



dr. sc. Tomislav Kelemen
mr. sc. Branimir Čučić
mr. sc. Martina Čorak
KONČAR – Institut za elektrotehniku d.d., Zagreb

A2 – 06

POPREČNA I UZDUŽNA REGULACIJA NAPONA NA AUTOTRANSFORMATORU 400 MVA, 400/231/(10,5) kV ZA TS ŽERJAVINEC

SAŽETAK

Transformator s poprečnom regulacijom napona koristi se za preusmjeravanje tokova snaga u EES-u. Zbog uloge TS Žerjavinec pri razmjeni električne energije s Mađarskom, tranzitu za Sloveniju i Italiju, te raspodjeli snage u zagrebačkoj prijenosnoj mreži, pokazalo se potrebnim ugraditi u TS Žerjavinec regulacijski transformator snage 400 MVA i omjera transformacije 400/231 kV koji omogućava i poprečnu regulaciju napona. Analize provedene početkom 2002. pokazale su da se već s faznim pomakom od nekoliko stupnjeva između napona na strani 400 i 231 kV može utjecati na tokove energije između 220 i 110 kilovoltnih mreža koje su vezane na TS Žerjavinec. Međutim, prostorni projekti TS Žerjavinec bili su već dovršeni, a odgovarajuća investicijska sredstva planirana. Zato je bilo potrebno naći rješenje koje ne zahtijeva promjenu prostornih projekata niti bitno povećanje planiranih investicijskih sredstava. Zbog ekonomskih prednosti (niža cijena, manji gubici) i potrebe prilagođavanja naponima na strani 400 kV i 220 kV, već ranije je izabran autotransformator s uzdužnom regulacijom napona u nultočki. Kao rješenje koje zadovoljava sve prije postavljene zahtjeve, a omogućava i poprečnu regulaciju napona, ponuđen je autotransformator s regulacijom u nultočki, čiji se regulacijski namot može koristiti i za poprečnu regulaciju napona. Prijelaz s uzdužne na poprečnu regulaciju odvija se u beznaponskom stanju posebnim premještačem koji se dodaje regulacijskoj sklopki. Tako je dobiven prvi naš transformator s mogućnošću uzdužne i poprečne regulacije napona.

Ključne riječi: autotransformator, poprečna regulacija napona, uzdužna regulacija napona

PHASE SHIFTING AUTOTRANSFORMER 400 MVA, 400/231/(10.5) kV FOR SUBSTATION ŽERJAVINEC

SUMMARY

Phase shifting transformer is used for redirection of power flows in electric networks. Because of the importance of substation Žerjavinec in electric power interchange with Hungary, transit of energy for Slovenia and Italy, and power distribution in Zagreb power system, it is necessary to build in a phase shifting transformer 400 MVA, 400/231/(10.5) kV to substation Žerjavinec. Analyses carried out in the beginning of 2002 showed that phase shift of several degrees between the voltages on 400 and 231 kV side can influence on power flows in 220 and 110 kV power networks connected on substation Žerjavinec. However, space project of substation Žerjavinec had been finished and investments planned. Because of that it was necessary to find a solution without changing space project or enlarging investments. Because of economic advantages (lower price and losses) and adapting to voltages on 400 and 220 kV side, autotransformer with direct voltage regulation in neutral has already been chosen. Autotransformer with regulation winding in neutral which can be used for both types of regulation was

chosen as a solution that fulfils all above mentioned conditions and enables both direct and phase shifting regulation. The transfer in no load condition from one type of regulation to another is enabled by a single off load tap changer which is added to a regulation switch. This is the first Croatian transformer with possibility of both direct and phase shifting voltage regulation.

