

# NAPONSKE PRILIKE U PRIJENOSNOJ MREŽI I REGULACIJA NAPONA MREŽNIM TRANSFORMATORIMA

Goran Jerbić, Zagreb

UDK 621.316.1:621.314.2  
PREGLEDNI ČLANAK

Prikazani su rezultati analize utjecaja promjene prijenosnog omjera mrežnih transformatora 400/220 kV i 400/110 kV na naponske prilike u interkonektivnim čvorištima. Naglašeni su neki od problema vezanih za regulaciju napona mrežnim transformatorima i izbor načina i opsega regulacije transformatora u transformatorskim stanicama 400/220/110 kV Žerjavinec, odnosno Ernestinovo.

**Ključne riječi:** napon, naponske prilike, opterećenje sustava, transformator, regulacija napona, kompenzacija.

## 1. UVOD

Mrežni autotransformatori su osnovna oprema svakog elektroenergetskog sustava – posebno njene prijenosne mreže. U prijenosnoj mreži Hrvatske elektroprivrede (HEP-a) koriste se kao standardni **mrežni transformatori** nazivne snage **400 MVA** i nazivnog prijenosnog omjera  **$400 \pm 1 \times 5\% / 231 / 31.5$  kV** za sprezanje mreža nazivnih napona 400 i 220 kV; dok se za sprezanje mreža napona 400 i 110 kV koriste standardni mrežni transformatori nazivne snage **300 MVA** i nazivnog prijenosnog omjera  **$400 \pm 2 \times 2.5\% / 115 / 31.5$  kV**. Obje standardne mrežne transformatorske jedinice su s **regulacijom u beznaponskom stanju**. Navedimo i treću standardnu jedinicu u prijenosnoj mreži HEP-a, mrežni transformator nazivne snage 150 MVA i prijenosnog omjera  **$220 \pm 12 \times 1.25\% / 115 / 31.5$  kV** za sprezanje mreža nazivnih napona 220 i 110 kV. Ova posljednja standardna mrežna transformatorska jedinica opremljena je regulacijskom preklopkom i ima mogućnost regulacije napona pod opterećenjem.

Iskustva iz dosadašnjeg pogona prijenosne mreže HEP-a pokazuju da se mogućnost regulacije napona mrežnim transformatorima superponirane mreže 400/220 kV i 400/110 kV premda je postojala do sada nije u znatnijoj mjeri koristila. Razloga tome može biti više, no navedimo ovdje samo najvažnije:

1. postojeći transformatori 400/220 kV i 400/110 kV imaju relativno mali opseg regulacije  $\pm 5\%$  (420 – 380 kV/nije) i to s regulacijom u beznaponskom stanju
2. procedura promjene prijenosnog omjera postojećih transformatora je složena i zahtijeva njegovo iskapčanje (što može biti nepovoljno u vrijeme velikih opterećenja mreže)

3. mreža 400 kV u pogledu izvora praktično je prazna (samo RHE Obrovac)
4. promjenom prijenosnog omjera mrežnih transformatora poboljšanje naponskih prilika na jednoj strani transformatora je na uštrb naponskih prilika na drugoj strani (jalova energija prelijeva se iz jednog naponskog nivoa u drugi)
5. regulacija napona mrežnim transformatorima je neefikasna kada su mreže gornjeg i donjeg napona jednako krute
6. mrežni transformatori 220 / niže i 110 / niže imaju širok opseg regulacije pod opterećenjem ( $220 \pm 12 \times 1.25\% / 115$  kV ili 187 – 253 kV / 115 kV odnosno  $110 \pm 10 \times 1.5\% / 35$  kV ili 93.5 – 126.5 kV / 35 kV), pa se njima mogu kompenzirati znatnija odstupanja napona u 220 i 110 kV mreži.

S obzirom na predstojeću izgradnju Žerjavince i Ernestinova u članku se nastojalo odgovoriti na neka pitanja vezana uz odabir načina i opsega regulacije planiranih novih mrežnih transformatora u elektroenergetskom sustavu – transformatorskoj stanici Žerjavinec, odnosno Ernestinovu. Razmatra se opravdanost uvođenja regulacije pod opterećenjem na mrežnim transformatorima 400/220 kV, odnosno 400/110 kV.

