



Tomislav Kelemen
tomislav.kelemen1@zg.t-com.hr

Miljenko Boras
Končar-KET d.d.
miljenko.boras@koncar-ket.hr

Ivan Tomšić
Končar-KET d.d.
ivan.tomsic@koncar-ket.hr

TRANSFORMATOR ZA UZEMLJENJE I VLASTITU POTROŠNJU

SAŽETAK

Transformator za uzemljenje i vlastitu potrošnju u spoju ZNyn omogućuje uzemljenje izolirane trofazne mreže i napajanje vlastite potrošnje. Međutim, pri jednopolnom kratkom spoju na sekundaru, takav transformator se ponaša bitno drugačije nego uobičajeni transformator za vlastitu potrošnju u spoju Dyn, struja kvara je i do 5 puta manja, a naponi zdravih faza na sekundaru su za oko 50% veći od napona u praznom hodu. Ako se transformatoru za uzemljenje doda stabilizacijski namot te razlike prema transformatoru u spoju Dyn nestaju.

U referatu se na osnovi računa i mjerenja na realnom transformatoru izgrađuje fizikalna slika o pojavama u transformatoru za uzemljenje i vlastitu potrošnju pri jednopolnom kratkom spoju na sekundaru, za slučaj kada postoji stabilizacijski namot i za slučaj kada ga nema. Očigledno je da zaštita u jednom i drugom slučaju dobiva bitno različite informacije. Unatoč tomu, kupci traže transformatore za uzemljenje i vlastitu potrošnju sa stabilizacijskim namotom i bez njega, a postojeće norme ne upozoravaju na ovaj problem, niti propisuju mjerenja na osnovi kojih bi se dobile informacije potrebne za izbor zaštite.

Ključne riječi: transformator za uzemljenje, transformator za vlastitu potrošnju, Z spoj, nulta impedancija.

EARTHING AND AUXILIARY TRANSFORMER

SUMMARY

Earthing and auxiliary transformer in ZNyn connection provides both isolated network earthing and auxiliary consumption supply. However, in the case of phase-to-earth short circuit on secondary side such a transformer behaves fundamentally differently than the ones usually used for auxiliary consumption supply in Dyn connection - its short circuit current is up to 5 times lower, and healthy phase voltages are approximately 50% higher than voltages in the same phases in no load condition. If stabilization winding is added, these differences from transformers in Dyn connection disappear.

Based on calculations and measurements performed on a real transformer, this paper presents a physical model of phenomena in an earthing and auxiliary transformer during phase-to-earth short circuit on secondary side, for both cases with and without the stabilization winding. It is obvious that in these two cases the protection system receives essentially different measurement values. Nevertheless, customers still demand earthing and auxiliary transformers with and without compensating winding, and the standards in effect do not point out this problem, not even prescribing measurements that would provide the information necessary for protection system design.

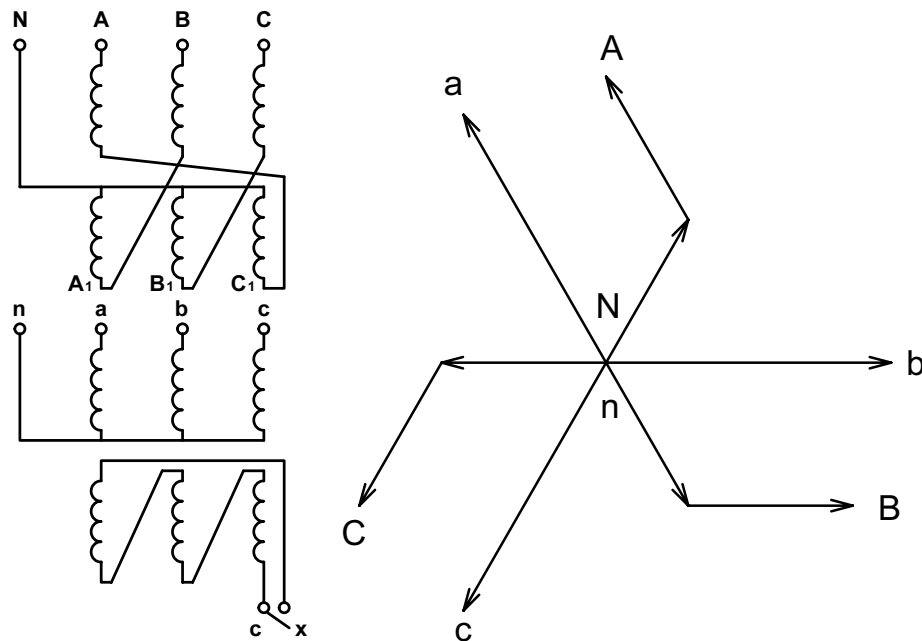
Key words: earthing transformer, auxiliary transformer, interconnected star, zero sequence impedance