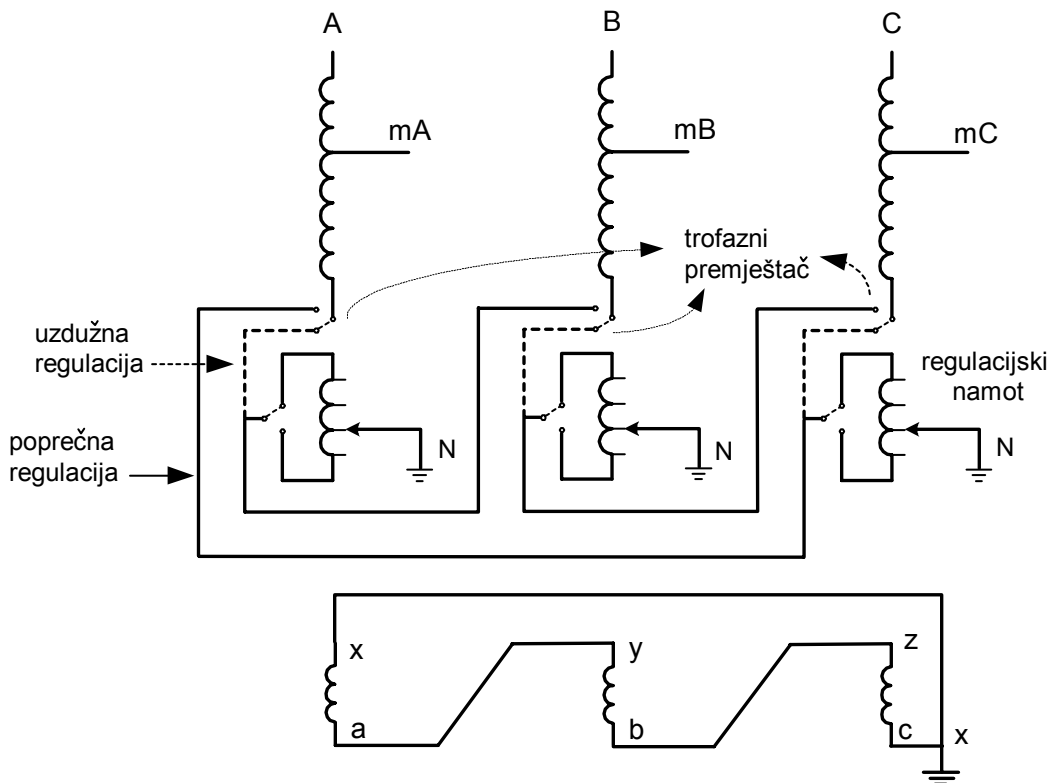
Key words: autotransformer, phase shifting voltage regulation, direct voltage regulation

1. UVOD

TS Žerjavinec (400, 220 i 110 kV) postaje važna transformatorska stanica u EES-u Hrvatske. Naročitu ulogu imat će ovo postrojenje pri razmjeni električne energije s Mađarskom, tranzitu za Sloveniju i Italiju, te raspodjeli snage u zagrebačkoj prijenosnoj mreži. Da bi se moglo djelovati na tokove snage u 220 i 110 kilovoltnim mrežama vezanim na TS Žerjavinec, pokazalo se potrebnim ugraditi u to postrojenje regulacijski transformator snage 400 MVA i omjera transformacije 400/231 kV koji omogućava i poprečnu regulaciju napona. Bilo je zato potrebno naći rješenje koje ne zahtijeva promjenu već dovršenih prostornih projekata TS Žerjavinec ni bitno povećanje planiranih investicijskih sredstava.

2. ODABIR TRANSFORMATORA

Transformator, dakle, mora imati mogućnost uzdužne i poprečne regulacije napona te mogućnost prilagođavanja napona na obje strane (400 i 220 kV). Zbog ekonomskih prednosti (niža cijena, manji gubici) i potrebe prilagođavanja naponima na strani 400 kV, već ranije je izabran autotransformator regulacijom napona u nultočki. S obzirom na postavljena ograničenja i činjenicu da su transformatori višeg napona 220 kV također regulacijski, odabrana je najjeftinija varijanta u kojoj se isti regulacijski namot alternativno koristi za uzdužnu ili za poprečnu regulaciju napona (slika 1).

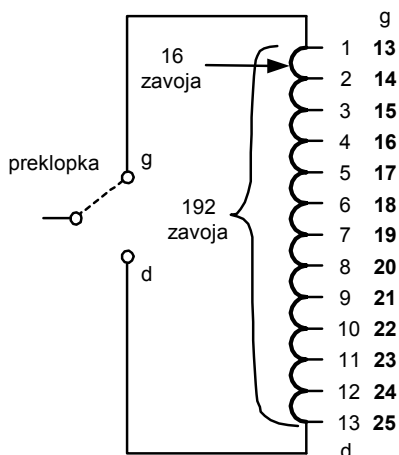


Slika 1. Idejna shema autotransformatora sa uzdužnom i poprečnom regulacijom napona u nultočki. Trofaznim premještačem u beznaponskom stanju bira se uzdužna ili poprečna (kutna) regulacija napona.