## 2. MOGUĆNOST REGULACIJE NAPONA TRANSFORMATORIMA U TS ŽERJAVINEC

### 2.1. Regulacija napona transformatorom 400/220 kV

#### 2.1.1. Standardni transformator $400 \pm 1 \times 5\% / 231 / 31.5$ kV 400 MVA

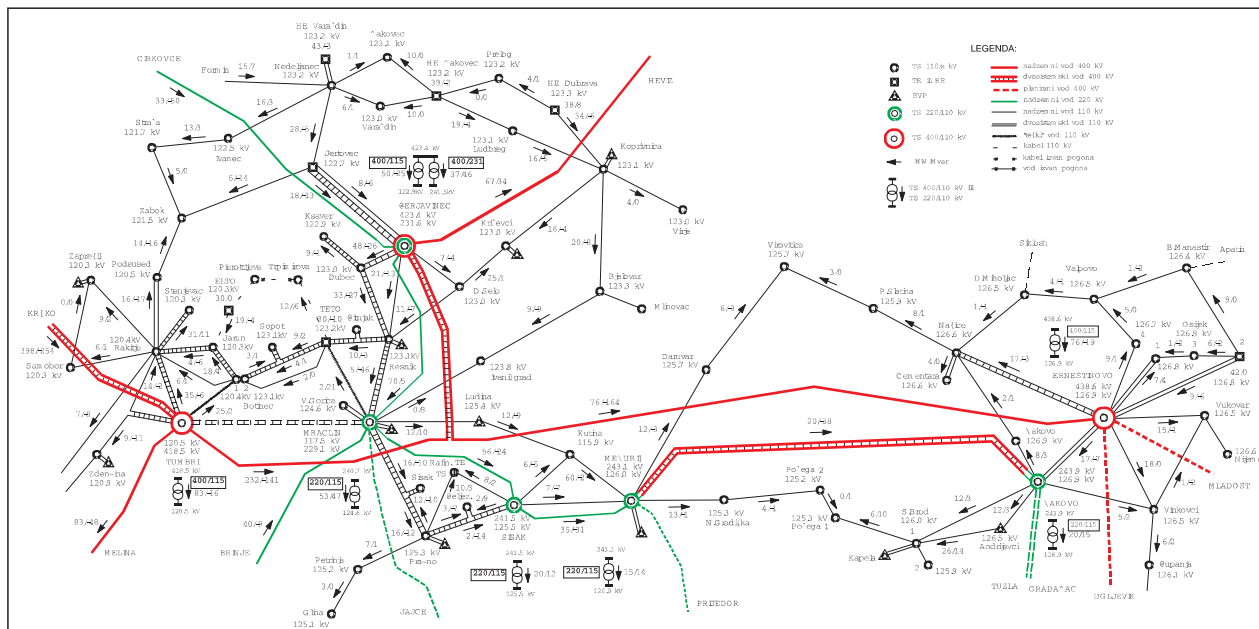
Mogućnost regulacije napona promjenom prijenosnog omjera standardnog transformatora 400/220 kV u Žerjavincu analizirana je u **dva krajnja režima** rada elek-



