. Zato se on može montirati u bilo kom delu razvoda nezavisno od napona mreže transformatorske stanice, ne utičući na opremu koja je temperaturno zavisna.

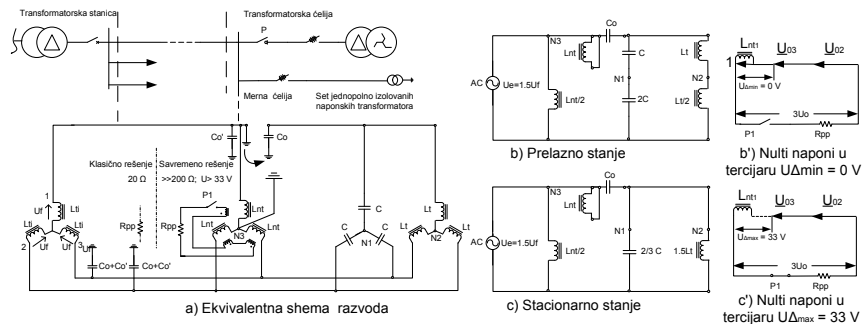
Dalje, oblast nestabilnosti procesa, od tačke T do M (slika 4) može se podeliti na dva dela i to:

- Oblast 11, u slučaju razvoda sa merljivim kapacitivnostima u mreži. Tada je moguće nelinearno smanjenje napona i induktivnosti naponskog transformatora (strelica 5) i povećanje struje uz povećanje (subharmonijsko) sopstvenih oscilacija naponskog transformatora sa preostalim kapacitivnim delom razvoda preko tačke M, i vraćanje u linearni deo naponskog transformatora. Ovaj trenutak pomeranja strelice 5 treba prepoznati i reagovati sa dodatnim otporom ( $15 \Omega$ ) u tercijaru dovoljnog za prigušenje svih vrsta ferorezonansi pre njenog dostizanja kritične vrednosti za tu vrstu ferorezonanse, pa preko tačke 6 i 7 do nominalne vrednosti kao što je to kod savremenih uređaja.

- Oblast 12, u slučaju mreže sa višim naponima u mreži, predstavljeno takčom T' i karakteristikom  $i_{L1}-i_{C1} \rightarrow 0$ . Tada je moguće dalje nelinearno povećanje napona i induktivnosti naponskog transformatora, kao i smanjenje struje (u smeru strelice 4 na slici 4), uz povećanje (harmonijsko) njenih (sopstvenih) oscilacija naponskog transformatora sa preostalim kapacitivnim delom razvoda preko strelice 4, 4', 4'', 4''' i vraćanje u linearni deo naponskog transformatora. Drugim rečima, kako je sada izvod koji je bilo pod zemljospojem isključen, prigušenje sopstvenih oscilacija dela razvoda sa naponskim transformatorom odvijace se prema slici 4.

#### 4. UTICAJ UREĐAJA ZA SPREČAVANJE I PRIGUŠENJE FEROREZONANSE NA NASTANAK FEROREZONANSE USLED ASIMETRIJE U MREŽI SA IZOLOVANOM NEUTRALNOM TAČKOM

U prelaznom režimu trofaznu nesimetričnu mrežu (pod a) možemo pretvoriti u ekvivalentnu jednofaznu na osnovu toka struje u šemi pod b.



Slika 5. Asimetrija u mreži srednjeg napona sa izolovanom neutralnom tačkom pri prekidu i istovremenom spoju sa zemljom sa strane izvora na pogonu

Gde su:

$C_0$  - kapacitet preostalog dela razvoda faze1 koja nije u zemljospoju, i

$C$  - kapacitet između faznih vodova.

Sada će sa ekvivalentnim naponom mreže od  $1.5 U_f$  biti smanjene induktivnosti energetskog transformatora ( $0.5L_t$ ) i naponskog transformatora ( $0.5L_{nt}$  a u fazi 1 je u kratkom spoju). U ovom trenutku nepotrebno je prisustvo bilo kakvog dodatnog otpora u tercijeru koji bi tu induktivnost još više smanjio. Slično se dešava i kod uspostavljanja zemljospoja što pokazuje slika 4 strelica 8 . Vidi se da je pri najvećem otporu izolacije prema masi R ili pri najvećem kapacitetu mreže ugao porasta napona  $\theta_a$  najveći pa je u toj oblasti najmanje moguća pojava ferorezonanse. Ova osobina savremenih rešenja (neosetljivost) je neuporediva u odnosu na **klasično rešenje**.