Iako ovakav autotransformator ima mogućnost poprečne regulacije napona od samo nekoliko stupnjeva, analize [L1] su pokazale da se i s takvim faznim pomakom između napona na strani 400 i 231 kV može utjecati na tokove energije između 220 i 110 kilovoltnih mreža koje su vezane na TS Žerjavinec.

3. REGULACIJA U NULTOČKI

U konačnoj varijanti projekta autotransformatora, regulacijski namot ima 25 mogućih položaja s korakom regulacije 16 zavoja i ukupno 192 regulacijska zavoja (slika 2).



Slika 2. Regulacijski namot.

Regulacijskim namotom u nultočki autotransformatora istovremeno se utječe na broj zavoja više i niženaponske strane. Zbog toga je regulacija u nultočki autotransformatora nelinearna i opseg regulacije nesimetričan. Karakteristika je regulacije napona u nultočki znatna promjena magnetskog toka tijekom regulacije pa se takva regulacija naziva još i regulacija promjenom toka. Prednost je takve regulacije da s jednim regulacijskim namotom i jednom regulacijskom sklopkom omogućava prilagođavanje naponu napajanja bilo da se radi o uzlaznoj ili silaznoj transformaciji. Drugim riječima, autotransformator s regulacijom u nultočki prilagođen je razmjeni energije.

Regulacijski namot u nultočki izveden je kao reverzibilni. Kad je uključen gornji kraj (g) regulacijskog namota, povećava se ukupni broj zavoja (položaji sklopke 13 do 25), omjer transformacije se smanjuje, što omogućava prilagođavanje smanjenom naponu na strani višeg napona ili povišenom naponu na strani nižeg napona. Kad je uključen donji kraj (d) omjer transformacije se povećava. Položaji 13 do 1 odgovaraju rastu napona na strani višeg napona kad se radi o silaznoj transformaciji, ili sniženju napona na niženaponskoj strani kada je riječ o uzlaznoj transformaciji. Prema tome, 1 i 25 su krajnji položaji, a 13 je srednji ili nulti položaj regulacije.

Primjer raspona uzdužne regulacije napona s regulacijskim namotom u nultočki autotransformatora pokazan je u tablici I. Kada je uključen najveći broj zavoja (položaj sklopke 25), pri silaznoj transformaciji to na VN strani odgovara naponu iznosa 91% U_{1n} , a radna indukcija pada do 78,8% iznosa indukcije u nultom (srednjem) položaju regulacije. Kada je pri silaznoj transformaciji regulacijski namot u protuspoju a regulacijska sklopka u položaju 1, to na VN strani odgovara naponu iznosa 115,5% U_{1n} , a radna indukcija raste do 136,8% iznosa indukcije u nultom položaju regulacije. Pri uzlaznoj transformaciji autotransformator se prilagođava naponu na SN strani i položaj sklopke 25 odgovara naponu iznosa 109,9% U_{2n} , a položaj sklopke 1 naponu iznosa 86,6% U_{2n} . Radi uštede prostora tablica I je skraćena i prikazani su samo neparni položaji sklopke.

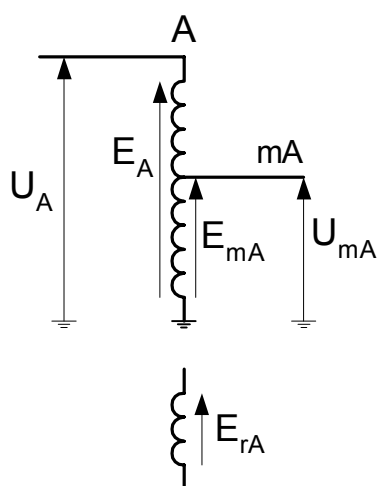
Tablica I. Uzdužna regulacija napona s regulacijskim namotom u nultočki autotransformatora

