

PROBLEMI U RADIJALNOJ MREŽI SREDNJEG NAPONA SA IZOLOVANOM NEUTRALNOM TAČKOM NASTALI USLED 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

SADRŽAJ

Prinudno prigušenje privremenih prenapona u mreži sa izolovanom neutralnom tačkom je moguće ostvariti korišćenjem savremenih uređaja za sprečavanje i prigušenje ferorezonanse u delu razvoda potpomognutim sa pažljivo odabranim odvodnicima prenapona bez iskrišta (MO). Na skraćenje trajanja privremenih prenapona nastalih i od asimetrije (energetski transformator-potrošač) u delu razvoda utiče pravilni izbor zaštite (prekostrujna i zemljospojna) koja mora biti pouzdana i osetljiva.

Dalje, rad daje odgovore na probleme nastale usled drugih asimetrija u mreži manje verovatnoće nastanka nego što su to kruti i intermitirajući zemljospoj.

Ključne reči: ferorezonansa, neselektivnost, zemljospojna usmerena zaštita, naponski transformator, srednjenaponska mreža, transformatorska stanica, odvodnik prenapona bez iskrišta (MO), privremen prenapon (TOV)

UVOD

Prenaponi pri uspostavljanju krutog zemljospoja sa kratkotrajnim dodirivanjem faze (provodnika) sa uzemljenjem i njegovo prekidanje, ne prelaze $2,5 U_f$. Oni ne zavise od karakteristike prekidača, već zavise od trenutka nastanka zemljospoja i parametara razvoda, kao što su: kapacitivnost razvoda, rasute induktivnosti sekundarnog namotaja energetskog transformatora ($L_{\gamma 2}$) i od prigušenja razvoda. Tačnije rečeno, induktivnosti transformatora ($L_{12} = k L_{\gamma 2}$) koja bi uticala na prelazne procese jednaka je srednjoj vrednost zbira dve razlike i to: razlike sopstvene induktivnosti sekundarnog namotaja L_2 i rasute induktivnosti sekundarnog namotaja $L_{\gamma 2}$ i razlike sopstvene induktivnosti primarnog namotaja L_1 i induktivnosti rasipanja primarnog namotaja $L_{\gamma 1}$.

Prenaponi kod isključenja zemljospoja najčešće ne prelaze nominalni napon mreže ukoliko se isključenje dešava pri prolasku struje kroz nulu. Posle isključenja ćelije koja je bila pod zemljospojem, verovatnoća nastanka ferorezonanse (2. subharmonijske) je veća što je kapacitivnost razvoda veća. Zemljospoj pri velikim strujama izaziva manju verovatnoću njenog samogašenja pa zato on duže traje, što će zagrejati mesto kvara i izazvati veće

stacionarne napone na preostalim fazama. Tada zemljospoj može da pređe u dvopolni ili trolni kratki spoj. Drugi način sprečavanja visokih vrednosti struje zemljospoja kod ovih mreža je eliminisanje uzroka nastanka pojave, a to su: razdvajanje mreže na više nezavisnih delova i napajanje istih preko posebnih energetskih transformatora i njeno uzemljenje metalnim otpornikom [3] ili prigušnicom ukoliko je energetski transformator vezan u zvezdu. Stacionarni naponi ispravnih faza u toku zemljospoja su viši ukoliko bi se mreža uzemljila omskim otpornikom. Kod isključenja zemljospoja u ovoj mreži visoki naponi se mogu pojaviti ukoliko dođe do ponovnog paljenja električnog luka pri isključenju prekidača ili kada prekidač prekida struju pre njenog prolaska kroz nulu – tzv. sečenje struje. Ovo je više verovatno kod mreža uzemljenih sa prigušnicom. Uspostavljanje zemljospoja kod obe vrste uzemljenja nult tačke ne prelazi 2,5 Uf. Još jedna mera smanjenja kapacitivne struje zemljospoja je primena tronamotajnog transformatora snage. Za gore pomenuta postrojenja, može se projektom predvideti da se što manje koriste isključenja potrošača na SN strani a više na NN strani.

PROBLEMI U MREŽI SA IZOLOVANOM NEUTRALNOM TAČKOM USLED FEROREZONANSE

Privremeni prenapon je neznatno viši od nominalnog napona mreže industrijske učestanosti ili industrijske učestanosti pridodate ili oduzete harmonicima veće ili niže frekvencije, čije je prigušenje ograničeno. Praktično, privremeni prenapon nastao usled ferorezonanse se prepoznaje u pogonu po treperenju kazaljke voltmetra koji meri frekvenciju titraja faznih napona priključenih na slog naponskih mernih transformatora.

Ferorezonansa svojim prisustvom u mreži sa izolovanom neutralnom tačkom izaziva sledeće probleme:

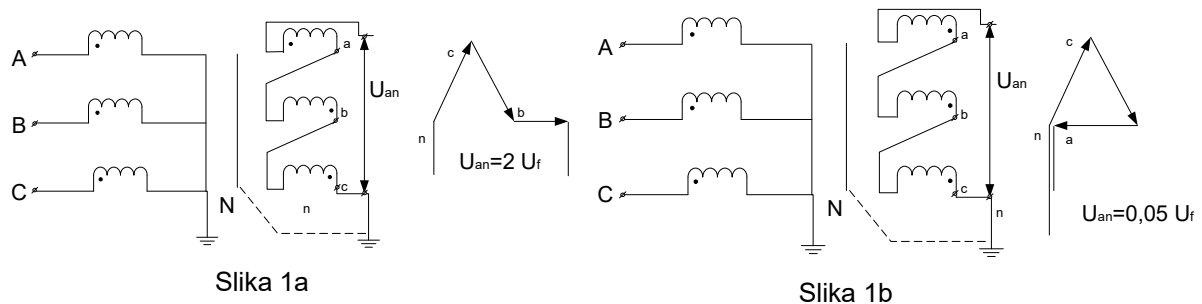
- problem pregorevanja naponskih induktivnih transformatora,
- problem neselektivnog reagovanja zemljospojne usmerene zaštite izvodne ćelije transformatorske stanice,
- problem ometanja rada odvodnika prenapona u mreži sa izolovanom neutralnom tačkom usled privremenih prenapona (TOV)
- problem pri asimetriji energetskog transformatora kao potrošača.