1. UVOD

Transformator za uzemljenje omogućuje uzemljenje izolirane trofazne mreže. Namoti transformatora za uzemljenje su u spoju ZN. Njegovi fazni izvodi priključuju se na faze izoliranog sustava, a nultočka N se priključuje na otpornik ili na prigušnicu za uzemljenje. Doda li se transformatoru za uzemljenje namot za vlastitu potrošnju u spoju zvijezda s izvedenom nultočkom dobiva se transformator za uzemljenje i vlastitu potrošnju u spoju ZNyn s neparnim satnim brojem. Dogodi li se na takvom transformatoru jednopolni kratki spoj na sekundaru, struja kvara i naponi zdravih faza biti će bitno različiti od struje jednopolnog kratkog spoja i napona zdravih faza uobičajenog transformatora za vlastitu potrošnju u spoju Dyn jednakih nazivnih parametara. Mjerenja na realnom transformatoru za uzemljenje koji osim sekundarnog namota ima i stabilizacijski namot spojen u trokut pokazuju da pri zatvorenom trokutu stabilizacijskog namota struja jednopolnog kratkog spoja i naponi zdravih faza odgovaraju struji kvara i naponima zdravih faza na transformatoru u spoju Dyn. Ako se stabilizacijski namot otvori, struja kvara je i do 5 puta manja, a naponi zdravih faza su za oko 50% veći.

2. MJERENJA NA TRANSFORMATORU U SPOJU ZNyn11(d) I U SPOJU ZNyn11

Transformator za uzemljenje i vlastitu potrošnju tipa TBN 1950-12, za inozemnog kupca proizvodi „KONČAR - Distributivni i specijalni transformatori d.d.“. Osnovni tehnički podaci tog transformatora su: 1000 kVA, $11000 \pm 2 \times 2,5\% / 433 / (437,5)$ V, spoj ZNyn11(d), $Z_0 = 8,64 \Omega / \text{fazi}$, $u_k = 6,27\%$. Shema i fazorski dijagram transformatora prikazani su na slici 1. Transformator osim primara u spoju Z i sekundara u spoju y ima i stabilizacijski namot u spoju d, s dva izvoda (c i x) na poklopcu transformatora, tako da se trokut stabilizacijskog namota može po volji otvoriti ili zatvoriti.



Slika 1. shema i fazorski dijagram transformatora za uzemljenje i vlastitu potrošnju