				S i l a z n a transformacija $U_2=U_2n$, iako se U_1 mijenja					U z l a z n a transformacija $U_1=U_1n$, iako se U_2 mijenja				
Položaj	Nr	N2	N1	U1	U1	ΔU_1	U2	Bm	U1	U2	U2	ΔU_2	Bm
sklopke	Broj zavoja			kV	%	%	kV	%	kV	kV	%	%	%
25	192	906	1428	364,1	91,0	-9,0	231	78,8	400	253,8	109,9	9,9	86,6
23	160	874	1396	369,0	92,2	-7,8	231	81,7	400	250,4	108,4	8,4	88,6
21	128	842	1364	374,2	93,6	-6,4	231	84,8	400	246,9	106,9	6,9	90,6
19	96	810	1332	379,9	95,0	-5,0	231	88,1	400	243,2	105,3	5,3	92,8
17	64	778	1300	386,0	96,5	-3,5	231	91,8	400	239,4	103,6	3,6	95,1
15	32	746	1268	392,6	98,2	-1,8	231	95,7	400	235,3	101,9	1,9	97,5
13	0	714	1236	399,9	100,0	0,0	231	100,0	400	231,1	100,0	0,0	100,0
11	-32	682	1204	407,8	102,0	2,0	231	104,7	400	226,6	98,1	-1,9	102,7
9	-64	650	1172	416,5	104,1	4,1	231	109,8	400	221,8	96,0	-4,0	105,5
7	-96	618	1140	426,1	106,5	6,5	231	115,5	400	216,8	93,9	-6,1	108,5
5	-128	586	1108	436,8	109,2	9,2	231	121,8	400	211,6	91,6	-8,4	111,6
3	-160	554	1076	448,7	112,2	12,2	231	128,9	400	205,9	89,2	-10,8	114,9
1	-192	522	1044	462,0	115,5	15,5	231	136,8	400	200,0	86,6	-13,4	118,4
Položaj	Broj zavoja			kV	%	%	kV	%	kV	kV	%	%	%
sklopke	Nr	N2	N1	U1	U1	ΔU_1	U2	Bm	U1	U2	U2	ΔU_2	Bm
Regulacija s višenaponske strane									Regulacija s niženaponske strane				

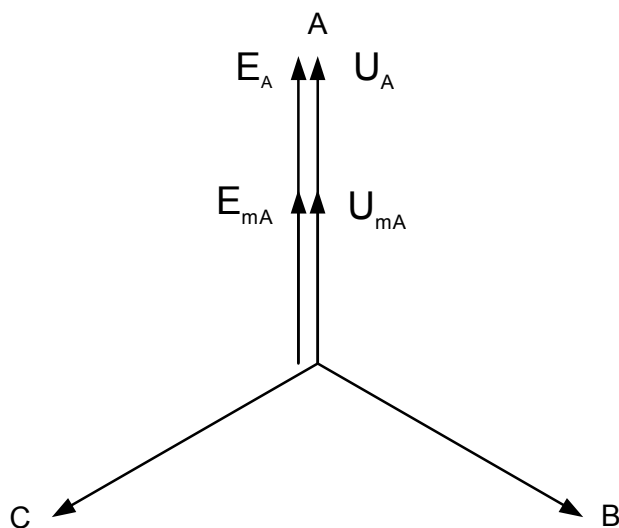
4. VEKTORSKA SLIKA NAPONA U PRAZKOM HODU

U sljedećih nekoliko slika usporedno će se pokazati sheme spoja i odgovarajući fazorski dijagrami napona pri uzdužnoj i poprečnoj regulaciji napona u autotransformatoru s regulacijskim namotom u nultočki.

4.1. Bez uključenog regulacijskog namota

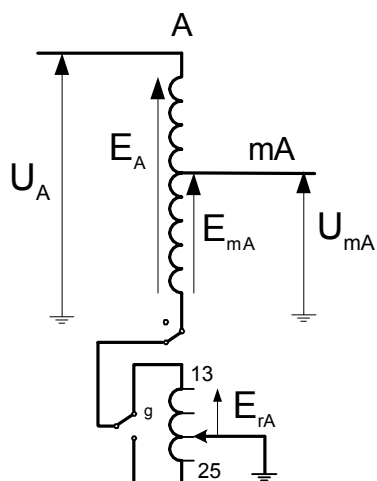


Slika 3. Regulacijski namot nije uključen.

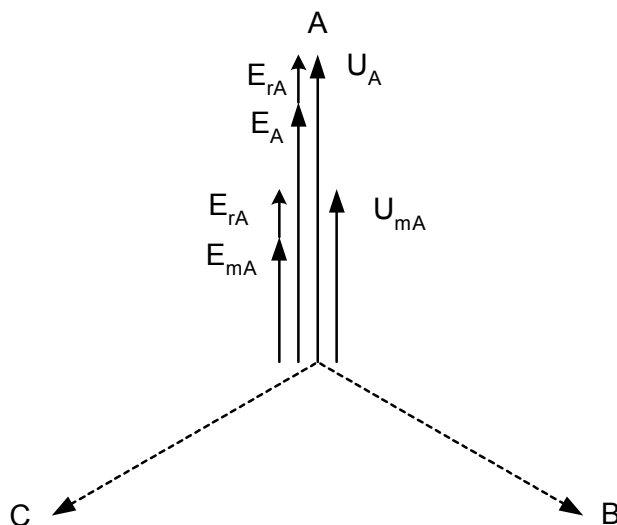


Slika 4. Vektorska slika napona kada regulacijski namot nije uključen.

