

Primena metode frekvencijskog odziva transformatora za detekciju deformacija jezgra i namotaja energetskih transformatora

SAŠA D. MILIĆ, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Beograd

DENIS M. ILIĆ, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Beograd

Stručni rad

UDC: 621.614

U radu je prikazana analiza frekvencijskog odziva transformatora (Sweep Frequency Response Analysis-SFRA) kao metode za snimanje frekvencijskog odziva namotaja transformatora u cilju prepoznavanja potencijalnih defekata u geometriji jezgra i namotaja, poput pomeraja jezgra, kratko spojenog ili otvorenog navojka, neželjenih kontakata jezgra sa masom i sl. Izvršena je uporedna analiza pomenute metode sa klasičnim metodama. Prednosti SFRA metode su velika pouzdanost i ponovljivost merenja, i pripadnost kategoriji neinvazivnih metoda. Zbog velike pouzdanosti i ponovljivosti merenja, metoda se pokazala izuzetno pogodnom za utvrđivanje promene u geometriji namotaja i jezgra pri profilaktičkim ispitivanjima na terenu, u pogonu ili nakon transporta transformatora.

Ključne reči: analiza frekvencijskog odziva, energetski transformator, SFRA, deformacije namotaja

1. UVOD

Neosporni je društveni značaj proizvodnje i prenosa električne energije. Osnovnu energetsku proizvodno-prenosnu jedinicu čine generator i transformator. Uloga energetskih transformatora, sa proizvodne strane, je da podižući napon omoguće prenos električne energije na velike udaljenosti uz minimalne gubitke, a zatim, na distributivnoj strani, da spuste naponski nivo na vrednost prihvatljivu za distribuiranje i potrošnju.

Kada se desi neki havarijski proces na energetskom transformatoru, pored troškova popravke i mogućeg oštećenja opreme koja se nalazi u blizini havarisanog transformatora (ukoliko dođe do požara ili eksplozije), veliki problem predstavljaju ekonomski gubici nastali usled neisporuke električne energije. Ovakvi kvarovi se direktno destabilišuće reflektuju na tržište električne energije. Zbog velike pouzdanosti i ponovljivosti merenja, SFRA metoda se pokazala izuzetno pogodnom za utvrđivanje promene u geometriji namotaja i jezgra pri profilaktičkim ispitivanjima na terenu, u pogonu ili nakon transporta transformatora [1 - 4]. U radu su dati rezultati merenja velikih energetskih transformatora sa karakteristi-

čnim rezultatima koji se odnose na merenja pre i posle pojave kvara.

2. TEHNIČKI ASPEKT I PROBLEMATIKA

Energetski transformatori se projektuju tako da imaju sposobnost da izdrže povremena mehanička prenaprezanja predviđena u normalnom pogonu (elektromagnetne sile koje vladaju između namotaja i jezgra, unutrašnje i spoljašnje vibracije, magnetostrikcija, kratak spoj, prenaponi, udar groma, temperaturne razlike...), kao i mehaničke sile i vibracije koje se javljaju pri transportu transformatora.

Većina prenaprezanja u pogonu je prouzrokovana kratkim spojevima u sistemu koji uzrokuju velike elektromehaničke sile, radijalne i aksijalne, koje naprežu namotaje i mogu izazvati njihove trajne deformacije.

Svako transportovanje energetskih transformatora, pre svega zbog njihovih velikih dimenzija, predstavlja potencijalni uzrok deformacija jezgra i namotaja usled oštećenja odstoynika i utezača magnetnog jezgra. Ukoliko u jednom trenutku dođe čak i do minimalnog oštećenja, odnosno ukoliko se na bilo koji način pokvari projektovana geometrija transformatora, njegova sposobnost da podnese svaki sledeći „udar“ značajno slabi, tako da npr. naredni kratak spoj u blizini transformatora bi mogao da dovede do izuzetno velikih mehaničkih i električnih oštećenja transformatora i do kvara sa velikim tehnološkim posledicama.

Adresa autora: Saša Milić, Elektrotehnički institut, „Nikola Tesla“, Beograd, Koste Glavinića 8a

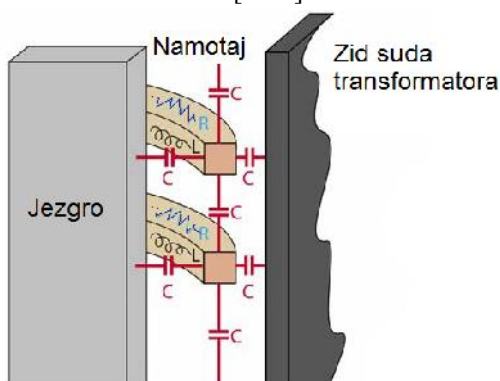
Rad primljen: 04.06.2014.

Rad prihvaćen: 09.07.2014.