U potpuno simetričnom sistemu, tačke N1,N2 su na istom potencijalu pa se shema pod 5.b) može transformisati u šemu pod 5. c). Sad su se stekli uslovi da energetski transformatori uđu u ferorezonansu ( $1.5U_f$ ,  $1.5L_t$ , npr. tačka P na slici 4) a naponski transformator dobije otpornost  $\gg 200 \Omega$  zatvaranjem prekidača P1 pri naponu većem od 33V, što će učiniti savremen uređaj. Na slikama 5.b' i 5.c' je prikazan vektorski dijagram napona u tercijaru u prelaznom i stacionarnom stanju respektivno. Na taj način i u tim trenucima sprečeno je pregorevanje naponskog transformatora tj. osigurači neće zaštititi naponske transformatore od pregorevanja.

## 5. EKVIVALENTNA ŠEMA UREĐAJA ZA SPREČAVANJE I PRIGUŠENJE FEROREZONANSE SA NEKIM TEHNIČKIM KARAKTERISTIKAMA

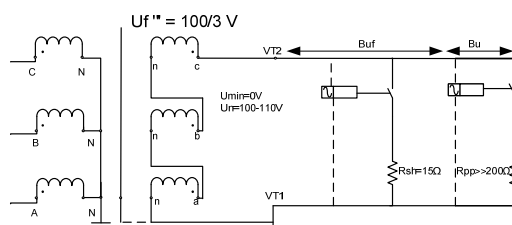
Na osnovu navedenog može se predstaviti savremen uređaj za sprečavanje i prigušenje ferorezonanse sledećom ekvivalentnom shemom kao na slici 6 koji je usaglašen sa IEC 6071-2.

Na slici 6 je:

- samopobudni blok Bu za sprečavanje ferorezonanse pri naponskoj neosetljivosti u mreži za minimalne napone manje od 20%  $U_{nf}$  i 50 Hz

- samopobudni blok Buf za prigušenje ferorezonanse za napone viši od 100 V i frekvencije različite od 50 Hz. VT1, VT2 tačke priključenja na tercijar sloga jednopolno izolovanog naponskog transformatora

Važna napomena za razumevanje ekvivalentne sheme jeste trenutak kada, gledano sa strane tercijara, ekvivalentna otpornost dva paralelno spojena otpornika i to  $R_{sh}$  i  $R_{pp}(\gg 200\Omega)$ , slika 6) postaje manja od manje vrednosti pomenutih otpornika. Ova vrednost otpornosti nestaje sa prestankom ferorezonanse, tj. za  $V_{VT1}-V_{VT2} = 0 V$ .



Slika 6. Ekvivalentna električna shema savremenih uređaja za sprečavanje i prigušenje ferorezonanse

## 6. ZAKLJUČAK

Praktična primena savremenih rešenja dobija na značaju posebno u mrežama srednjeg napona, koje su stare nekoliko desetina godina. Za ovakve mreže potrebno je ulagati u novu opremu kao što su: prekidači, sklopke, mikroprocesorske zaštite, kablovi, nove vrste senzora, kako bi se ovakve pojave suzbile ili eliminisale. Upravo se taj raspon između potreba i mogućnosti, kao i problemi koji evidentno postoje, mogu prevazići ponuđenim prikazanim praktičnim rešenjima, kako bi se vreme zastoja u pogonu smanjilo, što je, u suštini, i najvažnije.

Literatura:

1. Studija br. 328002,1989, „Prenaponi na razvodima srednjeg napona za sopstvene potrebe termoelektrana, posebno na visokonaponskim motorima pri radu prekidača“, ELEKTROTEHNIČKI INSTITUT „NIKOLA TESLA“ Beograd
2. Požar H, 1990, „Visokonaponska rasklopna postrojenja“ Zagreb
3. Zmukuc, C., 2007, „VT Guard presentation sales and technical“
4. Zmukuc, C. 2007, „Ferorezonanse sales“
5. Marsa, Martin, 2012, „VT Guard-an.indd“
6. Keršič N, 1959, „Ferorezonancija“, „Elektrotehnički Vjesnik“, br. 5-6, str.162 biblioteka „Minel Trafo“