4.2. Uključena uzdužna regulacija

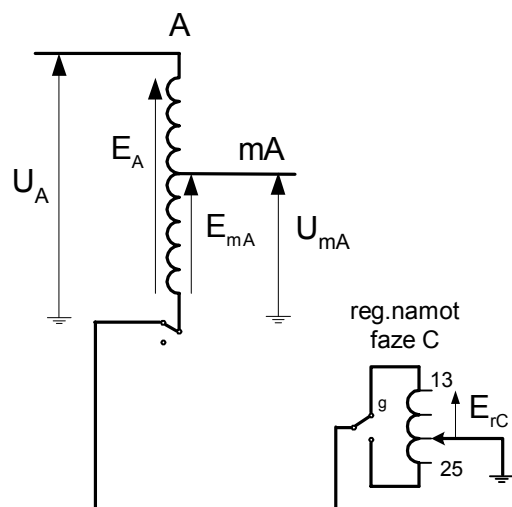


Slika 5. Uzdužna regulacija u minus položaju.

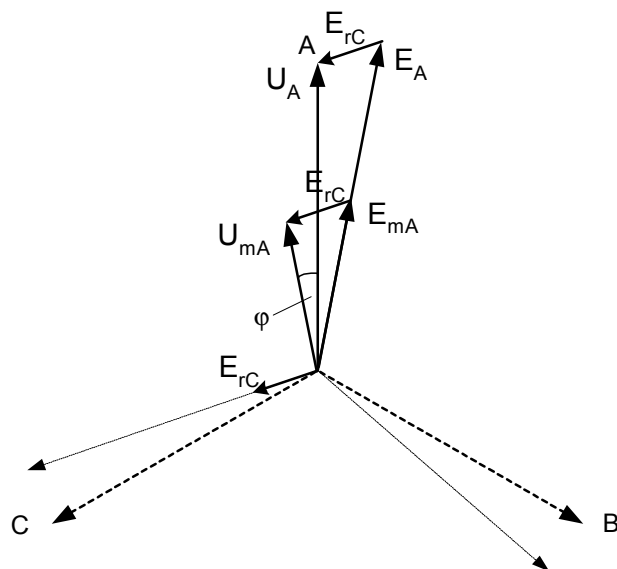


Slika 6. Vektorska slika napona u praznom hodu pri uključenoj uzdužnoj regulaciji u minus položaju.

4.3. Uključena poprečna (kutna) regulacija



Slika 7. Uključena poprečna regulacija. Dio reg. namota faze C se dodaje fazi A.



Slika 8. Vektorska slika napona u praznom hodu pri uključenoj poprečnoj regulaciji kada se fazi A doda dio reg. namota faze C.

Na slici 7 je prikazan slučaj kada je namot faze A spojen s gornjim krajem regulacijskog namota faze C pa je prema slici 8 kut φ između napona U_{mA} i U_A pozitivan (fazor U_{mA} prethodi fazoru U_A). Kada se namot faze A spoji s donjim krajem regulacijskog namota faze C, kut φ između napona U_{mA} i U_A bit će negativan.

Na slikama 3 do 8 oznake su sljedeće: E_A je elektromotorna sila koja se inducira u namotu višeg napona (VN namot) faze A (bez regulacije), dok je E_{mA} elektromotorna sila koja se inducira u namotu srednjeg napona (SN namot) iste faze (također bez regulacije). E_{rC} je elektromotorna sila koja se inducira u regulacijskom namotu faze C, U_A je potencijal izvoda A prema zemlji, dok je U_{mA} potencijal izvoda mA prema zemlji.