Potencijalni problemi kod energetskih transformatora se ogledaju u dve najčešće prisutne činjenice: starost transformatora i nedovoljna rezerva pri projektovanju novih transformatora usled želje za uštedom. Iz prethodno navedenog proizilazi da je neophodno imati uvid u njihovo stvarno stanje i obezbediti sistematsko praćenje vitalnih parametara svakog transformatora ponaosob.

Vizuelni pregled aktivnog dela energetskog transformatora se vrši kroz revizione otvore i predstavlja prilično skup i dugotrajan zahvat u toku kog se vrši istakanje ulja iz transformatora. Osnovna mana ovog načina pregleda je u ograničenju koje je uslovljeno veličinom otvora i nemogućnosti pregleda kompletne unutrašnje strukture jezgra i namotaja (moguće je videti samo mali deo namotaja i delova za utezanje jezgra i odstoynika). Usled pomenutog nedostatka, najčešće je potrebno vađenje kompletnog aktivnog dela transformatora, kako bi se ustanovio kvar. Prethodno pomenute dijagnostičke procedure su uslovile i razvoj SFRA kao neinvazivne merne metode koja je razvijena na bazi frekventijskog odziva namotaja transformatora. Pomenuta metoda predstavlja značajan napredak u ispitivanju transformatora [2, 3] jer omogućava, u većem broju slučajeva, detektovanje i praćenje razvoja nepravilnosti u geometriji jezgra i namotaja. Metoda je neinvazivna i ne zahteva nikakvu posebnu pripremu transformatora (otvoranje i sl.) osim njegovog isključenja sa mreže i razvezivanje priključaka.

Tehnika analize frekventijskog odziva posmatra transformator kao mrežu raspodeljenih RLC parametara (slika 1) čije su vrednosti određene osobinama upotrebljenih materijala, geometrijom namotaja, jezgra i suda transformatora [3 - 6].

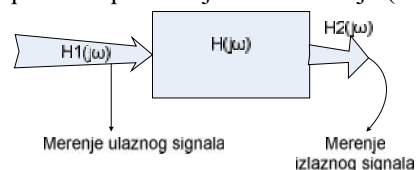


Slika 1 - Raspored RLC komponenti namotaja

Parametar R predstavlja sve aktivne otpore koji potiču od omskih otpora namotaja, dielektričnih gubitaka i gubitaka usled vihornih struja. Parametar L predstavlja međusobne induktivnosti između namotaja i samoinduktivnosti pojedinačnih namotaja. Parametar C predstavlja kapacitivnosti između navojaka istog namotaja, kapacitivnosti između navojaka dva

različita namotaja i kapacitivnosti navojaka prema uzemljenim delovima transformatora [1, 2, 3, 4]. Ovi elementi formiraju brojna redno-paralelna rezonantna kola koja zajedno definišu frekventijski odziv namotaja.

Ukoliko se na bilo koji način izmeni prvobitna geometrija ili se usled procesa starenja izmene osobine materijala u transformatoru, promeniće se i vrednosti ovih parametara, a samim tim i frekventijski odziv. SFRA metoda, kao pobudni signal, koristi prostoperiodične sinusoidalne signale konstantne amplitude i promenljive frekvencije (slika 2).



Slika 2 - Blok dijagram snimanja prenosne funkcije

Odnos izlaznog signala $H_2(j\omega)$, i ulaznog signala $H_1(j\omega)$ za svaku frekvenciju pobudnog signala predstavlja frekventijsku karakteristiku namotaja (1,2):

$$H(j\omega) = H_2(j\omega) / H_1(j\omega) \quad (1)$$

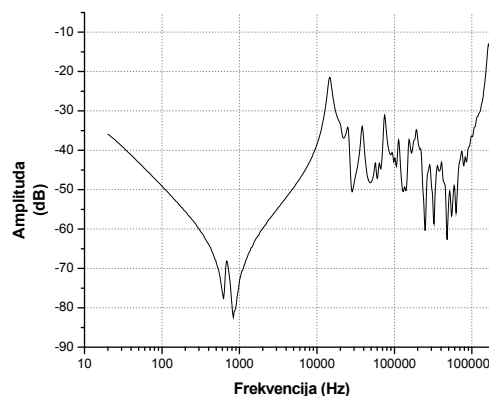
odnosno, u decibelima:

$$A = 20 \log |H(j\omega)| \quad (2)$$

Frekventijski odziv u sebi nosi i informaciju o faznom pomeraju između izlaznog i ulaznog signala (3).

$$\varphi = \arg(H(j\omega)) \quad (3)$$

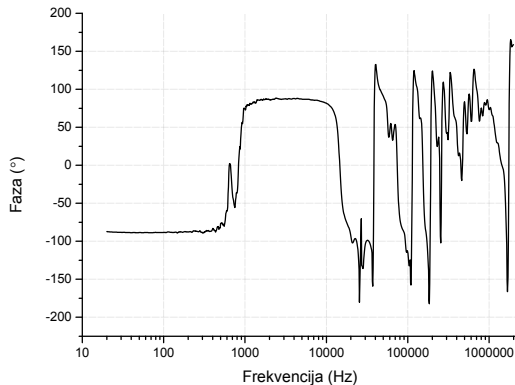
Kako bi analiza rezultata bila uspešnja sa ciljem detekcije bilo kakve neregularnosti, prate se amplitudska i fazna karakteristika odzivnog signala (slike 3 i 4).



