

Hrvoje Huzanić, dipl. ing. el.
Končar - Distributivni i specijalni transformatori d.d.
hrvoje.huzanic@koncar-dst.hr

mr.sc. Mate Biloš, dipl. ing. el.
Končar - Distributivni i specijalni transformatori d.d.
mate.bilos@koncar-dst.hr

Ivan Špoljarić, mag. ing. el.
Končar - Distributivni i specijalni transformatori d.d.
ivan.spoljaric@koncar-dst.hr

TRANSFORMATORI S RELATIVNO VISOKIM NAJVIŠIM NAPONOM OPREME U ODNOSU NA NAZIVNU SNAGU

SAŽETAK

Energetski transformatori nazivnih snaga do 8 MVA uobičajeno imaju najviši napon opreme manji ili jednak 36 kV i regulaciju u beznaponskom stanju, najčešće $\pm 2 \times 2,5\%$. Transformatori s najvišim naponom opreme većim ili jednakim 72,5 kV uobičajeno imaju nazivnu snagu veću od 10 MVA, a regulacija ovisi o mjestu ugradnje (standardna izvedba transformatora). U slučajevima kada transformator ima relativno visok najviši napon opreme u odnosu na nazivnu snagu primjenjuju se specifična tehnička rješenja (nestandardna izvedba transformatora). U radu je opisana izvedba dva transformatora nazivne snage 2,5 MVA i najvišeg napona opreme $U_m=123$ kV.

Ključne riječi: standardna izvedba transformatora, nestandardna izvedba transformatora, najviši napon opreme, nazivna snaga transformatora, regulacija napona pod teretom, upleteni namot

POWER TRANSFORMERS WITH RELATIVELY HIGH HIGHEST VOLTAGE FOR EQUIPMENT IN RELATION TO RATED POWER

SUMMARY

Power transformers with rated power up to 8 MVA usually have highest voltage for equipment up to 36 kV and off load regulation, mostly $\pm 2 \times 2,5\%$. Transformers with highest voltage for equipment equal or above 72,5 kV usually have rated power above 10 MVA and regulation depends on delivery place (standard transformer design). In cases when transformer has relatively high voltage for equipment in relation to rated power, specific technical solutions are implemented (unstandard transformer design). In this paper is presented the design of two three phase two winding power transformers with rated power 2,5 MVA and highest voltage for equipment $U_m=123$ kV.

Key words: standard transformer design, unstandard transformer design, highest voltage for equipment, transformer rated power, on load regulation, EE-interleaved winding

1. UVOD

Praktički u isto vrijeme, u proljeće 2015., Končar D&ST je dobio dvije narudžbe od dva nezavisna kupca, iz dvije različite zemlje, za transformatore snage 2,5 MVA sa najvišim naponom opreme $U_m=123$ kV. Do tada je najmanja snaga ovog naponskog reda proizvedenog u Končar D&ST-u bila 6,3 MVA. Tako su tijekom 2015. dizajnirana, proizvedena i uspješno ispitana dva različita tipa transformatora TRN2500-123/A (1 kom.) i TRN2500-123/B (2 kom.). U tablici I su prikazani njihovi osnovni tehnički podaci.

Tablica I - Tehnički podaci transformatora TRN2500-123/A i TRN2500-123/B

Tip transformatora	TRN2500-123/A	TRN2500-123/B
Nazivna snaga	2,5 MVA	2,5 MVA
Broj faza	3	3
Prijenosni omjer	$115 \pm 9 \times 1,67\% / 11$ kV	$115 \pm 9 \times 1,778\% / 10,5$ kV
Ispitni naponi VN VN nultočka NN	LI550 AC230 LI550 AC230 LI 75 AC 28	LI550 AC230 LI250 AC100 LI125 AC 42
Frekvencija	50 Hz	50 Hz
Grupa spoja	YNd11	YNd11
Napon kratkog spoja	10 %	11,5 %
Gubici praznog hoda	3 kW	4 kW
Gubici kratkog spoja	16 kW	25 kW
Zagrijanje ulje/namot	60/65 K	60/65 K
Tip hlađenje	ONAN	ONAN
Buka	50 dB(A)	70 dB(A)