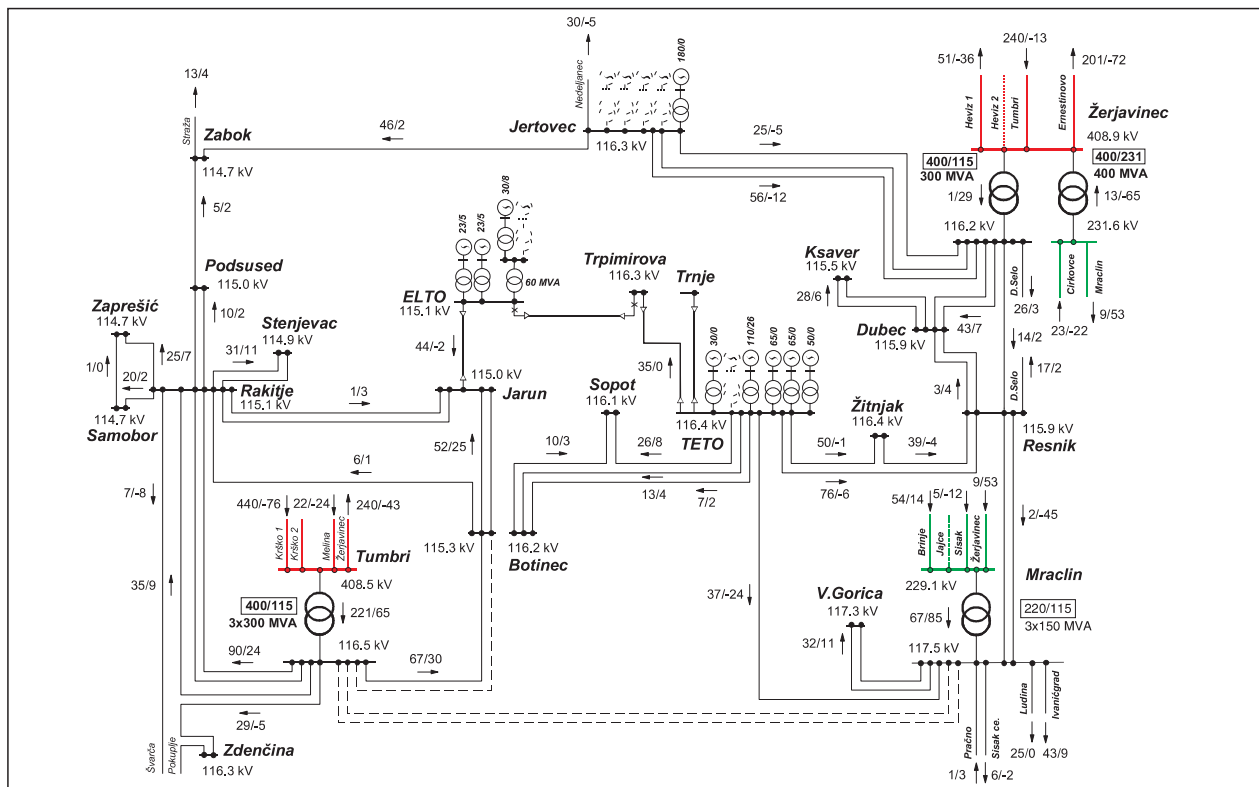
konfiguracijama bez transformacije 400/110 kV u Žerjavincu mreže 400 i 110 kV spregnute preko Mraclina. Na napon u Mraclinu dominantnije utječe angažman TE Sisak.

Kada bismo prijenosnu mrežu u minimumu opterećenja kompenzirali npr. prigušnicom za kompen-