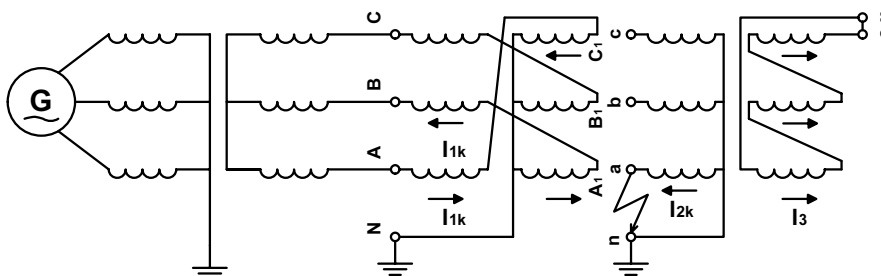
I prije mjerenja lako je uočiti da će pri jednopolnom kratkom spoju na sekundaru transformatora situacija u transformatoru jako ovisiti o tome, da li je stabilizacijski namot otvoren ili zatvoren. Prema Theveninu struja jednopolnog kratkog spoja jednaka je omjeru napona U_{an} prije kvara i sume impedancija $Z_u + Z_v$, pri čemu je Z_u unutrašnja impedancija mreže viđena sa sekundarnih priključaka a i n, a Z_v vanjska impedancija koja se uključuje između točaka a i n. Pri jednopolnom kratkom spoju je $Z_v = 0$ pa vrijedi:

$$I_{2k} = \frac{U_{an}}{Z_u + Z_v} = \frac{U_{an}}{Z_u} \quad (1)$$

Transformator za uzemljenje se postavlja u izoliranu mrežu. Zato nultočka izvora koji pri mjerenju napaja transformator za uzemljenje mora biti izolirana. Dok je taj uvjet ispunjen, pri jednopolnom kratkom spoju na sekundaru, primarom transformatora za uzemljenje teći će samo jedna struja I_{1k} koja će protjecati kroz 4 od 6 namota primara (slika 2 i slika 4). Put te struje ne ovisi o tome da li je stabilizacijski namot otvoren ili zatvoren. U obadva slučaja rezultatni amperzavoji na svakom stupu grade rezultatne magnetske tokove u svakom stupu.

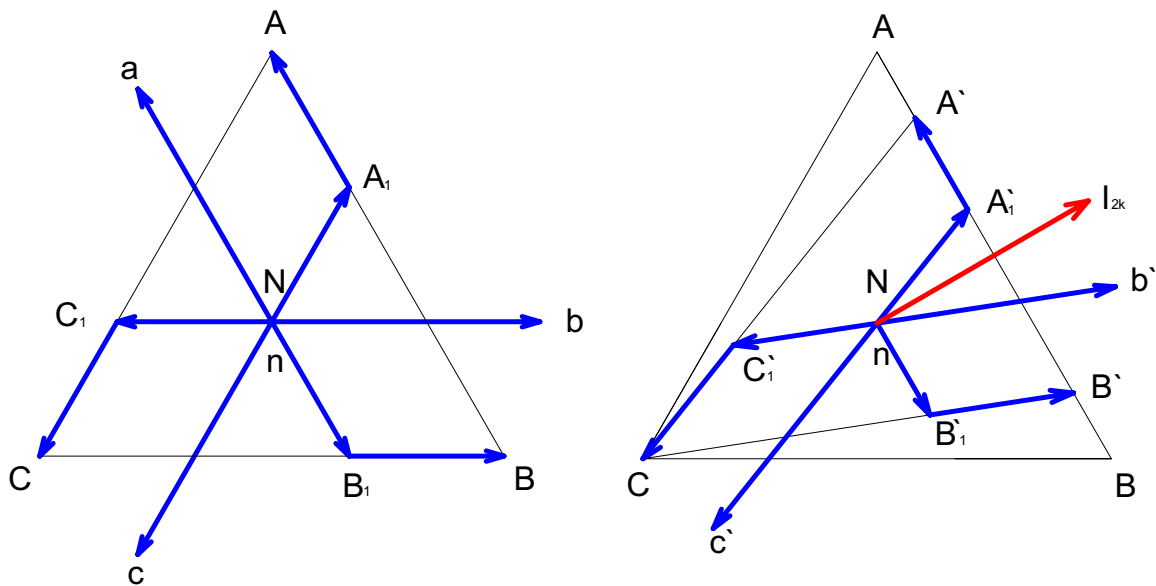
2.1. Zatvoren stabilizacijski namot, spoj ZNyn11(d)

Zatvoren stabilizacijski namot osigurava vrlo male rezultatne amperzavoje u stupovima zdravih faza, koji su reda veličine amperzavoja potrebnih za njihovo magnetiziranje u praznom hodu, tako da se magnetski tokovi u stupovima zdravih faza i naponi zdravih faza u namotima na tim stupovima ne razlikuju bitno od napona u praznom hodu.