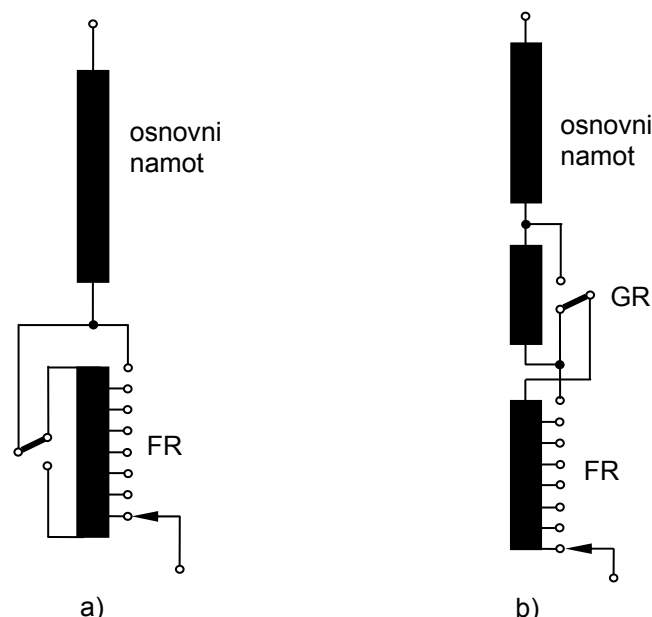
Standardni transformatori nazivne snage 2,5 MVA uobičajeno imaju prema Uredbi komisije (EU) br. 548/2014 nazivni napon na visokonaponskoj (VN) strani manji od 36 kV, na niskonaponskoj (NN) strani od 0,4 do 11 kV, regulaciju na VN strani u beznaponskom stanju, napon kratkog spoja oko 6 %, gubitke praznog hoda 1,75 kW, a gubitke kratkog spoja 22 kW.

2. PROJEKTNO RJEŠENJE

2.1. Odabir tipa regulacije napona

Prijenosni omjer transformatora mijenja se promjenom broja protjecanih zavoja. Ukoliko je prilikom promjene prijenosnog omjera transformator u pogonu, radi se o regulaciji pod teretom i takav transformator nazivamo regulacijskim.

Najčešći tipovi regulacije pod naponom su preketanje i predbiranje. Odabrani tip regulacije predmetnih transformatora TRN 2500-123/A i TRN 2500-123/B je predbiranje. Kod regulacije predbiranjem, minimalni napon na VN stezaljkama je postignut kada je uključen samo glavni VN namot. Povišenje napona postiže se protjecanjem većeg broja zavoja namota fine regulacije (FR). Nakon što je cijeli namot FR uključen, za nulti položaj regulacije, predbiračem sklopke uključuje se namot grube regulacije (GR), a biračem isključuje namot FR. Uključenjem dodatnih otcjepa FR povećava se napon na VN stezaljkama sve do trenutka kada su svi zavoji GR i FR namota protjecani, tada je napon na stezaljkama VN namota najviši.



Slika 1. Jednofazne sheme spojeva regulacije prekrretanjem i predbiranjem [1]

Standardni transformatori nazivne snage 2,5 MVA obično imaju regulaciju u beznaponskom stanju, a regulacija je izvedena s odcjepima iz sredine namota.

2.2. Odabir napona po zavoju

Jedan od osnovnih parametara transformatora je napon po zavoju u_{zav} . Za iste parametre transformatora u_{zav} direktno određuje broj zavoja pojedinih namota, a utječe na presjek jezgre, gustoću struje, vitkost transformatora. Za grubo određivanje napona po zavoju u praksi se ponekad koristi empirijska formula (1).

$$u_{zav} = 13 \times \sqrt{S_n} \quad (1)$$

gdje su:

u_{zav} - napon po zavoju [V]

S_n - nazivna snaga transformatora [MVA]

Konačna vrijednost u_{zav} uvelike ovisi o zadanom naponu kratkog spoja, te o zahtjevima na gubitke. Kako bi pogreška prijenosnog omjera bila što manja, odnosno unutar zadane granice od 0,5 % definirane u IEC 60076, za slučaj transformatora sa regulacijom konačnu vrijednost u_{zav} uvijek određuje korak regulacije. To znači da broj zavoja koji se uključuje ili isključuje pri promjeni jednog položaja regulacijske sklopke pomnožen s u_{zav} mora biti približno jednak faznom naponu koraka regulacije.