PROBLEM PREGOREVANJA NAPONSKIH INDUKTIVNIH TRANSFORMATORA

Praktično, moguće je da nastanu greške pri održavanju postrojenja sa induktivnim naponskim transformatorima u pogonu pri formiranju sloga ovih transformatora kao što je prikazano na slici 1. Na slici 1a je prikazan vektorski dijagram faznih napona tercijara u slučaju greške nastale prilikom promene mesta homolognih krajeva naponskog transformatora.

Moguće je da se na transformatorskim stanicama zbog povećanog napona koriste naponski transformatori čiji je napon za 5% veći od nominalnog napona mreže. Ako se takav transformator greškom ubaci u slog na mesto (u konzumu) gde se meri napon nominalne vrednosti mreže, nastaje greška koja će dovesti do njegovog pregorevanja. Na slici 1b je prikazan vektorski dijagram napona tercijara kad slog koji čine naponski

transformatori kod kojih je jedan transformator sa višim nominalnim primarnim naponom (npr. umesto 10 kV stavi se 10,5 kV).



Slika 1a) Greška pri montaži sloga, kada je jedan naponski transformator zamenio homologni kraj.

Slika 1b) Greška pri montaži sloga kada jedan naponski transformator ima viši napon primara (5%)

Pregorevanje naponskih induktivnih transformatora (tzv. pucanje) može se podeliti u dve grupe kvara i to :

- Naponski transformatori kod kojih postoji konstrukciona greška u izboru maksimalne relativne magnetne permeabilnosti jezgra. Povećavanjem ove vrednosti (uz povećanje težine i cene), može se sprečiti paralelna ferorezonansa u pomenutoj mreži [2]. Termičko pregrevanje nastaje zbog prezasićenosti magnetnog jezgra (paramagnetizam) usled njegovog dugotrajnog sopstvenog oscilovanja sa kapacitivnošću preostalog dela razvoda pri čemu nastaje smanjenje relativne magnetne permeabilnosti za oko 5600 na oko 1 (podatke je dala jedna fabrika mernih transformatora). Druga subharmonijska ferorezonansa koja je najčešća u pomenutim mrežama (sa velikim kapacitetima mreže), čije su oscilacije približno jednake polovini frekvencije mreže, najčešće je kriva za ovu vrstu pregorevanja naponskih induktivnih transformatora.

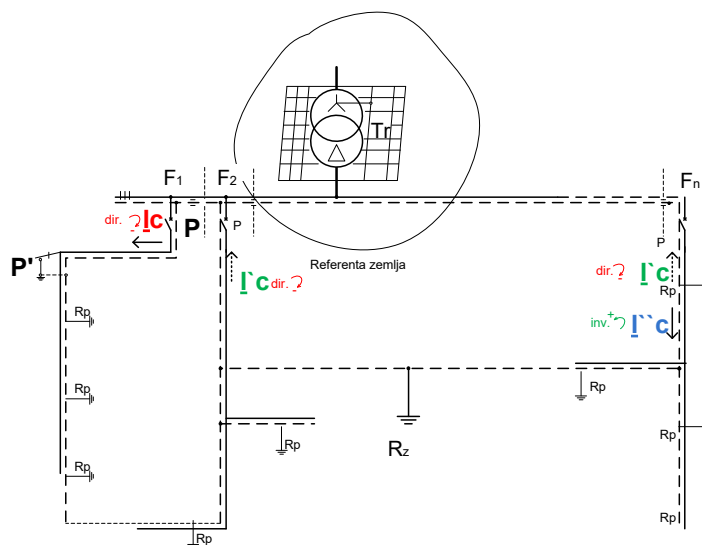
Još opasnija je mrežna neravnomerna ferorezonansa. Jedna faza napona osciluje znatno ispod nominalnog napona mreže. Ta faza koja napaja transformator u slogu naponskih transformatora kao da ga kratko spaja na primarnoj strani. Sa strane tercijara, preostala dva naponska transformatora će napajati primarno kratkospojen namotaj tj. njegov tercijarni namotaj. U tim trenucima, sasvim sigurno brže dolazi do termičkog razaranja jezgra naponskog transformatora a da SN osigurač na primarnoj strani ne pregori, brže nego kada je prisutna 2. subharmonijska ravnomerna ferorezonansa. Za prigušenje i sprečavanje ove vrste ferorezonanse savremeni tehničko tehnološki uređaj za sve vreme oscilovanja i pri frekvenciji od 50 Hz (mrežna ferorezonansa), zadržava otpornik u kolu tercijara znatno veće vrednosti od 200 Ohma [5]. Ova njegova osobina je neuporediva u odnosu na klasično rešenje čija je vrednost otpora za sve vreme prelaznog procesa 20 Ohma, 500 W, što je još nepovoljnije u svakom trenutku za slog naponskih transformatora. Zanimljivo je napomenuti da aktivna otpornost namotaja naponskog transformatora (oko 0.8 kΩ), ne utiče na prugušenje ferorezonanse. Njen uticaj bi bio značajan tek kada bi ta vrednost otpornosti bila za red veličine veća, a to je praktično neizvodljivo.