5. IZRAČUN KUTA IZMEĐU FAZORA NAPONA U_{mA} I U_A PRI UKLJUČENOJ POPREČNOJ REGULACIJI

Budući je napon proporcionalan broju zavoja, na slikama 7 i 8 se umjesto napona mogu napisati odgovarajući brojevi zavoja (slike 9 i 10)

Uz poznate N_r (broj dodanih regulacijskih zavoja), N_{10} i N_{20} (broj zavoja VN i SN namota bez regulacije), te N_1 i N_2 (ekvivalentni broj zavoja s regulacijom), kut φ između fazora napona U_{mA} i U_A (slika 10) iznosi:

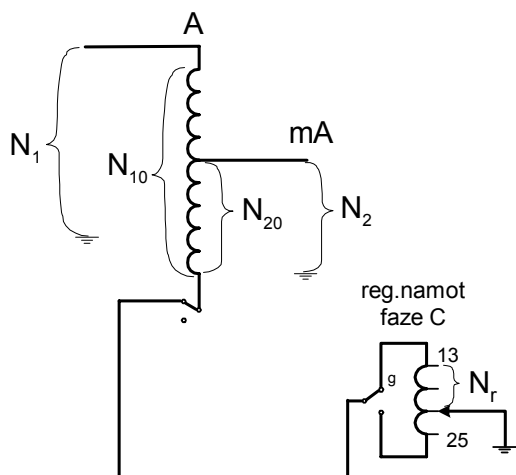
$$\varphi = \pm \arccos \frac{N_1^2 + N_2^2 - (N_{10} - N_{20})^2}{2 \cdot N_1 \cdot N_2} \quad \text{predznak} \begin{cases} + & \text{za } N_r > 0 \text{ (pol. 14-25),} \\ - & \text{za } N_r < 0 \text{ (pol. 1-12)} \end{cases} \quad (1)$$

Pri tome se ekvivalentni broj zavoja s regulacijom dobiva iz sljedećih izraza:

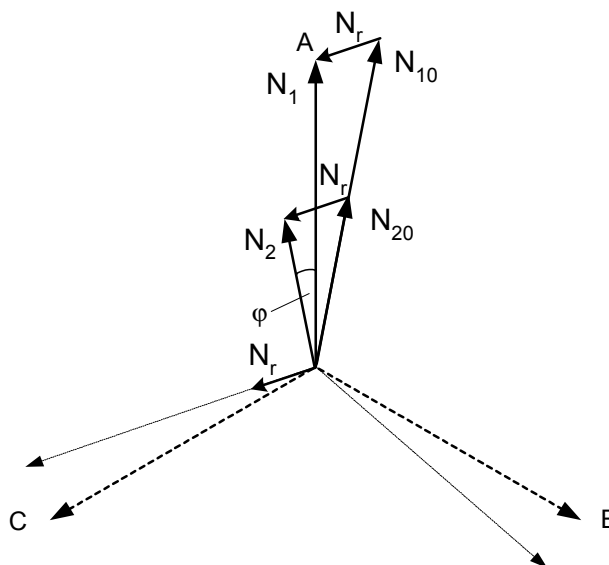
$$N_1 = \sqrt{N_{10}^2 + N_r^2 - N_{10} \cdot N_r} \quad (2)$$

$$N_2 = \sqrt{N_{20}^2 + N_r^2 - N_{20} \cdot N_r} \quad (3)$$

Predznak broja dodanih regulacijskih zavoja N_r je pozitivan za položaje 14-25, a za položaje 1-12 je negativan (tablica II).



Slika 9. Uključena poprečna regulacija napona. Umjesto napona upisani su brojevi zavoja.



Slika 10. Vektorska slika napona u praznom hodu pri uključenoj poprečnoj regulaciji kada se fazi A doda dio reg. namota faze C. Umjesto napona upisani su brojevi zavoja.

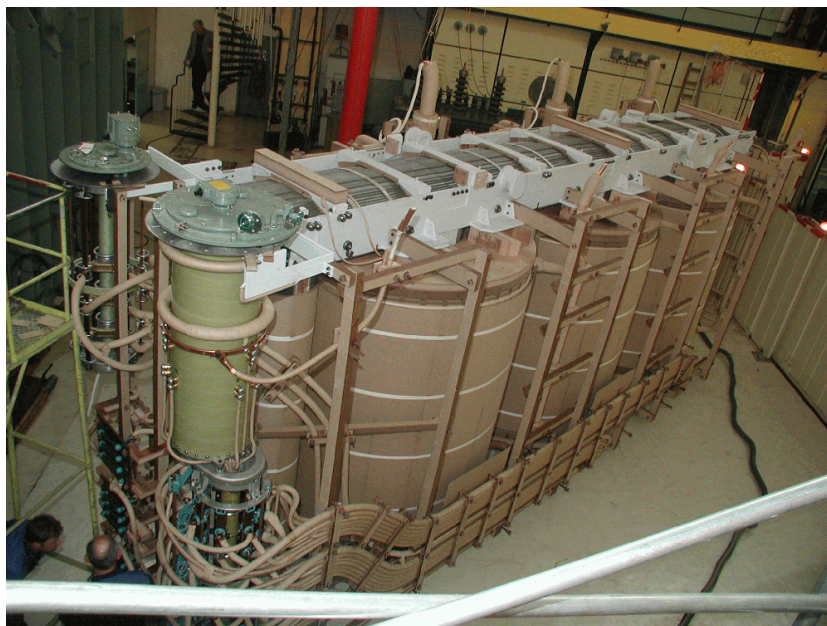
Prema konačnoj verziji projekta autotransformatora brojevi zavoja iznose: $N_{10} = 1236$, $N_{20} = 714$, $N_r = \pm 192$, pa se kut φ u praznom hodu kreće od $6,76^\circ$ pa do $-4,48^\circ$, kako je to pokazano u skraćenoj tablici II (pokazani su samo neparni položaji sklopke).