Tako je za transformator TRN 2500-123/A odabran $u_{zav}=23,1$ V/zavoju, dok je za transformator TRN 2500-123/B odabran $u_{zav}=21,87$ V/zavoju. Standardni transformatori snage 2,5 MVA imaju sličan napon po zavoju (oko 22 V/zavoju).

U tablici II su prikazani brojevi zavoja transformatora TRN 2500-123/A i TRN 2500-123/B. Vidljivo je da VN strana transformatora ima neuobičajeno veliki broj zavoja.

Tablica II – Brojevi zavoja transformatora TRN2500-123/A i TRN2500-123/B

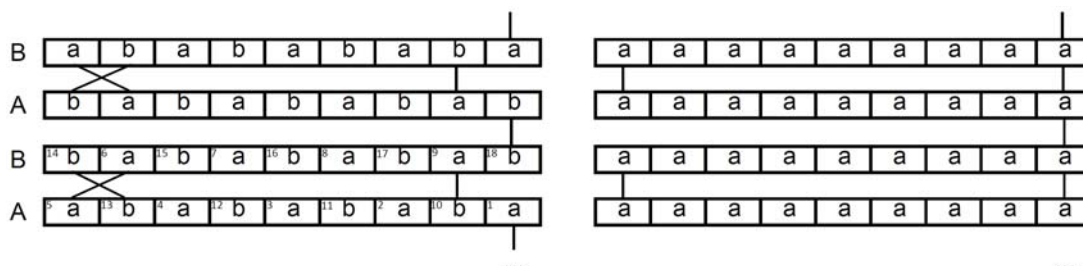
	TRN2500-123/A	TRN2500-123/B
NN namot	476	480
VN - osnovni namot	2394	2496
GR namot	480	540
FR namot	432	486

Standardni transformatori nazivne snage 2,5 MVA imaju na VN strani smo jedan namot sa brojem zavoja obično manjim od 1700 (spoj trokut), 1000 (spoj zvijezda), dok NN strana može imati broj zavoja kao i predmetni transformator.

2.3. Odabir tipa namota

Odabir vrste namota ovisi o broju zavoja, najvišem naponu opreme, nazivnoj snazi transformatora, vrsti korištenog vodiča, sposobnostima hlađenja pojedine vrste namota, tehnološkim ograničenjima itd. NN namoti imaju manji broj zavoja i vodiče većeg presjeka u odnosu na VN namote.

Za namote s ispitnim naponima LI550 AC230 u obzir dolaze namoti u svicima: preloženi ili upleteni namot (u literaturi poznat kao EE-interleaved namot). Na slici 2. je prikazana izvedba upletenog i preloženog namota.



Slika 2 - Izvedba upletenog (lijevo) i preloženog (desno) namota s jednom električnom paralelom

Najjednostavnija izvedba upletenog namota podrazumjeva minimalno dva mehanički upletena vodiča (a i b) u jednom svitku, što čini jednu električnu paralelu. Jedan svitak sastoji se od dva polusvitka A i B, a svaki polusvitak mora sadržavati minimalno 4 zavoja. Iz slike 2. je vidljivo da je upleteni namot kompliciraniji, tehnološki zahtjevniji (nužno je spajanje vodiča zavarivanjem unutar svitka), te stoga namatanje traju puno dulje od preloženog namota. Zbog zavarivanja unutar svitka u pravilu se upleteni namot koristi samo u slučaju profilnog vodiča.