Bitna osobina naponskih transformatora, za pomenutu mrežu, koju bi trebalo da imaju je faktor napona V_f i naznačeno trajanje $(1,9 U_f / 8h)$.

- Pregorevanje usled neravnomerne raspodele napona duž namotaja transformatora. Naponske prilike koje će uticati na bezbednost naponskog transformatora u pomenutoj mreži stvoriće se kad je u jednom delu razvoda ferorezonansa, a u drugom dela razvoda nastane istovremeno intermitirajući zemljospoj. Sada će privremen prenapon biti čas sa zemljospojem čas bez zemljospoja izazivajući visoke tranzijente kratkog trajanja. Intermitirajući zemljospoji mogu se pojaviti sa visokim prenaponima čija visina zavisi od trenutka uspostavljanja i prekidanja zemljospoja, parametara mreže i prigušenja razvoda. Prenaponi pri uspostavljanju ne prelaze $6 U_f$. Oni mogu oštetiti izolaciju razvoda, motora i uređaja ukoliko ispred njih nema odvodnika prenapona (MO). Stacionarne vrednosti ovih prenapona ne prelaze $3,5 U_f$.

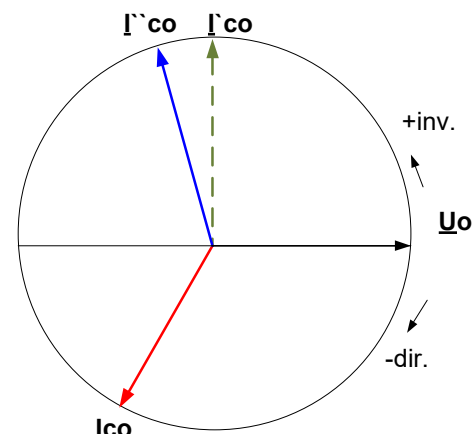
Intermitirajući zemljospoj je opasna pojava i za termička oštećenja uzemljenja postrojenja na konzumu pa i za ljudstvo koje radi na tim poslovima, ukoliko pređe u višestruki zemljospoj ($3,5 U_f$). Jedna od dodatnih mera

zaštite od opasnog napona dodira u pomenutim mrežama i u uslovima zemljospoja jeste izvođenje zaštitnog centralnog uzemljivača za transformatorsko postrojenje naponskog nivoa 110/10(6) kV/kV. U ovom slučaju struja kvara neće teći delom kroz zemlju već kroz metalne veze međusobno povezane električne opreme i metalne mase elektroenergetskih postrojenja koji su povezani preko izvoda (uzemljenje galvanski izolovano povezatati sa ostalim uzemljenjima izvoda). Sada struja kvara ima više puteva na raspolaganju. Ako su ukupni otpori sporednih ogranaka mreže dovoljno mali u odnosu na otpore provodnika kroz koji protiče struja kvara, onda zaštitni provodnik neće dobiti opasni napon prema zemlji. Ovaj sistem treba uzemljiti barem na jednom mestu da bi ga doveli na potencijal zemlje sa uzemljivačem koji ne mora da ima vrednost rasprostiranja veću od 20Ω , zato što kroz njega ne protiče struja kvara i treba ga postaviti izvan oblasti referentne zemlje. Centralni uzemljivač je prikazan isprekidanom linijom na slici 2a.



Rz - Otpor rasprostiranja centralnog uzemljivača
P' - Prekidač za simulaciju krutog zemljospoja
Rp - Otpor rasprostiranja uzemljivača postrojenja

Slika 2a



I_{co} -nulta komponenta struje zemljospoja u razvodu u kome je nastao zemljospoj
 I'_{co} -nulta komponenta struje zemljospoja u ispravnom izvodu u trenutku kada je prisutna I_{co} razvodu
 I''_{co} -nulta komponenta struje zemljospoja u razvodu u kome je nastupila ferorezonansa u trenutku kada nije prisutna I_{co} u mreži

Slika 2b

Slika 2a. Međusobno povezivanje zaštitnih uzemljenja-centralni uzemljivač postrojenja 110/10 (6) kV/kV

Slika 2b. Kompleksna nulta komponenta struje zemljospoja u direktnom i inverznom sistemu pre i nakon ferorezonanse.

PROBLEM NESELEKTIVNOG REAGOVANJA ZEMLJOSPOJNE USMERENE ZAŠTITE IZVODA TRANSFORMATORSKE STANICE

U pomenutim mrežama potrebno je smanjiti vreme isključenja zemljospojnog releja sa porastom struje zemljospoja [4] i smanjiti njegovu vrednost podešenja. Minimalne vrednosti po preporukama su da vreme isključenja izvoda bude ne ispod 0,2 s, a podešenja struje releja ne ispod 1 A, na primarnoj strani. Ovo je potrebno i zbog intermitirajućeg zemljospoja čija brzina otkrivanja zemljospoja i njegovog isključenja sprečava pojavu većeg broja visokih prenapona koji mogu da nastanu kod višestrukog ponovnog gašenja i ponovnog uspostavljanja zemljospoja. Izabrana zaštita mora da bude pouzdana.