Slika 3 - Frekventijskog odziva jedne faze VN namotaja transformatora sprege Y_{nd}

Snimanje faznih i amplitudskih karakteristika je od vitalnog interesa za analizu rezultata kako bi se u potpunosti razumeli mogući problemi u geometriji namotaja. Trenutno se u praksi dominantno izvode

zaključci na osnovu amplitudskih karakteristika, međutim, ubrzano se razvijaju nove teorije koje naglašavaju upotrebu upravo fazne karakteristike pri donošenju zaključaka o stanju geometrije aktivnog dela transformatora [2, 7, 8].



Slika 4 - Fazna k-ka frekvencijskog odziva jedne faze VN namotaja transformatora sprege Ynd

3. PRAKTIČNA PRIMENA SFRA METODE

SFRA metoda se primenjuje:

- pri fabričkim testiranjima,
- u eksploatacionim (pogonskim) uslovima,
- u laboratorijskim uslovima.

U fabričkim ispitivanjima SFRA metoda se koristi kao kontrolno-uporedna metoda u proizvodnji transformatora. Proveravaju se karakteristike svakog novoproducenog transformatora iz iste serije sa ciljem da se detektuju eventualna neželjena odstupanja. U toku fabričkih ispitivanja se pomoću ove metode pravi i obavezni referentni snimak za svaki transformator „fingerprint“ koji služi kao osnova budućih profilaktičkih ispitivanja. SFRA metoda koristi ispitne napone nižih vrednosti [1-4] čime je omogućeno merenje i snimanje odziva namotaja bez prethodnog nalivanja ulja u transformator, pre transporta. Primena SFRA ne uslovljava montažu originalnih VN izolatora, već se u svrhe snimanja odziva, pre nego što se transformator otpremi iz fabrike, mogu montirati mali, pomoćni izolatori čime se dodatno pojednostavljuje merenje u fabričkim i laboratorijskim uslovima.

Pri merenjima u eksploatacionim (pogonskim) uslovima na terenu, metoda SFRA se koristi, kako bi se utvrdile moguće deformacije nastale tokom transporta, montaže ili posle nekog eksploatacionog perioda za koji se sumnja da je u toku njega bilo značajnih poremećaja (kratki spojevi, atmosferska pražnjenja, velike vibracije...). Rezultati ovih merenja se takođe poredi sa referentnim rezultatima sa ciljem provere da li je došlo, i u kojoj meri ako jeste, do neke povrede geometrije namotaja i jezgra. Kao refe-

rentni rezultati poželjno je koristiti fingerprint transformatora, ukoliko postoji. U suprotnom, dobijeni odzivi se poredi sa odzivima dobijenim pri prethodnom ispitivanju, ili se poredi međufazno. Moguće je, takođe, porediti odzive transformatora istog tipa iz različitih postrojenja.

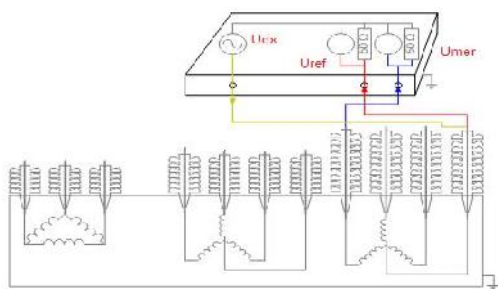
U toku eksploatacije, moguće su incidentne situacije poput bliskog kratkog spoja, udara groma, bilo kakvih seizmičkih i sličnih pojava koje mogu ugroziti unutrašnji geometrijski integritet aktivnog dela transformatora. Merenja se preporučuju i prilikom redovnih profilaktičkih ispitivanja, kako bi se blagovremeno uočili defekti na namotaju ili jezgru. Pre početka snimanja frekvencijskog odziva namotaja potrebno je izvršiti pripremu transformatora koja podrazumeva kompletno razvezivanje priključaka transformatora i osiguranje kvalitetnog uzemljenja transformatorskog suda.

Potrebno je da svi namotaji budu razvezani i neuzemljeni. Ako sprega transformatora ukazuje na postojanje filtera viših harmonika u vidu tercijera, on takođe treba biti razvezan. Frekvencijski opseg pobudnog prostoperiodičnog sinusnog signala, koji se najčešće koristi pri SFRA analizi, je od 20 Hz do 2 MHz. Ograničenje gornje granice frekvencijskog opsega na 2 MHz uslovljeno je pre svega kapacitivnim karakteristikama dimenziona velikih visokonaponskih provodnih izolatora na velikim blok transformatorima. Na manjim distributivnim transformatorima moguće je proširiti frekvencijski opseg ispitnog (pobudnog) napona do 5 MHz.