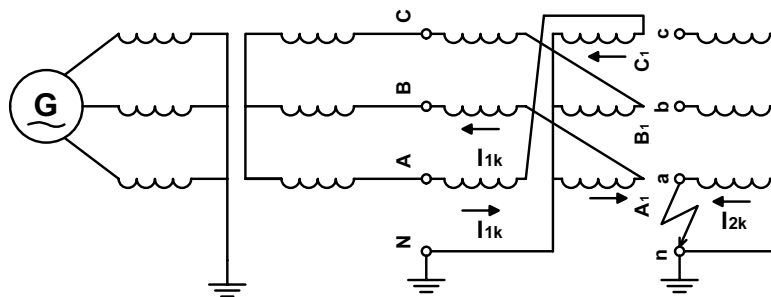
Slika 2. shema pokusa jednopolnog kratkog spoja na sekundaru transformatora za uzemljenje sa zatvorenim stabilizacijskim namotom. Struja u fazi C izvora jednaka je nuli

Na slici 3 prikazan je fazorski dijagram napona pri pokusu jednopolnog kratkog spoja na sekundaru transformatora za uzemljenje u spoju ZNyn11(d) sa zatvorenim stabilizacijskim namotom. Izvor napona je zakretni transformator. Zbog padova napona u fazama A i B izvora istostranični trokut napona ABC se deformira u istokračan trokut A'B'C, zajedno s njim smanjuju se fazni naponi sekundara U_{nb} na $U_{nb'}$ za oko 11%, i U_{nc} na $U_{nc'}$ za blizu 3%. Ove razlike u padovima napona posljedica su nesimetričnog opterećenja izvora (faza C nije opterećena) i razlike u rasipnoj reaktanciji vanjske i unutrašnje polovice Z namota prema stabilizacijskom namotu. Kut između U_{nb} i U_{nc} sa 120° raste na $136,4^\circ$. Ukratko, zbog jednopolnog kratkog spoja u fazi a na sekundaru, iako je izvor relativno slab, naponi zdravih faza na sekundaru ne mijenjaju se dramatično i manji su od napona u praznom hodu.



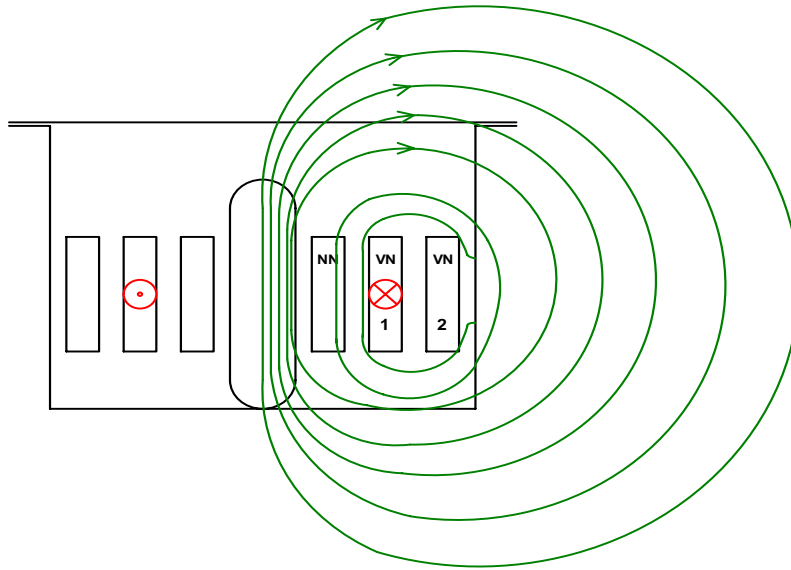
Slika 3. fazorski dijagram napona pri pokusu jednofaznog kratkog spoja na sekundaru transformatora za uzemljenje u spoju ZNyn11(d), lijevo prazni hod, desno kratki spoj