Na slici 2b prikazano je neselektivno isključenje izvoda (Fn). Ako se simulira krut zemljospoj sa kratkotrajnim spajanjem faznog provodnika (P') sa zemljom i njegovo prekidanje (P), nastupiće u takvoj mreži sledeće:

- Kapacitivna struja „puni“ mesto kvara, tj. struja I_c (njena odgovarajuća nulta komponenta I_{c0}) koja ide od sabirnica (direktan sistem) ka mestu kvara i izaziva proradu zemljospojnog usmerenog releja u izvodu .

- Ovo isključenje krutog zemljospoja u izvodu F1 stvoriće jedan od uslova, da se u mreži dogodi ferorezonansa. Sada je otpor prigušenja razvoda u trenucima uspostavljanja zemljospoja tj. pre ferorezonanse, dostigao relativno visoku vrednost ako nema odvodnike prenapona u delu razvoda.

- Kapacitivna struja I'_c (njena odgovarajuća nulta komponenta I'_{c0}) izvoda pre pojave ferorezonanse u ostalim „zdravim“ izvodima blokira zemljospojni relej na početku radijalnog voda, jer ona ide ka sabirnici (direktan sistem).

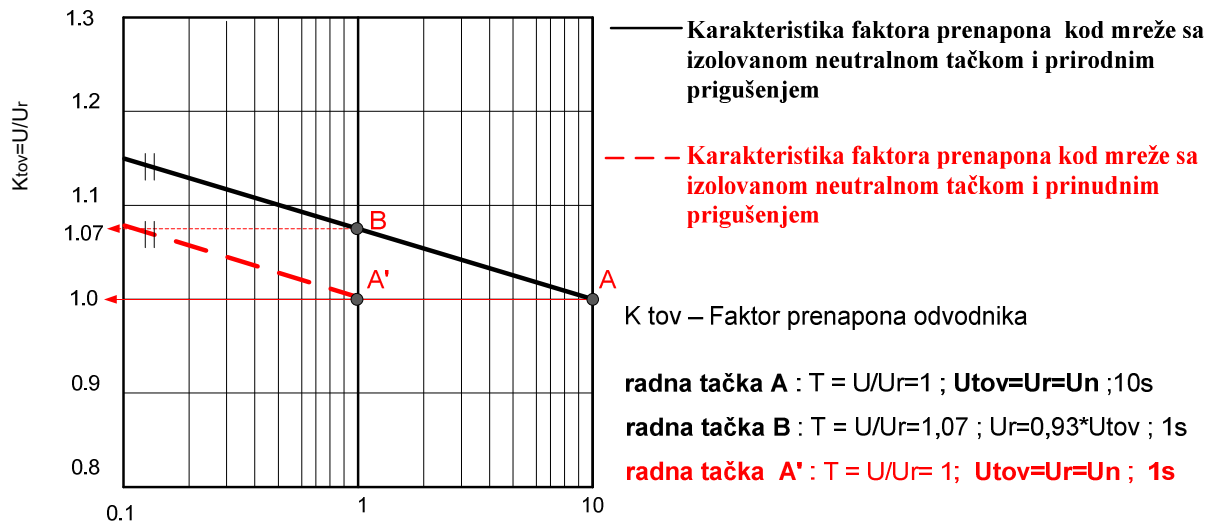
- Kada u izvodu Fn nastupi ferorezonansa, posle ispada izvoda F1, doći će do promene faznog reda struja pa će njihova nulta komponenta I''_{c0} promeniti smer rotacije u odnosu na nultu komponentu napona. Sada će struja I''_{c0} sa pretežno induktivnim faznim stavom proteći od sabirnica ka naponskom transformatoru u inverznom sistemu napona (+). Drugim rečima, prednjačenje nulte komponente struje u direktnom smeru isto je što i prednjačenje nulte komponente struje u inverznom sistemu u odnosu na nultu komponentu napona što se tiče zemljospojne usmerene zaštite [2]. Ukoliko bi to blokirali (neke numeričke zaštite to mogu da urade), onda bi se povećala verovatnoća pregorevanja opreme i uređaja ako bi i u drugom delu npr. razvoda nastupio intermitirajući zemljospoj koji je u ovoj mreži najviše verovatan i najveći nedostatak. Skuplje rešenje je svuda u razvodu primeniti umesto mernih induktivnih transformatora, bezmagnetne senzore i njima pridodati odgovarajuću procesorsku zaštitu.

PROBLEM OMETANJA RADA ODVODNIKA PRENAPONA U MREŽI SA IZOLOVANOM NEUTRALNOM TAČKOM USLED PRIVREMENIH PRENAPONA (TOV)

Prema standardu IEC 60071-2, trajni radni napon U_c zavisi i od vremena trajanja kvara, bez obzira na vrstu uzemljenja sistema. U mrežama sa izolovanom neutralnom tačkom privremeni prenapon se smatra trajnim i uzima se da je trajni radni napon odvodnika (U_c) jednak ili viši od najvišeg (maksimalnog) linijskog napona sistema. Visina faznih napona u toku ferorezonansnih oscilacija [2] zavisi od: vrednosti kapaciteta provodnika mreže prema zemlji; od oblika u-i karakteristike magnećenja naponskog ili energetskog transformatora (potrošač) ili armiranog opleta od čelične žice ili trake kod podzemnih kablova i otpora prigušenja razvoda. Sa slike 3. može se primetiti da su dozvoljene amplitude pri naznačenom opterećenju privremenih prenapona na odvodniku veće što je njihovo trajanje kraće i obrnuto. Pošto je u mrežama sa izolovanom neutralnom tačkom, amplituda privremenog prenapona najčešće oko nominalnog napona mreže onda možemo uticati prinudno (sa savremenim uređajima za prigušenje) na njeno trajanje. Ovaj uređaj jednog poznatog svetskog proizvođača je usaglašen sa standardom o koordinaciji izolacije i time se garantuje da će sve privremene prenapone oko nominalnog napona mreže i trajanja do 1 s uspešno prigušiti.