Amplituda primenjenog pobudnog prostoperiodičnog napona je definisana vrstom primenjenog mernog sistema i kreće se, zavisno od proizvođača do proizvođača, u opsegu od 5 V_{pp} do 24 V_{pp}. SFRA metoda je osetljiva na elektromagnetne smetnje.

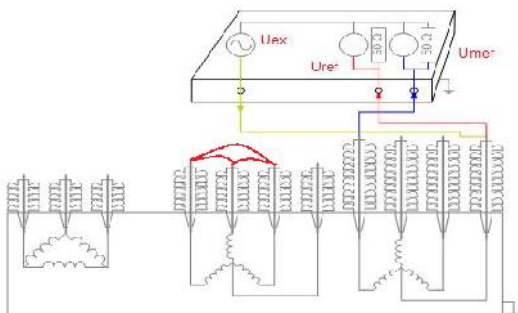
U cilju smanjenja neželjenog uticaja elektromagnetnih smetnji iz pogona, neophodno je obezbediti kvalitetno uzemljenje ekrana mernih kablova uređaja. Prilikom merenja se mora voditi računa o karakterističnim impedansama mernih kablova i ulaznoj impedansi mernog uređaja. Impedansa priključnih kablova mora biti prilagođena ulaznoj impedansi instrumenta (najčešće je to 50 Ω).

Snimanje SFRA odziva se izvodi najčešće prema dve principijelno različite šeme merenja: merenje prema šemi praznog hoda i merenje prema šemi kratkog spoja. Merenja prema šemi praznog hoda se izvode tako što se na svaki pojedinačni namotaj dovede pobudni signal promenljive frekvencije, dok se sa njegovog drugog kraja se meri odziv, a pri tome su svi drugi namotaji otvoreni i neuzemljeni (slika 5), analogno ogledu praznog hoda.



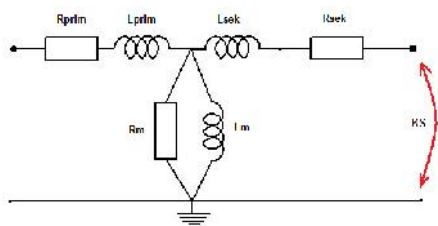
Slika 5 - Šema veza za snimanje frekvencijskog odziva jedne faze VN namotaja sprege YN-ynd-prazan hod

Ukoliko je namotaj, na kome se vrši merenje, spregnut u zvezdu, pobudni (eksitacioni) signal se dovodi na jedan kraj namotaja, dok se merenje vrši na drugom kraju (npr: sprege A - N). Ako je namotaj vezan u trougao, ili zvezdu bez izvedene neutralne tačke, merenje se vrši između svake dve faze. Merenja prema šemi kratkog spoja se vrše na sličan način, s tom razlikom da je tokom merenja, drugi namotaj kratko spojen (slika 6).



Slika 6 - Šema veza za snimanje frekvencijskog odziva jedne faze VN namotaja sprege YN-ynd-kratak spoj

Poželjno je da svaki namotaj bude kratko spojen sa drugim namotajem posebnom vezom istog preseka. Na ovaj način se obezbeđuje jednaka impedansa pri snimanju odziva na sve tri faze u cilju simetrije impedansi. Ta simetrija impedansi je neophodna kako bi se odzivi mogli međufazno porediti. Ukoliko je namotaj, koji je potrebno kratko spojiti, spregnut u zvezdu sa izvedenim neutralnim priključkom, potrebno je neutralni priključak ostaviti otvorenim. Na slici 7 je prikazana ekvivalentna T šema transformatora u praznom hodu i kratkom spoju.



Slika 7 - Ekvivalentna T šema transformatora

Pri merenju, u šemi praznog hoda, dominantan uticaj na rezultate merenja ima velika impedansa u poprečnoj grani, odnosno jezgro transformatora. Ovo je naročito izraženo na učestanostima manjim od 5 kHz, dok je uticaj redne impedanse namotaja manji. Takođe, merenjem u šemi praznog hoda evidentan je i uticaj međusobnog spreznja dva namotaja. Formiranjem katkog spoja na sekundarnom namotaju velika impedansa magnećenja u poprečnoj grani vezana je u paraleli sa višestruko manjom impedansom NN namotaja. Time se praktično eliminiše uticaj jezgra i dobija potpunija informacija o simetriji između namotaja. Moguće je izvršiti i snimanje odziva između dva namotaja, tako što bi se signal injektirao u priključak jedne faze npr. VN namotaja, dok bi se merenje vršilo na priključku NN namotaja.