Ipak, u nekim slučajevima upleteni namot je najbolje rješenje. Naime, razdioba prenapona na VN namotu pri ispitivanju udarnim naponom se određuje pomoću nadomjesne RLC sheme. Uzlazna fronta udarnog napona, zbog relativno kratkog trajanja, ima veliku ekvivalentnu frekvenciju. Iz tog razloga, početna razdioba prenapona određena je diferencijalnom jednadžbom nadomjesne sheme u kojoj su relevantni elementi samo kapaciteti. Razdioba prenapona duž namota je povoljnija što je naponski faktor sigurnost od proboja među zavojima manji (2). [2]

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_e}{C_s}} \quad (2)$$

gdje su:

- α - naponski faktor sigurnost od proboja među zavojima
- C_s - kapacitet između susjednih zavoja pojedinih svitaka
- C_e - kapaciteti zavoja prema zemlji

Kada je $\alpha = 0$, početna razdioba prenapona duž namota će biti jednolika razdioba. Kako iznos α raste tako se povećava neuniformnost početne razdiobe prenapona, a posljedično tome rastu i električna naprezanja između ulaznih svitaka VN namota. Korištenjem upletenog namota povećava se C_s , te se posljedično tome smanjuje faktor α i razdioba prenapona duž namota postaje povoljnija. [3]

Što je transformator manje nazivne snage, manja je nazivna struja i manji je u_{zav} . To znači da će manji transformatori za isti nazivni napon imati više zavoja s manjim presjekom vodiča. Posljedično se povećava i broj zavoja u svitku, pa je za dobivanje potrebnog naponskog faktora sigurnosti među svicima potreban vodič s više papira. Korištenjem vodiča s više papira se smanjuje efikasnost hlađenja, kao i faktor punjenja prozora. Uz to, namatanje preloženog namota s puno zavoja u svicima s vodičem malog presjeka, i više papira je također problematično (rušenje namota).

Stoga je na transformatorima TRN2500-123/A i TRN2500-123/B osnovni VN namot izveden kao upleteni. Praksa je pokazala da je za ovaj naponski red korištenje upletenog namota opravdano već na snazi 10 MVA, a na snagama manjim ili jednakim 6,3 MVA praktički nužno.

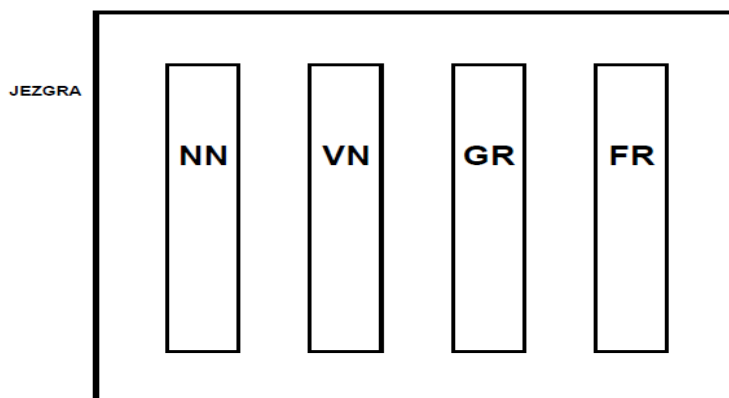
Za regulacijske namote standardnih transformatora u pravilu se koriste spiralni namoti, obično jednoslojni. Međutim, već kod transformatora snage 6,3 MVA je broj zavoja u regulacijskim namotima toliko velik da je teško namot FR izvesti u jednom sloju. Pri razmatranju izbora tipa namota regulacijskih namota uzete su u obzir činjenice da će regulacijski namoti imati puno slojeva s potrebnim radijalnim razmakom između slojeva, te da je presjek žice takav da će namatanje biti otežano.

Zbog svega navedenog odlučeno je da se regulacijski namoti izvedu u svcicima kao jedan namot u tri aksijalne sekcije (GR1, FR, GR2). Ovakvom izvedbom regulacijskih namota su dobivene normalne dimenzije namota u svcicima, te su izbjegnuti radijalni razmak između slojeva FR i GR namota. Tako su na transformatorima TRN2500-123/A i TRN2500-123/B sekcije GR izvedene kao preložene, dok su sekcije FR izvedene kao upletene (razlozi su objašnjeni u poglavlju 2.4) sa 9x2 regulacijska svitka.