Tablica II. Poprečna regulacija napona s regulacijskim namotom u nultočki autotransformatora

Položaj sklopke	Nr	N2	N1	Sila z n a transformacija U2=U2n, iako se U1 mijenja					U z l a z n a transformacija U1=U1n, iako se U2 mijenja					φ12 deg
				U1	U1	ΔU1	U2	Bm	U1	U2	U2	ΔU2	Bm	
				kV	%	%	kV	%	kV	kV	%	%	%	
25	192	640,0	1152,1	415,8	104,0	4,0	231	111,6	400	222,2	96,2	-3,8	107,3	6,76
23	160	649,0	1164,3	414,4	103,6	3,6	231	110,0	400	223,0	96,5	-3,5	106,2	5,49
21	128	659,4	1177,2	412,4	103,1	3,1	231	108,3	400	224,0	97,0	-3,0	105,0	4,28
19	96	671,2	1190,9	409,9	102,5	2,5	231	106,4	400	225,4	97,6	-2,4	103,8	3,11
17	64	684,2	1205,3	406,9	101,7	1,7	231	104,3	400	227,1	98,3	-1,7	102,6	2,01
15	32	698,5	1220,3	403,5	100,9	0,9	231	102,2	400	229,0	99,1	-0,9	101,3	0,97
13	0	714,0	1236,0	399,9	100,0	0,0	231	100,0	400	231,1	100,0	0,0	100,0	0,00
11	-32	730,5	1252,3	396,0	99,0	-1,0	231	97,7	400	233,3	101,0	1,0	98,7	-0,91
9	-64	748,1	1269,2	391,9	98,0	-2,0	231	95,4	400	235,8	102,1	2,1	97,4	-1,75
7	-96	766,5	1286,7	387,8	96,9	-3,1	231	93,1	400	238,3	103,2	3,2	96,1	-2,52
5	-128	785,9	1304,7	383,5	95,9	-4,1	231	90,9	400	240,9	104,3	4,3	94,8	-3,24
3	-160	806,0	1323,3	379,3	94,8	-5,2	231	88,6	400	243,6	105,5	5,5	93,4	-3,89
1	-192	826,9	1342,3	375,0	93,7	-6,3	231	86,3	400	246,4	106,7	6,7	92,1	-4,48
Položaj sklopke	Nr	N2	N1	kV	%	%	kV	%	KV	kV	%	%	%	deg
				U1	U1	ΔU1	U2	Bm	U1	U2	U2	ΔU2	Bm	φ12
Regulacija s višenaponske strane									Regulacija s niženaponske strane					

6. PREDNOSTI I NEDOSTACI PONUĐENOG RJEŠENJA

Prema opisanom idejnom prijedlogu izrađena je natječajna dokumentacija i objavljen međunarodni natječaj. Posao je dobila tvornica Končar-Energetski transformatori d.o.o. U vrijeme predaje ovog rada dovršava se i izrada opisanog transformatora (slika 11), a njegovo ispitivanje planirano je za početak svibnja 2003. godine, tako da bi u vrijeme prezentacije ovog rada morao biti u Žerjavincu, možda i u funkciji.



Slika 11. Aktivni dio autotransformatora 400 MVA, 400/231/(10,5)kV s uzdužnom i poprečnom regulacijom napona.