2.2. Otvoren stabilizacijski namot, spoj ZNyn11



Slika 4. shema pokusa jednofaznog kratkog spoja na sekundaru transformatora za uzemljenje u spoju ZNyn11 (bez stabilizacijskog namota). Struja u fazi C izvora jednaka je nuli

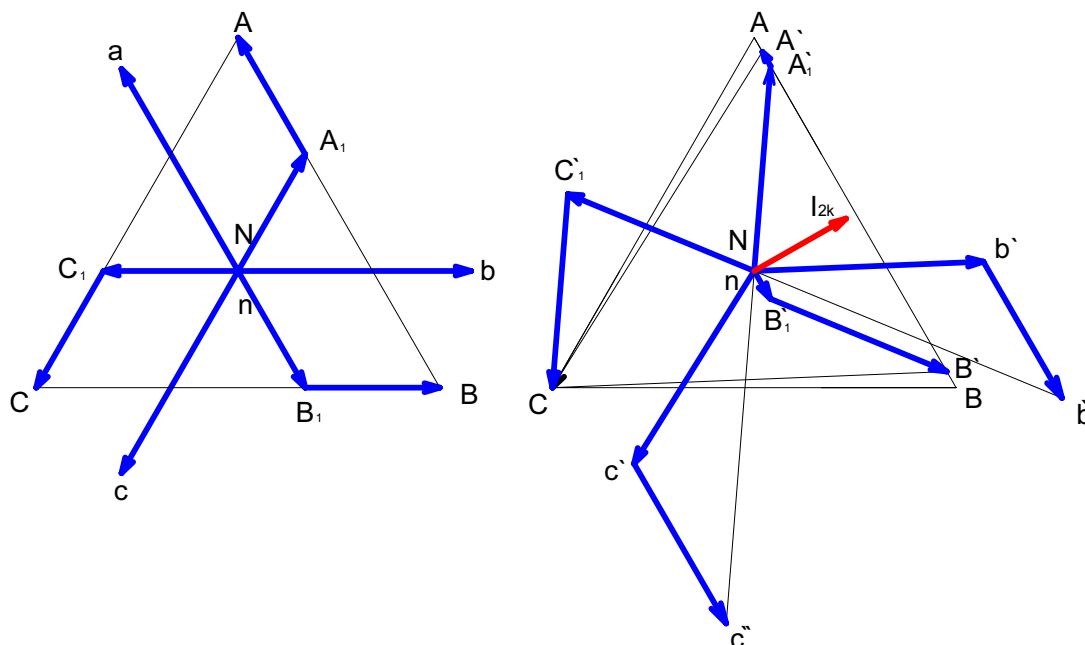
Ako je stabilizacijski namot otvoren, odnosno ako ga nema, onda oko stupova zdravih faza nema ravnoteže protjecanja i postoje samo amperzavoji struje I_{1k} koji snažno magnetiziraju stupove zdravih faza. Tako nastali dodatni magnetski tokovi su istofazni, jer ih gradi ista struja I_{1k} i prostorno jednako usmjereni, jer to diktira Z spoj. Oni se zatvaraju samo prostorom oko protjecanih namota pa izlaze iz jezgre i zatvaraju se svaki oko svog namota prolazeći pritom kroz sve što im se nađe na putu pa zahvaćaju i kotao transformatora i prostor oko transformatora (slika 5). Posljedice su bitno povećanje unutrašnje impedancije Z_u i zbog toga je prema (1) struja jednofaznog kratkog spoja manja, a inducirani naponi su u svim namotima na stupovima zdravih faza veći.