Ukoliko je energetski transformator opremljen teretnim regulatorom napona, treba imati u vidu i činjenicu da će odziv namotaja takvog transformatora zavisiti i od položaja teretnog regulatora. Iz tog razloga je potrebno izvršiti merenje u više različitih položaja regulatora. Tipično se merenje izvrši u krajnjem, maksimalnom položaju, gde je obuhvaćen osnovni namotaj zajedno sa kompletnim regulacionim namotajem, i ponekad u srednjem, neutralnom položaju. Imajući u vidu da je broj kombinacija merenja prilično veliki (dva-tri namotaja, sa po tri faze, četiri merne šeme, regulaciona sklopka), izbor odziva koji će se snimati treba biti odabran tako da odgovara svrsi merenja.

4. ANALIZA REZULTATA MERENJA

Analiza rezultata predstavlja najveći izazov kada je su pitanju rezultati dobijeni SFRA metodom. Pre svega nije dovoljno samo posmatrati frekvencijske odzive, već se ova metoda koristi u konjukciji sa merenjem induktivnosti rasipanja, struja i snaga praznog hoda, prenosnog odnosa i sl.

SFRA je, u suštini, poredbena (komparativna) metoda. Pri analizi dobijenih odziva namotaja, od velikog značaja je postojanje referentnog odziva, odnosno fingerprint-a, koji predstavlja odziv novog transformatora animljen u fabrici pre otpremanja. U osnovi, poredi se dobijena kriva sa krivom za koju se smatra da je dobijena u trenutku kada je transformator bio ispravan. Odziv se snima u opsegu frekvencija od 20 Hz do 2 MHz. Ovaj opseg se može podeliti na nekoliko podopsega, radi lakše analize rezultata.

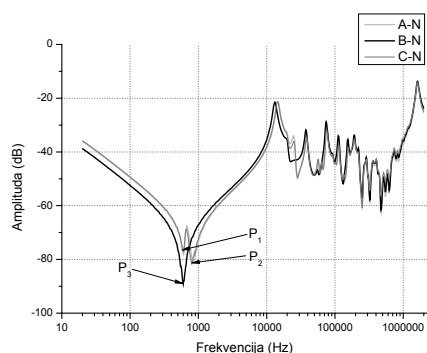
Pri poređenju sa referentnim odzivom, primećeno je da ukoliko postoji izobličenje u oblasti niskih frekvencija, ispod 5 kHz, najverovatnije postoje problemi vezani za jezgro. Ukoliko se izobličenje pojavi na frekvencijama iznad 10 kHz, postoje indikacije da postoji problem sa namotajima. U tabeli 1 su dati os-

novni podopsezi sa karakterističnim kvarovima koji se u njima oslikavaju [9].

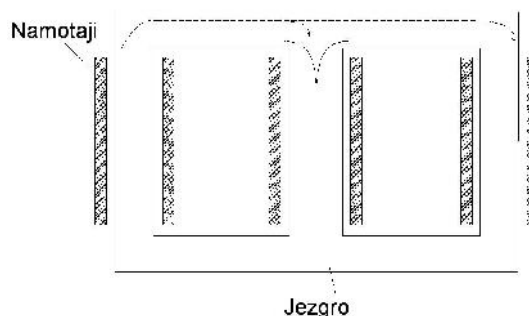
Tabela 1. Podopsezi i njihovi karakteristični kvarovi

Frekvencijski opseg	Lokacija kvara
20 Hz ~ 2 kHz	Deformacija jezgra, kratkospojen navojak, otvoren navojak, remanentni magnetizam
2 kHz ~ 20 kHz	Deformacije namotaja u radijalnom pravcu, popuštanje delova za utezanje namotaja
20 kHz ~ 200 kHz	Deformacije namotaja, obično regulacionog
200 kHz ~ 2 MHz	Problemi vezani za izvode transformatora, kablove i vezu sa sklopkom

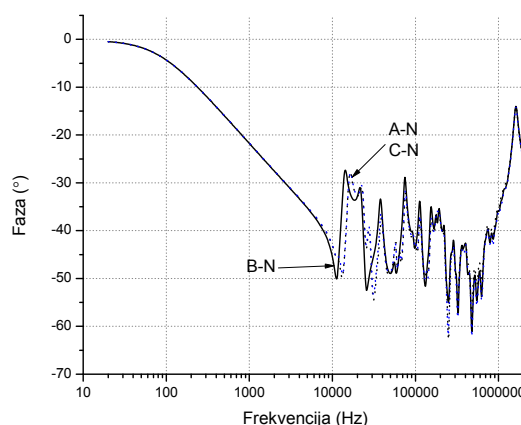
Promene manje od ± 5 dB u odnosu na referentni signal se smatraju normalnim (ne ukazuju na kvar) i ulaze unutar granica tolerancije [1, 9 - 11]. Na slici 8 je prikazan rezultat merenja odziva sva tri fazna namotaja jednog transformatora 121/10.5 kV, snage 45 MVA spregu YNd, u šemi praznog hoda. Za transformator nije postojao referentni odziv sa kojim bi se izmereni rezultata mogao porediti. Očigledno je da se odzivi faze „A“, i faze „C“, odlično poklapaju, dok odziv faze „B“ značajno odstupa, naročito na nižim frekvencijama. Odstupanja na nižim frekvencijama, oko 1 kHz, su karakteristična za navedenu spregu namotaja. Uzrok ove varijacije se krije u činjenici da je pri nižim frekvencijama dominantan uticaj jezgra transformatora. Fluksevi spoljnih faza, A i C, „vide“ dve staze različitih dužina duž kojih mogu zatvoriti svoju putanju (slika 9). Te dve različite putanje pruzrokuje na nižim frekvencijama dve rezonantne tačke P_1 i P_2 (slika 8) dok fluks središnjeg namotaja, faze „B“, „vidi“ dve jednake putanje kojima može zatvoriti svoju putanju (slika 15) što rezultuje samo jednom rezonantnom tačkom P_3 . (slika 8).