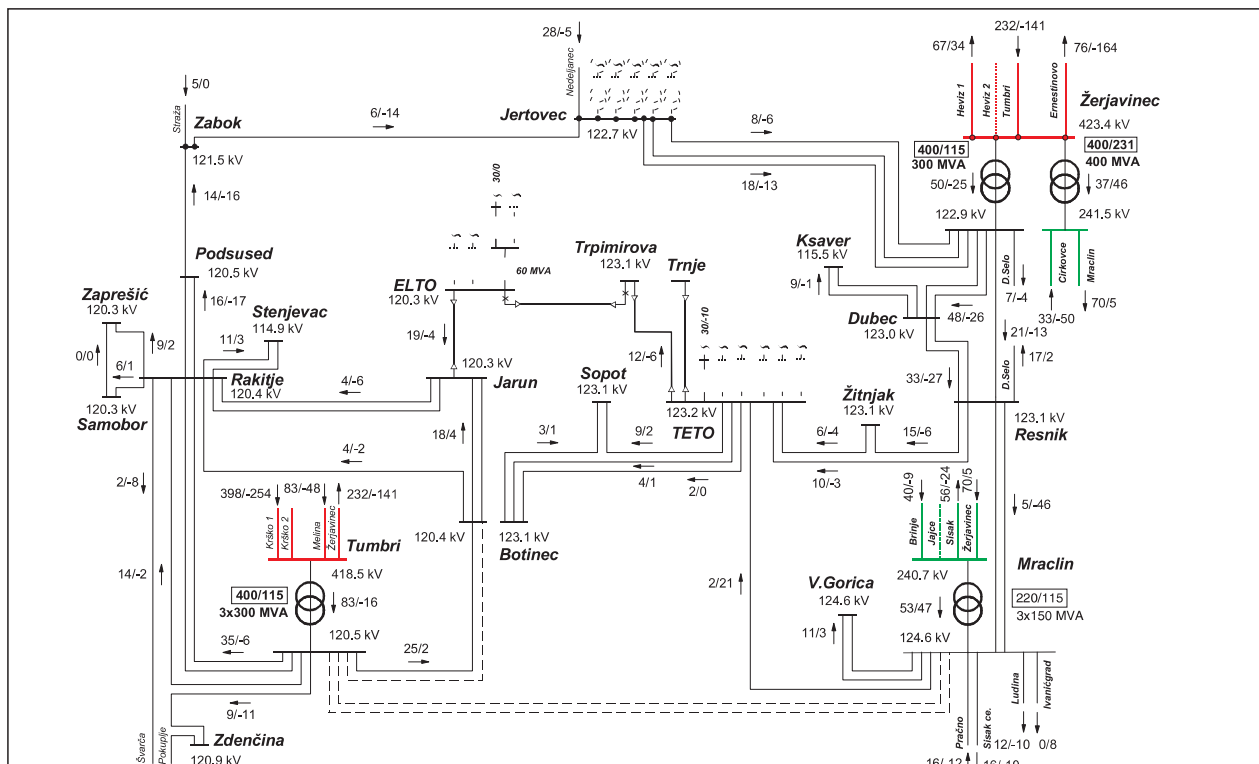
zaciju snage 100 Mvar u Ernestinovu, slika 5 (dolje lijevo), razina očekivanih napona na primaru i sekundaru transformatora bi se smanjila i postojala bi mogućnost regulacije sekundarnog napona unutar dopuštenih granica 232 – 244 kV (5.2 %) uz promjenu primarnog napona u granicama 412 – 418 kV (1.5 %).



Slika 2. Planirano stanje prijenosne mreže na području sjeverne Hrvatske za minimum opterećenja 920 MW na razini prijenosa 2000. godine



Slika 3. Planirano stanje sekcionirane prijenosne mreže na području Zagreba za maksimum opterećenja 2758 MW na razini prijenosa 2000. godine



Slika 4. Planirano stanje sekcionirane prijenosne mreže na području Zagreba za minimum opterećenja 920 MW na razini prijenosa 2000. godine

Razina napona smanjuje se i ponovnim povezivanjem 400 kV prijenosne mreže na području Slavonije. Budući da je na modelu Slavonija radijalno napajana, zatvaranjem radijalnog kraka prijenosne mreže u petlju jalova snaga raspršuje se u okolne sustave.

### 2.1.2. Regulacijski transformator

$400 \pm 12 \times 1.25\% / 231 / 31.5 \text{ kV } 400 \text{ MVA}$

Mogućnosti regulacije napona promjenom prijenosnog omjera regulacijskog transformatora 400/220 kV sa širim opsegom regulacije u Žerjavincu analizirana je na modelu 2000. godine u konfiguraciji povezane i sekcionirane 110 kV mreže na području Zagreba. Pretpostavljen je regulacijski transformator sličnih karakteristika kao postojeći standardni transformator sa širim opsegom regulacije: nazivne snage  $S_n = 400 \text{ MVA}$ , nazivnog prijenosnog omjera  $400 \pm 12 \times 1.25\% / 231 / 31.5 \text{ kV}$ , regulacijskog opsega  $\pm 15\% U_n$ , napona kratkog spoja  $u_{k12} = 12\%$  i ostalim karakteristikama kao kod standardnog transformatora.

Rezultati proračuna u području prijenosnih omjera 380/231 kV do 420/231 kV indentični su onima dobivenim za standardni transformator, slika 5. Razlika između regulacijskog transformatora sa širim opsegom regulacije i standardnih transformatora je području prijenosnih omjera ispod 380/231 i iznad 420/231 kV. U oba slučaja su uz nazivni prijenosni omjer primarni i sekundarni naponi iznad standardom dopuštene

razine 245 kV za sekundarnu 220 kV stranu i 420 kV za primarnu 400 kV stranu. Povećanjem prijenosnog omjera sekundarni napon pada u granice dopuštenih napona, a primarni se izdiže iznad dopuštene granice; dok smanjenjem prijenosnog omjera primarni pada u granice dopuštenih napona, a sekundarni se izdiže iznad granice dopuštenih napona. U području standardom dopuštenih napona 380 – 420 kV promjenom prijenosnog omjera ne može se postići prihvatljivo rješenje, neovisno o tome radi li se o standardnom ili regulacijskom transformatoru bez kompenzacije prijenosne mreže.