Slika 5. kada se jednopolni kratki spoj na sekundaru dogodi na transformatoru za uzemljenje koji nema stabilizacijski namot stupovi jezgre zdravih faza dodatno se magnetiziraju strujom kvara I_{1k}

Struja I_{1k} koja napaja kvar prolazeći kroz unutrašnji dio VN namota na stupu **c** snažno magnetizira stup **c**. Vrlo slično je i sa stupom **b** kojeg u istom smjeru magnetizira ista struja prolazeći kroz vanjski dio VN namota na stupu **b**. Uslijed tog istofaznog i prostorno jednako usmjerenog magnetiziranja stupovi **b** i **c** se ponašaju kao štapne jezgre.

Struja I_{1k} u primaru praktički je induktivna pa dodatni magnetski tokovi Φ_{db} i Φ_{dc} koje ona gradi u stupovima **b** i **c** i koji su praktički u fazi s tom strujom, također kasne za naponom U_{na} praktički za 90° , a dodatni naponi U_{db} i U_{dc} koje oni induciraju u namotima zdravih faza sekundara, praktički su suprotni naponu U_{na} i dodaju se naponima $U_{nb'}$ i $U_{nc'}$, te tako nastaju naponi $U_{nb''}$ i $U_{nc''}$ (slika 6).



Slika 6. fazorski dijagram napona pri pokusu jednopolnog kratkog spoja na sekundaru transformatora za uzemljenje u spoju ZNyn11, lijevo prazni hod, desno kratki spoj

Budući da su na istim stupovima, isto se događa i u namotima primara. Naponi $U_{B_i B}$ i $U_{C_i N}$ inducirani u VN namotima na stupu **b** u fazi su s $U_{nb''}$, a naponi $U_{C_i C}$ i $U_{A_i N}$ inducirani u VN namotima na stupu **c** u fazi su s $U_{nc''}$. Mjerenja su provedena na tri razine napona iznosa približno 20, 40 i 60% napona kratkog spoja, a rezultati preračunati na napon izvora prije kvara navedeni su u tablicama I, II i III. Dijagrami na slikama 3 i 6 konstruirani su na osnovi podataka mjerenja pri 60% napona kratkog spoja.

Tablica I. rezultati mjerenja napona u praznom hodu prema shemi na slici 1

U_{AB} [V]	U_{BC} [V]	U_{CA} [V]	U_A [V]	U_B [V]	U_C [V]	U_{ab} [V]	U_{bc} [V]	U_{ca} [V]	U_a [V]	U_b [V]	U_c [V]
136,3	136,3	136,3	78,7	78,7	78,7	5,4	5,4	5,4	3,1	3,1	3,1
270,8	270,8	270,8	156,4	156,4	156,4	10,7	10,7	10,7	6,2	6,2	6,2
407,1	407,1	407,1	235,0	235,0	235,0	16,0	16,0	16,0	9,25	9,25	9,25

Tablica II. rezultati mjerenja prema shemi na slici 2, kada je stabilizacijski namot zatvoren

U_{AB} [V]	U_{BC} [V]	U_{CA} [V]	U_A [V]	U_B [V]	U_C [V]	I_A [A]	I_B [A]	U_b [V]	U_c [V]	U_{bc} [V]	φ_{bc} [°]	I_{2k} [A]
92,4	129,1	125,4	59,7	62,3	78,7	4,1	4,1	2,8	3,0	5,4	136,3	179,9
183,7	255,4	250,3	119,5	123,0	156,4	8,1	8,1	5,5	6,0	10,7	136,3	350,2
275,0	382,9	376,9	179,9	183,9	235,0	12,1	12,1	8,2	9,0	16,0	136,4	519,6

Tablica III. rezultati mjerenja prema shemi na slici 4, kada je stabilizacijski namot otvoren, ili ga nema