Slika 8 - Odziv sve tri faze VN namotaja spregu YNd, niskonaponski namotaj otvoren.

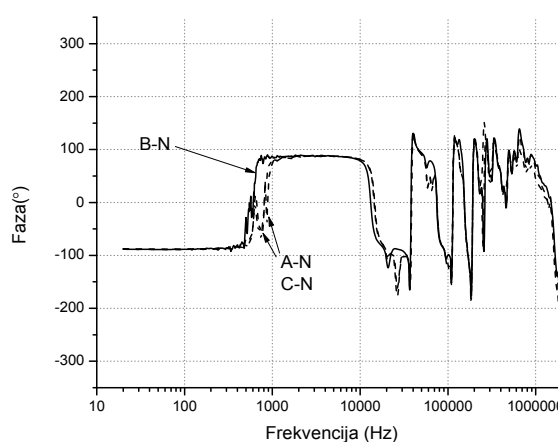


Slika 9 - Putanje fluksa za srednju (puna linija) i spoljašnju fazu (isprekidana linija) transformatora sa trostubnim jezgrom

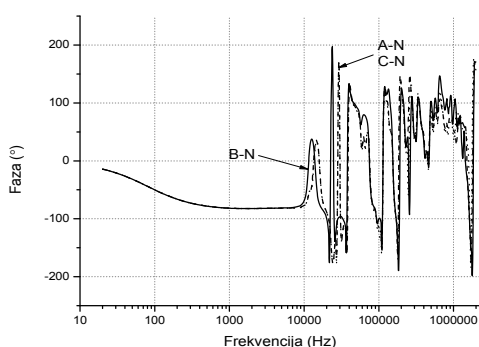


Slika 10 - Odziv sve tri faze VN namotaja spregnutog u zvezdu, niskonaponski namotaj kratko spojen

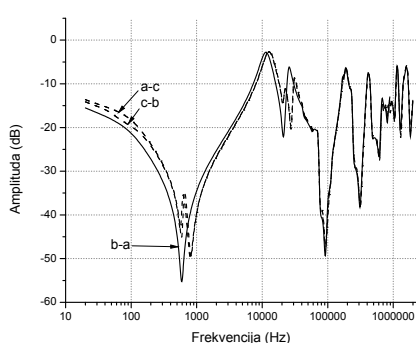
Na slici 10 prikazani su odzivi namotaja istog transformatora snimljeni pri kratko spojenim sekundarnim priključcima gde je uočljiva razlika na nižim učestanostima. Eliminacijom uticaja jezgra (kratkim spajanjem sekundarnog namotaja), odziv je promenio svoju prirodu (slike 11 i 12).



Slika 11 - Fazne karakteristike sve tri faze VN namotaja spregnutog u zvezdu, niskonaponski namotaj otvoren

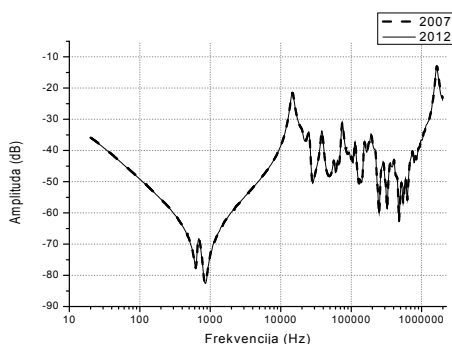


Slika 12 - Fazne k-ka sve tri faze VN namotaja spregnutog u zvezdu, niskonaponski namotaj kratko spojen



Slika 13 - Odziv sve tri faze NN namotaja spregnutog u trougao visokonaponski namotaj otvoren

Kako bi se kompletirala slika stanja geometrije namotaja potrebno je bilo izmeriti odzive i niskonaponskih namotaja pri otvorenom visokonaponskom namotaju. Niskonaponski namotaj je spregnut u trougao, bez mogućnosti razvezivanja temena. Odzivi su zbog toga snimljeni između svake dve faze (slika 13). Odzivi između a-c faze i c-b su praktično isti. Na identičan način kao kod analize VN namotaja može se opravdati devijacija odziva središnje faze, odnosno merenje b-a.