Regulacijski transformator mogao bi u minimumu raditi s prijenosnim omjerom 430/231 kV, što rezultira primarnim naponom od oko 427 kV i sekundarnim naponom od 232 kV. Primarni bi napon tada bio iznad standardom trajno dopuštene razine 420 kV, no regulacijski transformator bi ga mogao trajno podnositi. Kompenzira li se prijenosna mreža prigušnicom 100 Mvar u Ernestinovu, tada primarni napon pada na 421 kV za isti prijenosni omjer, uz napon na sekundaru od oko 228 kV.

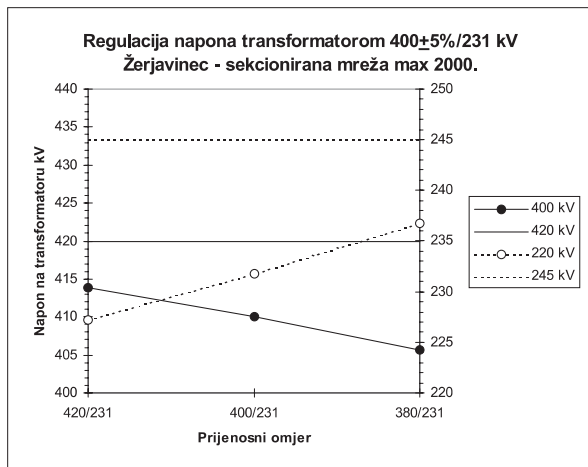
## 2.2. Regulacija napona transformatorom 400/110 kV

### 2.2.1. Standardni transformator $400 \pm 2 \times 2.5\% / 115 / 31.5 \text{ kV } 300 \text{ MVA}$

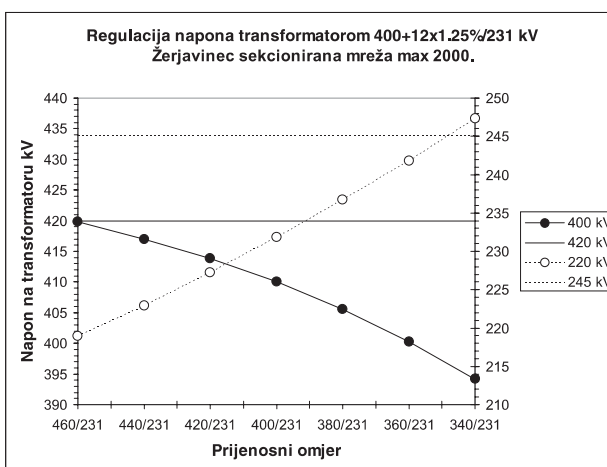
Mogućnost regulacije napona promjenom prijenosnog omjera standardnog transformatora 400/110 kV u Žerjavincu analizirana je na modelu 2000. godine samo u