U_{AB} [V]	U_{BC} [V]	U_{CA} [V]	U_A [V]	U_B [V]	U_C [V]	I_A [A]	I_B [A]	U_b [V]	U_c [V]	U_{bc} [V]	φ_{bc} [°]	I_{2k} [A]
123,4	133,4	132,7	73,2	72,9	78,7	1,3	1,3	4,3	4,6	5,3	73,5	53,7
247,4	265,9	263,8	146,7	145,6	156,4	2,3	2,3	8,8	9,2	10,6	72,1	98,2
372,0	400,4	396,0	221,0	218,5	235,0	3,3	3,3	13,2	14,0	16,0	71,7	142,7

Snaga izvora pri tako malim naponima nije bila velika. Vidi se to najbolje po smanjenju linijskog napona U_{AB} tijekom prva tri pokusa, koje doseže gotovo 33%. Realna mreža nije tako mekana, tako da u realnoj mreži treba očekivati veći omjer struja kvara od 3,64. U idealno čvrstoj mreži taj omjer bi iznosio:

$$\frac{U_{AB33}}{U_{AB23}} \cdot \frac{I_{A23}}{I_{A33}} = \frac{372}{275} \cdot \frac{12,1}{3,3} = 4,96. \quad (2)$$

pri čemu su s indeksom 23 obilježeni rezultati trećeg pokusa sa zatvorenim stabilizacijskim namotom (Tablica II), a indeksom 33 rezultati trećeg pokusa s otvorenim stabilizacijskim namotom. (Tablica III).

3. ISTOFAZNO MAGNETIZIRANJE TROFAZNE JEZGRE

Da bi se vidjelo kolike su impedancije namota na stupovima **b** i **c** u uvjetima magnetiziranja istom strujom, izveden je pokus istofaznog magnetiziranja trofazne jezgre pomoću stabilizacijskog namota na način da su između izvoda **c** i **x** stabilizacijskog namota narinuti naponi U_{cx} i mjerena struja I_3 . Budući da je stabilizacijski namot u spoju trokut, na taj se način sva tri stupa jezgre magnetiziraju kao štapne jezgre, slično kako se to događa sa stupovima **b** i **c** pri jednopolnom kratkom spoju u fazi a sekundara, kada ne postoji stabilizacijski namot. Dobila se tako karakteristika magnetiziranja stupa kao štapne jezgre, navedena u tablici IV,

Tablica IV. rezultati pokusa istofaznog magnetiziranja trofazne jezgre

U_{cx} [V]	I_3 [A]	U_3 [V]	Z_3 [Ω]	N_3 [zavoja]	$I_3 N_3$ [A]	B_m [T]
19,087	14,54	6,362	0,4376	36	523	0,024
31,008	22,26	10,336	0,4643	36	801	0,039
40,118	28,33	13,373	0,4720	36	1020	0,050
50,151	35,20	16,717	0,4749	36	1267	0,063

60,827	42,87	20,276	0,4730	36	1543	0,076
69,871	49,66	23,290	0,4690	36	1788	0,088

pri čemu je U_{cx} napon napajanja otvorenog stabilizacijskog namota, I_3 struja kroz stabilizacijski namot, U_3 napon po stupu, Z_3 impedancija po stupu, N_3 broj zavoja stabilizacijskog namota po stupu, $I_3 N_3$ amperzavoji po stupu i B_m magnetska indukcija u stupu.