Kao primer, navodi se u daljem tekstu ovakvo rešenje mreže kod koje je naznačeni napon odvodnika jednak ili viši od najvišeg ekvivalentnog privremenog prenapona u mreži preko karakterističnih tačaka sa slike 3.

Na slici br. 3 radna tačka A na karakteristici faktora prenapona odvodnika prenapona nastaje u mreži u trenutku kada su amplitude privremenog prenapona (u trajanju od 10 s) i nominalnog napona mreže jednaki posle naznačenog opterećenja (60°C). Ovo važi u mreži sa izolovanom neutralnom tačkom kod koje se ne vrši prinudno prigušenje sopstvenih ferorezonantnih oscilacija dela razvoda tj. u mreži sa prirodnim prigušenjem. Pod tim uslovima je $K_{tov}=1$, $U_n=U_r=U_{pr}=1$. Ova karakteristika je prikazana punom linijom.



Slika 3. Ekvidistantne karakteristike faktora prenapona različitog trajanja

- Na slici br. 3 radna tačka A' na karakteristici faktora prenapona drugog odvodnika prenapona koji je prethodno bio opterećen naznačenim opterećenjem (60°C) sa nižim naznačenim naponom (u odnosu na prethodni odvodnik koji je predstavljen punom linijom) i u istoj mreži, ali sa prinudnim prigušenjem mreže (koristeći savremene uređaje za prigušenje ferorezonanse tj $U \sim U_n$; $t \sim 1s$), pri $U_n = U_r = U_{pr} = 1$. Karakteristike faktora prenapona u mreži sa prirodnim i prinudnim prigušenjem u istoj mreži su ekvidistantne posle naznačenog opterećenja oba odvodnika prenapona.

- Radna tačka B na karakteristici faktora prenapona predstavlja dozvoljenu veličinu amplitude privremenog prenapona na odvodniku u trajanju od 1 s koja može da bude uvećana za 7% u odnosu na nominalni napon mreže posle naznačenog opterećenja (60°C). tj. $K_{tov} = 1,07$.

Privremen prenapon je karakterističan po amplitudi (U_{tov}) i njenom obliku, trajanju (t_{tov}) i frekvenciji oscilovanja. Pošto privremeni prenaponi imaju različita vremena trajanja u mreži, možemo ih predstaviti ekvivalentnim privremenim prenaponima amplituda U_{ekv} u trajanju nazivnog opterećenja do 10 s:

$U^i 10_{ekv} = U^i t_{tov} (t_{tov} / 10)^{0,022} = 0,950 U^i t_{tov} (t_{tov})^{0,022} = 0,950 U_{1ekv}$, gde je konstanta 0,022-0,18 za MO odvodnik bez iskrišta, $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Ako bi privremeni prenapon trajao do 1 s, zadržavajući istu amplitudu U_{tov} , (prelazak tačke A u tačku A') u poređenju sa odvodnikom čija je karakteristika na tački A' tj. sa nižim naznačenim naponom, onda bi ekvivalentni privremeni prenapon bio

$U^i 1_{ekv} = 1,05 U^i 10_{ekv}$, $i=1,2,3,\dots$, pa bi kriterijum za izbor najvišeg naznačenog napona bio

$U_r \geq \max (U^1_{ekv}, U^2_{ekv}, U^3_{ekv}, \dots)$, [kV]

a za naš slučaj ekvidistantnih karakteristika faktora prenapona, naznačeni napon odvodnika (istog proizvođača) je $U_r = U^1_{ekv} = 1,05 U_n$ [kV].

Izbor odvodnika prenapona u mreži sa prinudnim prigušenjem svodi se na izbor prvog višeg naznačenog napona odvodnika iz kataloga u odnosu na nominalni napon mreže. Najčešće, proizvođači odvodnika prenapona imaju u svojim katalogima odvodnike čije su naznačene vrednosti napona (U_r) za oko 5% više od nominalnog napona mreže. Sa druge strane, ukupno smanjenje naznačenog napona odvodnika (MO) posle istog naznačenog opterećenja u odnosu na kriterijum $U_c = U_m$ [7] je za 14,3% ($1,2/1,05$) niže u mreži sa prinudnim prigušenjem. Tako izabran odvodnik prenapona ima naznačeni napon u odnosu na fazni napon brojno jednak

$U_r \max / U_f = 1,05 U_n / U_f = 1,05 \cdot 1,73 = 1,82$, što je manje od $1,9 U_f$.

Ovaj podatak je značajan jer za sve vrednosti više od faktora napona naponskog transformatora, dolazi do njihovog zasićenja, pa je to najčešće uzrok 2. subharmonijske ferorezonanse pri krutim zemljospojima ($2,5 U_f$). Takođe, ova formula ima veliki značaj i kod intermitirajućih ($6 U_f$) zemljospoja.