Slika 14 - Poređenje nove frekvencijske karakteristike faze A-N namotaja spregnutog u zvezdu (isprekidana linija), sa pet godina starijom snimkom (puna linija)

Na slikama 8-13 su predstavljeni rezultati merenja energetskog transformatora sa „ispravnim namotajima“ (ne narušena projektovana geometrija namotaja i jezgra).

Uopšteno govoreći, dobijeni odzivi sve tri faze mogu se analizirati na jedan od sledeća tri načina:

1. Periodično poređenje sa referentnim odzivima, pri čemu se kao referentni odziv koriste odzivi dobijeni primenom SFRA metode pri fabričkim ispitivanjima, pre otpremanja transformatora, ili odzivi snimljeni prilikom prethodnog ispitivanja.
2. Poređenje odziva sličnih transformatora iz iste serije.
3. Poređenje odziva između faza transformatora.

Na slici 14 je prikazano poklapanje dva odziva iste faze transformatora snage 63 MVA, 110/6.3 kV, sprege YNd5.

Prvi odziv snimljen je prilikom redovnog ispitivanja transformatora 2007. godine, a drugi, isprekidana crna linija, snimljen je 2012. godine. Jasno je da se dve krive savršeno podudaraju, te se može zaključiti da u međuvremenu, od 2007. do 2012. godine ovaj transformator nije pretrpeo nikakve deformacije namotaja.

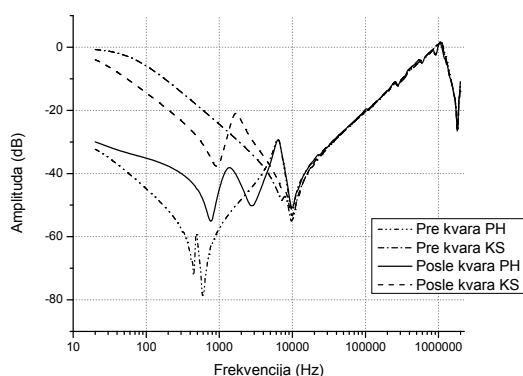
5. KOMPARATIVNA ANALIZA

Snimanjem frekvencijskih odziva namotaja transformatora moguće je doneti određene zaključke u pogledu geometrijske postojanosti namotaja i jezgra transformatora. SFRA metoda, kao i ostale metode ne bi trebalo biti jedini test kojim bi se nastojale potvrditi sumnje u moguće kvarove. Naime, ukoliko bi SFRA odziv ukazao na postojanje sumnje na deformaciju namotaja ili jezgra to bi svakako bilo korisno potvrditi tradicionalnim ispitnim metodama koja takođe, između ostalog, pokušavaju ukazati na deformaciju namotaja. To su pre svega:

- merenje induktivnosti rasipanja,
- merenja struje i snage praznog hoda,
- prenosni odnos transformatora
- merenje omskih otpora namotaja.

Ukoliko zaista postoji kvar, SFRA metoda će ukazati na njega, a najmanje jedna od navedenih metoda će svakako to potvrditi. Na slici 15 je dat prikaz rezultata merenja energetskog transformatora za koji se sumnjalo da ima kvar (proradila je diferencijalna zaštita).

Vršena su merenja sa više mernih metoda koje su potvrdile sumnju da postoji međuzavojni kratak spoj u fazi C visokonaponskog namotaja (VN). Na slici 15 prikazani su odzivi faze C, visokonaponskog namotaja blok transformatora snage 63MVA, sprege YNd5 pre i nakon kvara.



Slika 15 - Referentni i novi odziv faze C, VN namotaja spregnutog u zvezdu pri otvorenom i kratko spojenom NN namotaju

Posmatrajući navedene odzive, može se posumnjati na postojanje kratkog spoja negde duž namotaja. Pre toga vršena su merenja odnosa transformacije, struja magnećenja, omskih otpora namotaja i merenje induktivnosti rasipanja na osnovu ovih kojih je utvrđeno da je kvar prisutan samo u fazi C. Rezultati [4] su dati u tabeli 2. Otvaranjem transformatora i vađenjem aktivnog dela, potvrđen je međuzavojni kratak spoj u fazi C.