Standardni transformatori nazivne snage 2,5 MVA na VN strani imaju samo jedan namot, obično višeslojni spiralni namot. Za transformatore TRN2500-123/A i TRN2500-123/B niskonaponski namoti su izvedeni kao preloženi.

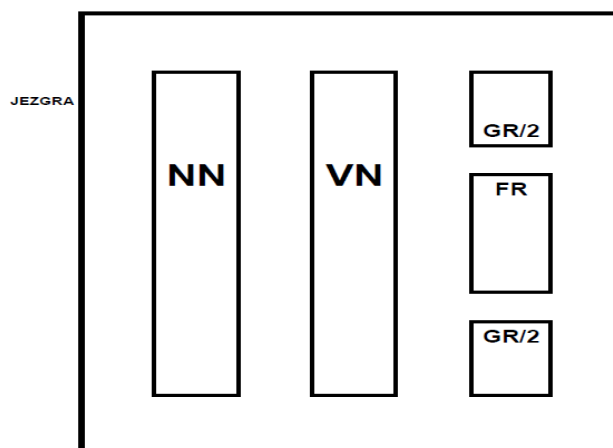
2.4. Prozor transformatora

Na slici 3. je prikazan smještaj namota u prozoru za standardnu izvedbu energetskih regulacijskih transformatora s predbiranjem.



Slika 3 - Smještaj namota u prozoru za standardni transformator s regulacijom predbiranjem

Na slici 4. je prikazan smještaj namota u prozoru za transformatore TRN 2500-123/A i TRN 2500-123/B. Smještaj NN i VN osnovnog namota je isti kao u slučaju standardne isvedbe, dok su regulacijski namoti GR i FR izvedeni kao jedan namot u tri aksijalne sekcije (GR1, FR, GR2). Ovakvom izvedbom regulacijskih namota su dobivene normalne dimenzije namota u svcicima, te je izbjegnut radijalni razmak između FR i GR namota. Zbog simetrije je GR namot podijeljen na dva jednaka dijela i spojen u seriju, a između njih je stavljena FR.



Slika 4 - Smještaj namota u prozoru za transformatore TRN2500-123/A i TRN2500-123/B

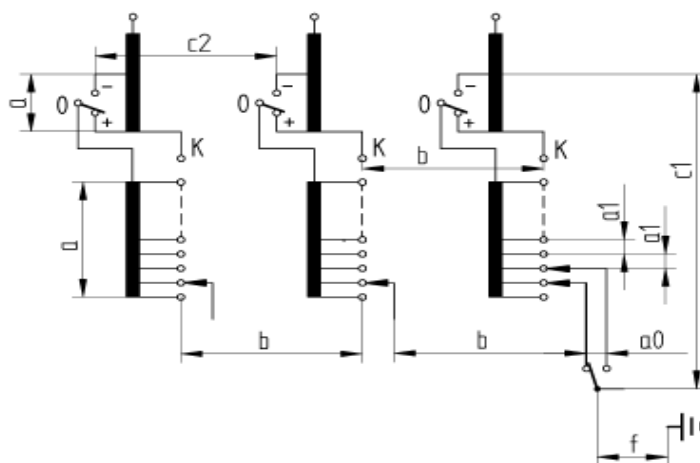
2.5. Odabir regulacijske sklopke

Regulacijski energetski transformatori opremljeni su regulacijskom sklopkom kojom se postiže promjena napona pod teretom. Regulacijska sklopka se sastoji od prekidačkog dijela (engl. diverter switch) i izbornika odcjepa birača (engl. tap selector).

Imajući u vidu ispitne napone za transformator TRN2500-123/A je odabrana konvencionalna uljna sklopka tipa MS proizvođača "MR". Kako transformator TRN2500-123/B ima tenderski zahtjev kupca da sklopka bude vakuumaska, tako je odabrana sklopka tipa VM istog proizvođača.

Prilikom odabira regulacijske sklopke potrebno je provjeriti da udarni prenaponi ne prelaze maksimalno dopuštene vrijednosti specificirane u proizvođačevom katalogu tehničkih karakteristika.