Tako odabran odvodnik prenapona može sprečiti i pojavu mrežne ferorezonanse. Da bi se to dokazalo analiziramo paralelno G , $L(\mu)$, C (kao model za izolovanu mrežu sa naponskim transformatorom) kolo čiji bi modul admitanse bio

$$|Y| = (G^2 + (C\omega - 1/\omega L(\mu))^2)^{0.5}$$

Ako bi efektivna vrednost napona na krajevima mreže ovog RLC kola u propusnom opsegu

$$U > U_{\max} / \sqrt{2} = I / G * \sqrt{2}, \text{ tada bi granične vrednosti učestanosti ovog opsega dobili iz jednačine}$$

$$I / ((G^2 + (C\omega - 1/\omega L(\mu))^2)^{0.5}) = I/G * \sqrt{2}$$

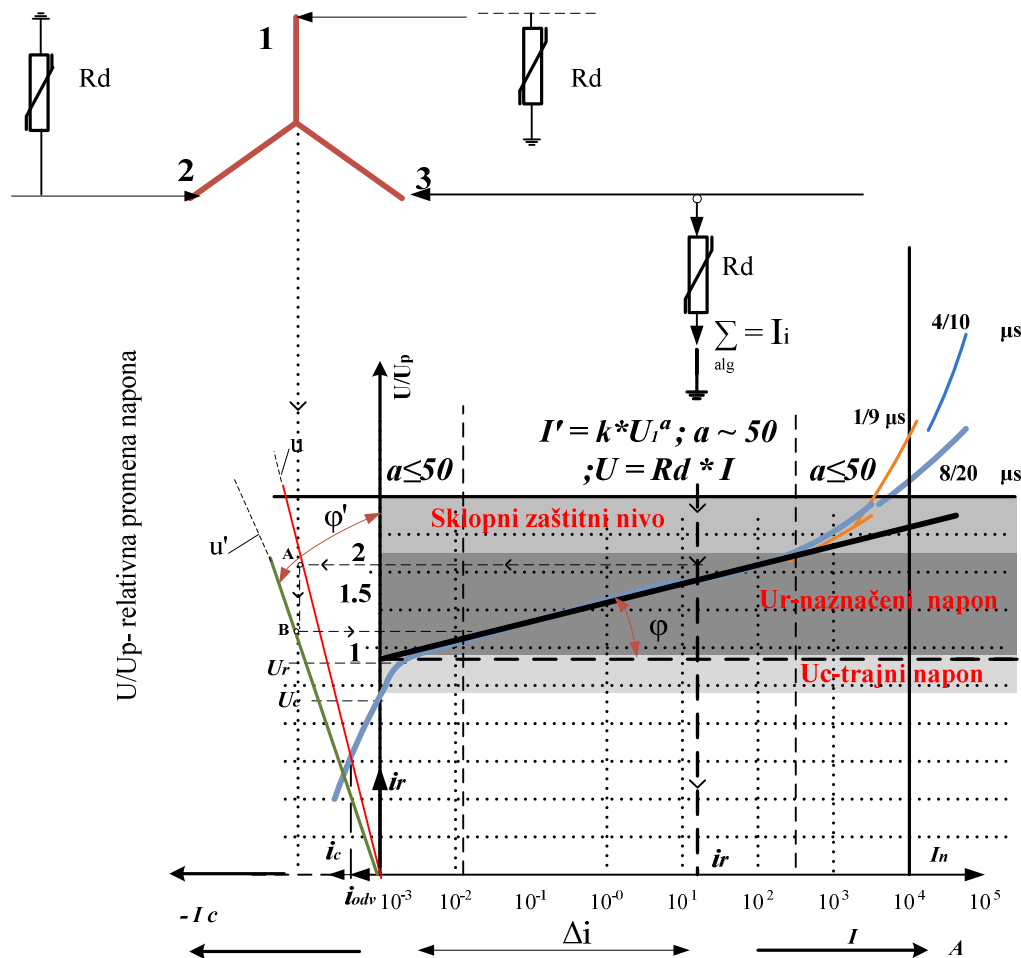
a širina propusnog opsega učestanosti ovog RLC filtra

$$\Delta\omega = \omega^1 - \omega^2 = G/C \text{ a za } \omega_s = \omega_{50} = (1/LC)^{0.5}, \text{ i pri } L(\mu) = L_z$$

$$\text{ili, ona postaje } \Delta\omega = \omega_{50}^2 * L_z * G$$

Širina propusnog opsega ovakvog filtra zavisiće od provodnosti G što je u našem slučaju provodnost odvodnika prenapona MO koja može biti funkcija prigušenja razvoda (ukoliko je ona za red veličine manja od provodnosti odvodnika prenapona), tj. karakteristike u -i odvodnika prenapona i brzine ulaska naponskog transformatora u zasićenja L_z . Što je provodnost G odvodnika prenapona veća tj. što je manja nelinearna aktivna otpornost ($R_d = 1/G$) odvodnika prenapona (sa izborom nižeg naznačenog napona odvodnika, manja je vrednost R_d), širina propusnog opsega je još veća, pa je manja verovatnoća nastanka mrežne ferorezonanse (ω_{50}).

Na slici 4. prikazana je mogućnost smanjenja pojave uspostavljanja prenapona pri krutom ili intermitirajućem zemljospoju, svođenjem karakteristike uspostavljanja prenapona (u). Svođenje pomenute karakteristike tj. smanjenje njene temene vrednosti i njenog nagiba ($\varphi' = \arctg(f(R_d))$ - ugao pri reagovanju odvodnika prenapona) nižu vrednost može se ostvariti otpornošću odvodnika prenapona koji bi u tom trenutku provodio pri istoj vrednosti kapaciteta mreže (C). Niža vrednost karakteristike uspostavljanja napona sa vrednosti karakteristika uspostavljanja prenapona pre (u) i nakon reagovanja odvodnika (u') spušta radnu tačku iz vrednosti A na vrednost B sa odgovarajućim padom napona ($U_a = V_a - V_b$). Ovo je moguće pri povećanim vrednostima aktivne komponente struje zemljospoja (I_r) (povećava se i ukupna kapacitivna struja zemljospoja I_c). Ovo je prikazano na Sl. 4 kao promena aktivne i kapacitivne komponente struje – Δi .