Tabela 2. Rezultati merenja (kvar u fazi C)

FAZA	A-N	B-N	C-N
Greška transformacije (%)	0,1	0,11	3,7
Struja magnećenja (mA)	33,7	31,8	62,4
Omski otpori namotaja (Ω)	0,3601	0,3600	0,7196
Rasipna induktivnost (mH)	133,3	131,7	426

6. ZAKLJUČAK

SFRA metoda se bazira na analizi frekvencijskog odziva namotaja energetskih transformatora i predstavlja nov pristup u merenju i detekciji kvarova. Metoda je pogodna za primenu u fabričkim i laboratorijskim testovima, a posebno je korisna za merenja na terenu u industrijskim eksploatacionim uslovima. Svojom jednostavnošću u primeni, pouzdanošću, ponovljivošću i neinvazivnošću, postala je ravnopravna sa ostalim standardnim mernim metodama koje se koriste pri profilaktičkim ispitivanjima energetskih transformatora. U radu su prezentovani praktični rezultati ispitivanja energetskih transformatora dobijeni primenom SFRA metode, koji ukazuju na mogućnosti višeparametarskih analiza iz samo jednog merenja. Urađena je detaljna komparativna analiza dobijenih praktičnih rezultata merenja iz pogona za dva energetska transformatora.

Dalje istraživanje, razvoj treba da bude usmeren prema razvoju programskih alata i prema unapređenju metode za primenu u dijagnostici generatora. Treba težiti da SFRA metoda postane standardna metoda za merenje i dijagnostiku svih vrsta proizvodnoprinosnih jedinica u termo i hidro elektranama.

ZAHVALNICA

Rad je nastao u okviru projekta TR 33024, „Povećanje energetske efikasnosti, pouzdanosti i raspoloživosti elektrana EPS-a utvrđivanjem pogonskih dijagrama generatora i primenom novih metoda ispitivanja i daljinskog nadzora”, koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] Sweetser C., Mc Grail T. “Sweep Frequency Response Analysis – Transformer Application”- A technical paper from Doble Engineering Company, Version 1.0, 2003. (p. 1-47)
- [2] Bocovich M. “Swept Frequency Response Analysis, Realistic Expectations” Doble Engineering Company, 78th Annual International Doble Client Conference, Boston, March 2011, Massachusetts, USA (p. 1-17)
- [3] A. K. S. (p. 1-5) Mehta, A. K., Sharma, R. N., Chauhan, S., & Agnihotri, S. D. (2013, February). Study and diagnosis the failure of power transformers by sweep frequency response analysis, Power, Energy and Control (ICPEC), 2013 International Conference on (pp. 197-201). IEEE.
- [4] Sušić M., Jovanović Đ., Marinković S., Drobnjak N., „SFRA metoda, primeri iz prakse i značaj u održavanju energetskih transformatora“, 29. savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor, 31. maj– 06.jun 2009. Zbornik radova, R A2 -13 (p. 1-9)
- [5] Measurement, Instrumentation and Sensors, J. G. Webster, Ed. Boca Raton: CRC & IEEE Press, 1999. (Section III, p. 18.1 – 19.1)
- [6] Resonance and Ferroresonance in Power Networks, Cigre, WG C4.307, For these studies, CIGRE WG 33.10 published in 2000 (Electra, 188)
- [7] Duarte E. E., Mathew K., G. McGrail T. T. „Transformer And Rotating Machine Diagnostics Using Sweep Frequency Response Analysis (SFRA)“, 74th Annual International Doble Client Conference 29.-30. March 2007, Boston, Massachusetts, USA, (p. 5-19)
- [8] Moodley L., Brian de Klerk, NHD, „SFRA as a Diagnostic Tool To Detect Transformer Mechanical Integrity“, AMEU Convention, Proceedings paper No. 29, (p. 1-9), 2006.

- [9] Kiparizoski Ž. Ž., „SFRA тест за механичка процена активниот дел кај енергетски трансформатори“ 6. СОВЕТУВАЊЕ, Mako Cigré, Охрид, 4– 6. октомври 2009.. Zbornik radova A2-6R, (p. 1-10)
- [10] Kraetge A., Kruger, M., Velasquez, J. L., Viljeon, H., & Dierks, A. „Expriance with the Practical Application of Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) on Power Transformers“, Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering, 2009. Johannesburg, ISBN 978-0-620-445849 (p. 1-6)
- [11] Doble M5200 Instruction Manual, <http://www.doble.com/product/m5200.html>

SUMMARY

IMPLEMENTATION OF THE SFRA METHOD AS VALUABLE TOOL FOR DETECTION OF POWER TRANSFORMER ACTIVE PART DEFORMATION

The paper presents the SFRA (Sweep Frequency Response Analysis-SFRA) method for analyzing frequency response of transformer windings in order to identify potential defects in the geometry of the core and winding. The most frequent problems (recognized by SFRA) are: core shift, shorted or open winding, unwanted contact between core and mass, etc. Comparative analysis of this method with conventional methods is carried out in situ transformer in real hard industrial conditions. Benefits of SFRA method are great reliability and repeatability of the measurements. This method belongs to the non-invasive category. Due to the high reliability and repeatability of the measurements it is very suitable for detection of changes in the geometry of the coil and the core during prophylactic field testing, or after transporting the transformer.

Key words: *SFRA method, frequency response analysis, power transformer, winding deformation*