Na slici 6. su za regulaciju predbiranjem prikazani svi karakteristični prenaponi koje treba kontrolirati pri izboru sklopke. Kako vakuumaska sklopka VM ima niže podnosive napone unutar sklopke u odnosu na konvencionalnu uljnu MS sklopku, problem odabira sklopke je bio izraženiji na transformatoru TRN 2500-123/B.



Slika 6 – Tropolna shema predbiranja s označenim karakterističnim prenaponima koje je potrebno kontrolirati prilikom odabira odgovarajućeg OLTC-a

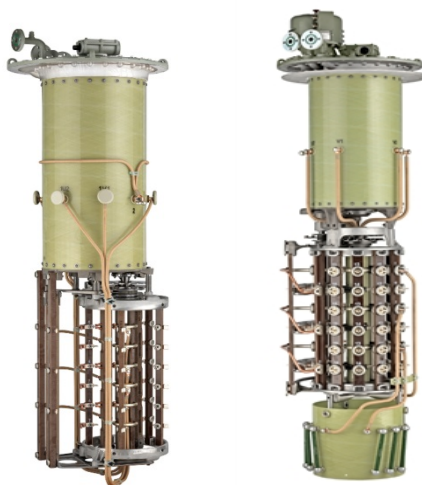
U tablici III su prikazani njihovi maksimalno dozvoljeni iznosi za tip sklopke VM proizvođača MR.

Tablica III Maksimalno podnosivi udarni naponi unutar VM sklopke [4]

Insulation distances	Selector size B		Selector size C		Selector size D		Selector size DE	
	kV 1.2/50 μ s	kV 50 Hz 1 min	kV 1.2/50 μ s	kV 50 Hz 1 min	kV 1.2/50 μ s	kV 50 Hz 1 min	kV 1.2/50 μ s	kV 50 Hz 1 min
a0	max. 150 ²⁾	20	max. 150 ²⁾	20	max. 150 ²⁾	20	max. 150 ²⁾	20
a1	150	30	150	30	150	30	150	30
a	265	50	350	82	490	105	550	120
b ¹⁾	265	50	350	82	490	146	550	160
c1	485	143	545	178	590	208	660	230
c2 ¹⁾	495	150	550	182	590	225	660	250

Prilikom provjere prenapona kritičnim se pokazao prenapon a preko namota FR regulacije. Kako bi se smanjio iznos prenapona preko namota FR regulacije, sekcija namota FR je izvedena kao upletena. Stoga je za transformator TRN2500-123/B izabrana sklopka VM s biračem veličine C, dok je za transformator TRN2500-123/A izabrana sklopka sklopka MS s biračem B.

Na slici 5. prikazane su s lijeva na desno "MR" Reinhausen uljna (MS) sklopka korištena na TRN2500-123/A i vakuumaska sklopka (VM) korištena na TRN2500-123/B.



Slika 5 – “MR” Reinhausen uljna (MS) sklopka - lijevo na slici i vakuumaska (VM) - desno na slici [4], [5]

3. ZAKLJUČAK

U radu je opisana izvedba dva transformatora $S_n=2,5$ MVA i najvišeg napona opreme $U_m=123$ kV. U slučajevima kada transformator ima relativno visok U_m u odnosu na S_n primjenjuju se specifična tehnička rješenja (nestandardna izvedba transformatora). Ovako definirane transformatore karakteriziraju VN i pripadajući regulacijski namoti s velikim brojem zavoja zbog malog u_{zav} uz istovremeno mali presjek vodiča zbog male S_n . Sve navedeno vodi na tehnička rješenja (upleteni namot, predbiranje iz jednog preloženog namota) neuobičajena za transformatore te snage i najvišeg napona opreme.

4. LITERATURA

- [1] M. Biloš, "Izbor glavnih parametara blok-transformatora u elektranama", magistarski rad, 2001.
- [2] Martin J. Heathcote, "J&P Transformer book", Elsevier Ltd., 2007.
- [3] J. Žalac, "Upleteni namot EE (English electric) - interleaved", Končar D&ST, 2010.
- [4] On load tap changer VACUTAP VM technical data 2332907/03 EN , MR, 2013.
- [5] On load tap changer OILTAP MS technical data TD60/03, MR