Slika 4. u-i karakteristika odvodnika prenapona (MO) i karakteristike uspostavljanja prenapona pre (u) i nakon (u') reagovanja odvodnika prenapona (MO)

U mrežama sa prinudnim prigušenjem i nižim naznačenim naponom odvodnika (MO) možemo: smanjiti verovatnoću visokih prenapona u mreži, smanjiti verovatnoću nastanka intermitirajućih i krutih zemljospoja, sniziti stacionarne napone ispravnih faza u toku zemljospoja pa time i smanjiti verovatnoću višestrukih zemljospoja, obezbediti manju verovatnoću nastanka i mrežne ferorezonanse, nego u slučaju izolovane mreže ($I_r < 0.1 \cdot I_c$). Tada je mreža sa izolovanom neutralnom tačkom sa nižim preostalim naponom odvodnika (za istu vrednost naznačene struje odvodnika) pa je i manje otporna prema privremenim prenaponima (veća cena odvodnika) u tom delu razvoda.

Sličan efekat se može ostvariti svođenjem karakteristike uspostavljanja prenapona (u) Sl.4 povećavanjem ukupne kapacitivnosti razvoda C tj povećavanjem njenog ugla $\phi = f(C, R_p, k L \gamma^2)$, zadržavajući pri tome isto prigušenje razvoda R_p kao i međusobnu induktivnost energetskog transformatora ($L_{12} = k L \gamma^2$). Ovo se može postići praktično, uključanjem izvoda transformatorske stanice sa kablom u praznom hodu (a da odvodnika nema u razvodu). U ovom slučaju taj izvod ne bi bio projektovan za tu namenu.

Iz svega gore pomenutog, prisustvo odvodnika prenapona u ovim mrežama utiče na prelazne pojave pri uspostavljanju prenapona za sve vrednosti veće od vrednosti provodjenja odvodnika prenapona. Asimetrija u pogonu ne bi uticala na provođenje odvodnika prenapona, jer je napon asimetrije tek na $1.5 U_f$. (u odeljku d).

Važno je i napomenuti da će odvodnici prenapona, ovako odabrani (sa nižim naznačenim naponom), aktivno učestvovati sa svojom nelinearnom otpornošću (R_d) u prigušenju (smanjenju vremena trajanja) oscilacija privremenih prenapona potpomognuti savremenim uređajem koji se nalazi u razvodu.

PROBLEMI PRI ASIMETRIJI ENERGETSKOG TRANSFORMATORA KAO POTROŠAČA

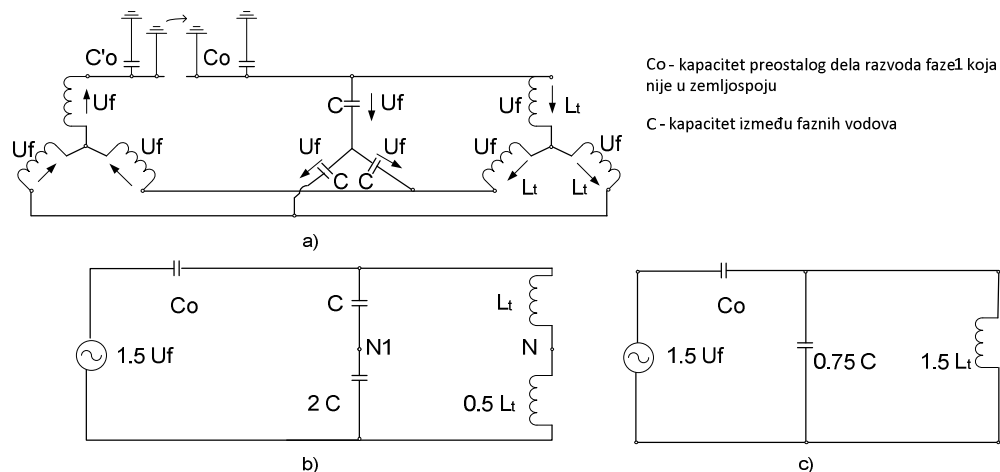
Privremeni prenapon usled ferorezonanse može nastati u mrežama niskog i srednjeg napona sa izolovanom neutralnom tačkom posle isključenja zemljospoja i u mrežama sa direktno uzemljenom neutralnom tačkom pri uključenju energetskog transformatora velike snage (110/10 kV/kV) u praznom hodu. Pri tome najveću verovatnoću nastanka ima 2. harmonijska ferorezonansa. Ova pojava može da izazove visoke prenapone pri uspostavljanju uključenja (3.5 U_f) transformatora i da pri tome reaguje odvodnik prenapona koji se nalazi na priključnim krajevima sredjenaponske strane ovog transformatora. Iako vrlo retka pojava, uključenje transformatora velikih snaga vrši se u praznom hodu najčešće posle završetka remontnih aktivnosti ovih postrojenja. Velika struja magnećenja jezgra (kao asimetrija) koja može biti i nekoliko puta veća od nominalne struje transformatora izazvaće prelazne pojave koje mogu trajati od nekoliko perioda pa do nekoliko sekundi, zavisno od tipa i veličine transformatora [6]. Neke numeričke zaštite imaju mogućnost blokiranja ispada transformatora pri povećanoj pojavi 2. harmonika u toj fazi ili samo blokadu ispada te faze. Budući da velika struja i u vrlo kratkom trajanju može da ošteti namotaje transformatora, određenim parametrom zaštite određuje se maksimalna vrednost struje kod koje se dozvoljava blokada prvih stepena prekostrujnih zaštita. Ovaj primer predstavlja najveću asimetriju tj. najgori slučaj u mrežama sa izolovanom neutralnom tačkom srednjeg napona ali je uzrok ferorezonanse na visokonaponskoj strani.