Suditi o prednostima i nedostacima izabranog transformatora nije jednostavno. Nakon projekta TS Žerjavinec i provedenih analiza o tokovima snaga u mreži 220 i 110 kV postavljeni su određeni tehnički zahtjevi i ograničenja. S tim u skladu traženo je i nađeno idejno rješenje transformatora sa svojim dometima koji su analizirani i ocijenjeni prihvatljivim. Problem su zapravo kriteriji. Sa stanovišta nabavne cijene izabrano je zasigurno najjeftinije rješenje poprečne regulacije jer se jedan regulacijski namot (po fazi) može s istom regulacijskom sklopkom koristiti za uzdužnu ili poprečnu regulaciju prema potrebi. Razlika u odnosu na autotransformator bez poprečne regulacije je samo u ugrađenom premještaču kojim se bira vrsta regulacije u beznaponskom stanju.

Regulacija napona u nultočki autotransformatora omogućava prilagođavanje autotransformatora naponima na 400 i 220 kV strani, odnosno silaznu i uzlaznu transformaciju.

Ako se sve skupa gleda sa stanovišta komfora, nedostatak bi svakako bio u tome, što se pri poprečnoj regulaciji ne može po volji odnosno po potrebi mijenjati omjer transformacije. Konkretno, kako se to vidi iz tablice II kada se ostvaruje najveći pozitivni fazni pomak (položaj sklopke 25), ostvaruje se omjer transformacije koji pri silaznoj transformaciji odgovara naponu na VN strani iznosa 415,8 kV ili 104% U_{1n} . To približno odgovara iznosu napona koji se očekuje. Ako međutim, iz bilo kojih razloga stvarni napon na VN strani bude puno niži, u najgorem slučaju može se privremeno napustiti poprečna regulacija i prijeći na uzdužnu.

Poprečna regulacija unosi i dilemu glede djelovanja diferencijalne zaštite osobito prilikom vanjskih kvarova. U tu svrhu provedeni su proračuni za slučajeve jednopolnih kratkih spojeva na 400 i 220 kV strani autotransformatora [L2, L3]. Prema rezultatima tih proračuna i kontakata sa proizvođačem releja diferencijalne zaštite, problema u djelovanju diferencijalne zaštite ne bi trebalo biti.

Izvjestan nedostatak regulacije napona u nultočki je i to što je ona nelinearna. S istim regulacijskim namotom u konkretnom slučaju postiže se pri uzdužnoj regulaciji i silaznoj transformaciji raspon regulacije od +15,5 do -9%, a pri uzlaznoj transformaciji raspon regulacije je od -13,4 do +9,9%. S druge strane, činjenica da se uzdužna regulacija pri silaznoj i pri uzlaznoj transformaciji te silazna i uzlazna transformacija pri poprečnoj regulaciji ostvaruje samo s jednim regulacijskim namotom, jednom regulacijskom sklopkom i jednim premještačem uvelike nadoknađuje nedostatak zbog nelinearnosti regulacije.

Konačno, neke nedostatke, a možda i neke prednosti pokazat će bliska budućnost. S neočekivanim prednostima neće biti problema, a eventualni neočekivani nedostaci će se, ako nikako drugačije, uzeti u obzir pri nabavci sljedećeg transformatora s poprečnom regulacijom.

7. ZAKLJUČAK

Opisano je rješenje autotransformatora 400 MVA, 400/231/(10,5) kV za TS Žerjavinec s regulacijom napona u nultočki u kojem se isti regulacijski namot koristi za uzdužnu i poprečnu regulaciju napona. Takvo rješenje omogućava prilagođavanje naponima na obje strane (400 i 220 kV) te fazni kut regulacije od nekoliko stupnjeva. To je najekonomičnije rješenje u slučaju potrebe za poprečnom regulacijom. Može se primijeniti tamo gdje je dovoljan mali fazni kut poprečne regulacije.

LITERATURA

- [1] Tešnjak Sejid i Pavić Ivica: Proračun tokova snaga s kutnom regulacijom na mrežnom transformatoru 400/220 kV u TS Žerjavinec. Studija FER –Zagreb, ožujak 2002.
- [2] Kelemen Tomislav i Čučić Branimir: Autotransformator 400 MVA, 400/231 kV za TS Žerjavinec, 5. simpozij o vođenju EES-a, CIGRE, Cavtat 21-23.10.2002.
- [3] Kelemen Tomislav i Čučić Branimir: Trofazni regulacijski autotransformator 400 MVA, 400/231/(10,5) kV s regulacijom napona u nultočki za TS Žerjavinec, E-01A5875, Končar Institut za elektrotehniku, Zagreb, veljača 2003.