Prosječna vrijednost impedancije po stupu stabilizacijskog namota je 0,465 Ω . U jednom svitku cik-cak namota je 308 zavoja. Induktivitet je proporcionalan kvadratu broja zavoja što znači da će impedancija jednog svitka cik-cak namota biti približno:

$$Z_{1c} = \left(\frac{308}{36} \right)^2 \cdot 0,465 = 34,0 \Omega. \quad (3)$$

U trećem pokusu s otvorenim stabilizacijskim namotom struja u primaru je iznosila $I_A=3,3A$, što znači da je dodatni inducirani napon u svitku cik-cak namota iznosio:

$$I_A \cdot Z_{1c} = 3,3 \cdot 34,0 = 112,2 V. \quad (4)$$

U NN namotu zdrave faze je 21 zavoj pa će dodatni inducirani napon u njemu iznositi 7,65 V ili 82,7% faznog napona u praznom hodu, koji je u zadnjem pokusu iznosio 9,25 V. Na slici 6, napon U_{nc} ima dvije komponente. Duljina komponenta koja je u protufazi s naponom U_{na} i koja predstavlja dodatno inducirani napon u zdravoj fazi iznosi upravo $0,83 U_{na}$.

4. ZAKLJUČAK

Jednopolni kratki spoj na sekundaru transformatora za uzemljenje i vlastitu potrošnju u spoju ZNyn dovodi takav transformator u neuobičajeno stanje koje se, koliko je autorima poznato, ne opisuje u poznatim međunarodnim normama. Shodno tome, nisu predviđena nikakva ispitivanja takvih transformatora na osnovu kojih bi se moglo procijeniti šta se događa kada na sekundaru takvog transformatora nastane jednopolni kratki spoj. Opisana mjerenja provedena su pri naponima izvora koji su niži od 4% nazivnog napona transformatora. Pri nazivnom naponu i jednopolnom kratkom spoju na sekundaru u transformatoru i njegovoj okolici treba očekivati snažna magnetska polja popraćena jakom magnetskom bukom kakva nastaje zbog struja uklapanja.

Projektant postrojenja bi iz sheme transformatora mogao naslutiti da transformator za uzemljenje i vlastitu potrošnju bez stabilizacijskog namota pri jednopolnom kratkom spoju na sekundaru ima veliku nultu impedanciju, ali ako i ima protokol o ispitivanju takvog transformatora, ne raspolaže s podacima na osnovi kojih bi mogao izračunati kolika je ta impedancija. Na potrebu normiranja metode mjerenja nulte impedancije sekundara ukazuje i [1].

Prema podacima o izvozu društva „Končar-Distributivni i specijalni transformatori d.d.“ transformatore za uzemljenje i vlastitu potrošnju kupci naručuju sa stabilizacijskim namotom i bez njega. S obzirom na opisanu problematiku, najjednostavnije i u ovom trenutku jedino moguće rješenje je preporučiti kupcima izvedbu sa stabilizacijskim namotom jer se takav transformator u slučaju jednopolnog kratkog spoja na njegovom sekundaru ponaša jednako kao standardni transformator za vlastitu potrošnju u spoju Dyn.

Prema [2], ako transformator za uzemljenje i vlastitu potrošnju ima jedan od namota u spoju zvijezda, mora se ugraditi i dodatni namot u spoju trokut. Prostorni smještaj tog namota bit će mjerodavan za nultu impedanciju namota spojenog u zvijezdu.

Međutim, proizvođač prvenstveno zadovoljava želje kupca pa će i nadalje proizvoditi transformatore za uzemljenje i vlastitu potrošnju sa stabilizacijskim namotom i bez njega, a korisnik, koji se odlučio za jednu ili drugu varijantu, mora izbor i podešenja zaštite prilagoditi karakteristikama izabrane varijante.

5. ZAHVALA

Autori zahvaljuju Upravi i stručnjacima društva KONČAR D&ST–a, g. Jurčiću, g. Gluhaku, g. Maljkoviću i g. Mauroviću na ustupanju transformatora i provedbi mjerenja potrebnih za izradu ovog referata.

6. LITERATURA

- [1] G. Rosselli. Transformer Test to Calculate Z_0 for Interconnected Windings Transformers Using Simetrical Sequence Components. (presented on Power Engineering Society General Meeting, 2005. - IEEE).
- [2] E. Ziegler. Aufbau und Typenleistung von Sternpunktbildern. Siemens Zeitschrift 47 (1968) Heft 7