U mreži sa izolovanom neutralnom tačkom, retke su pojave ferorezonanse nastale između induktivnosti energetskog transformatora (potrošač) i kapacitivnosti dela razvoda [1] nastale u sledećim slučajevima:

- prekid faznog provodnika sa i bez spajanja jednog njegovog kraja sa zemljom,
- nepunofazni režim rada (jedan ili dva pola prekidača nisu uključila, odnosno isključila),
- pregorevanje topivih umetaka SN osigurača na pogonu.

Slučaj velike asimetrije u mreži je prikazan na Sl.5. U prelaznom režimu trofaznu nesimetričnu mrežu (Sl.5.a) možemo pretvoriti u ekvivalentnu jednofaznu na osnovu toka struje u shemi Sl.5.b. Sada će sa ekvivalentnim naponom mreže od 1,5 U_f biti smanjenje induktivnosti energetskog transformatora (0,5 L_t).

U potpuno simetričnom sistemu, tačke N1, N2 su na istom potencijalu pa se shema pod Sl.5.b) može transformisati u shemu pod Sl.5. c). Sada su se stekli uslovi da energetski transformator (kao potrošač) uđe u ferorezonansu (1,5 U_f , 1,5 L_t).



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

ZAKLJUČAK

Iako retko nastaju, privremeni prenaponi nastali usled ferorezonanse ne izazivaju velika oštećenja u delu razvoda i na opremi u mreži sa izolovanom neutralnom tačkom, ukoliko kratko traju. S druge strane, oni ograničavaju izbor odvodnika prenapona. Ovaj rad se zasniva na iznošenju problema koji ukazuju na to da treba koristiti razne mogućnosti tehničkih karakteristika pojedinih uređaja u pogonu kako bi pomenute pojave sprečili u njihovom nastanku. Na taj način, za određene pojave, zbog nesavršenosti mreže sa izolovanom neutralnom tačkom, postavljamo što više „prepreka“ koje treba da spreče njihov dalji razvoj. Ovaj rad to jednim svojim delom teoretski dokazuje, koristeći tuđa iskustva koja su usaglašena sa standardom o koordinaciji izolacije, dok su svi ostali navedeni primeri iz prakse autora.

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. Stručni rad, CIRED, 2014. „Unapređenje procesa održavanja radijalne mreže srednjeg napona sa izolovanom neutralnom tačkom primenom savremenih uređaja za sprečavanje i prigušenje ferorezonanse“, Svetislav LJ. Miloradović, grafik br.4.
3. Stručni rad, UDK: 621.3.015.3, „Struje i prenaponi pri uspostavljanju i prekidanju zemljospoja u 10 kV mreži grada Niša“, ELEKTROTEHNIČKI INSTITUT „NIKOLA TESLA“ Beograd, Petar Vukelja, Jovan Mrvić, Dejan Hrvic
4. Propisi, 2001, ELEKTROENERGETSKI PROPISI KROZ STANDARDE, ZAKONE, PRAVILNIKE I TEHNIČKE PREPORUKE, SMEITS, Gojko Dotlić, strana 353
5. Brošura, 2007, „VT Guard presentation sales and technical“ ABB
<http://documents.mx/documents/vt-guard-abb-presentation.html>
6. Transformatori, 1961, Anton Dolenc, Sveučilište u Zagrebu
7. Priručnik, maj 2011, “Overvoltage protection Metal oxide surge arresters in medium voltage systems“, ABB,
https://library.e.abb.com/public/70e9fd6933c8c644c12578d200333cb5/952_abb_awr_mittelspannung_E_low.pdf
8. Stručni rad, Požarevac 1985, “Održavanje elektroenergetskih objekata u elektrodistribuciji”, Ljubiša Miloradović

**PROBLEMS IN RADIAL MEDIUM VOLTAGE NETWORKS WITH ISOLATED NEUTRAL POINT
CAUSED BY FERRORESONANCE**

S. MILORADOVIĆ, BC “THERMAL POWER PLANTS AND OPEN-PIT MINES KOSTOLAC” Ltd

M. STANKOVIĆ, BC “THERMAL POWER PLANTS AND OPEN-PIT MINES KOSTOLAC” Ltd

SERBIA

SUMMARY:

Forced damping of temporary overvoltages in the network with isolated neutral systems is possible by using modern devices for preventing and damping ferroresonance part in network assisted by carefully selected surge arresters without gaps (MO). Shortening of the duration of the temporary overvoltage arising from the asymmetry (energy transformer - consumer) in the part of the network is also influenced by the correct choice of protection (overcurrent and earth fault protection) which must be reliable and sensitive.

Furthermore, the work provides answers to the problems caused by other asymmetries in the network of less likely occurrence than the metallic and intermittent grounding .

Key words: ferroresonance, damping resistor, non-selectivity, directional earth-full protection, voltage transformer, grounding, medium voltage network, transformer substation, surge arrester without gaps (MO), temporary overvoltage (TOV).