**TS ŽERJAVINEC – REGULACIJA NAPONA TRANSFORMATORIMA 400/220 kV**

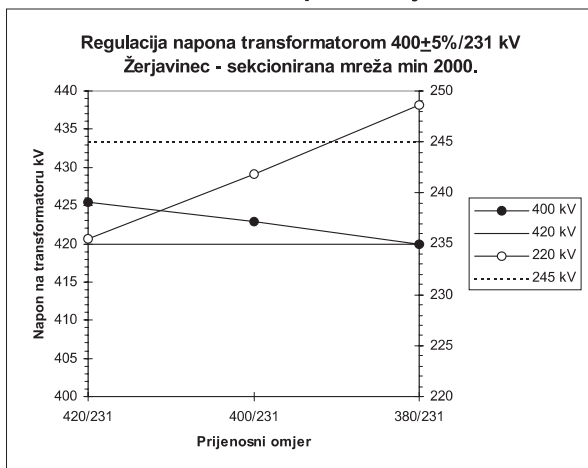
**STANDARDNI  
Maksimum opterećenja**



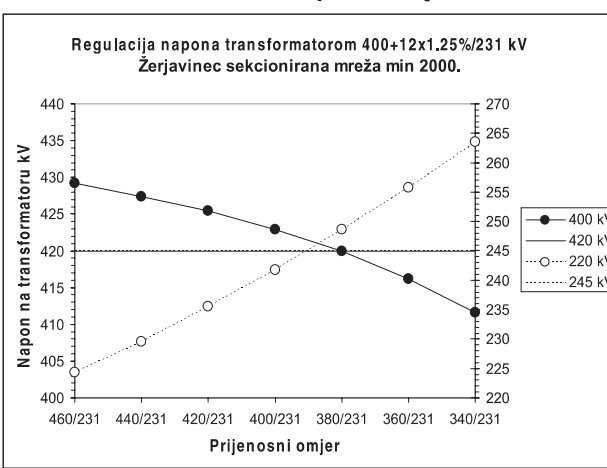
**REGULACIONI  
Maksimum opterećenja**



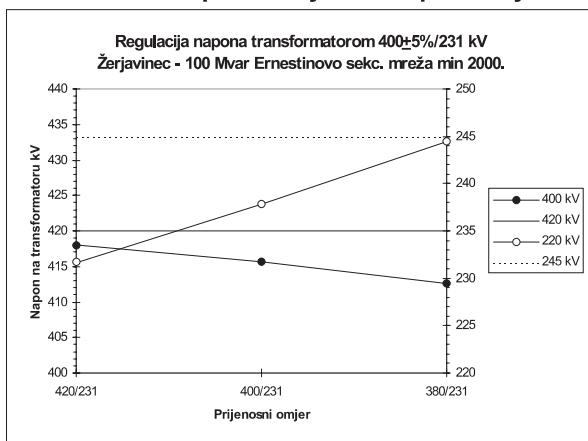
**Minimum opterećenja**



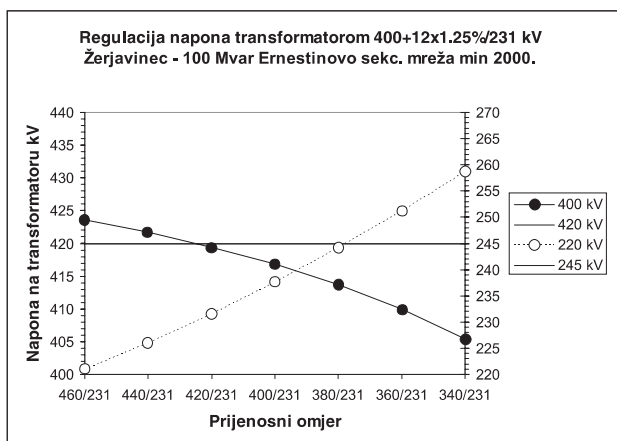
**Minimum opterećenja**



**Minimum opterećenja – kompenzacija**



**Minimum opterećenja – kompenzacija**

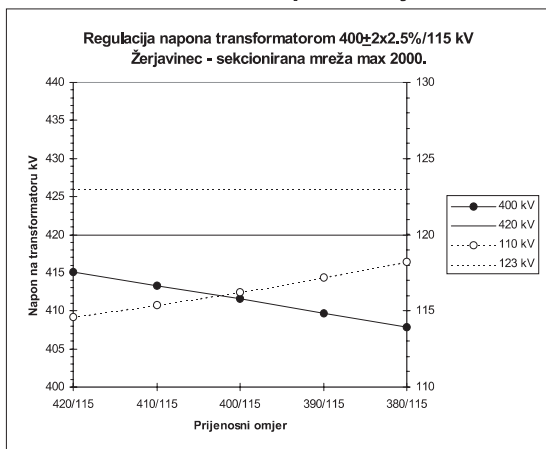


Slika 5. Regulacija napona promjenom prijenosnog omjera standardnog transformatora 400±1x5%/231 kV (lijevo) i regulacijskog transformatora 400±12x1.25%/231 kV 400 MVA (desno), u maksimumu opterećenja (lijevo), minimumu opterećenja (u sredini) i minimumu opterećenja sustava s kompenzacijskom prigušnicom 100 Mvar u Ernestinovu (dolje) na modelu 2000. godine

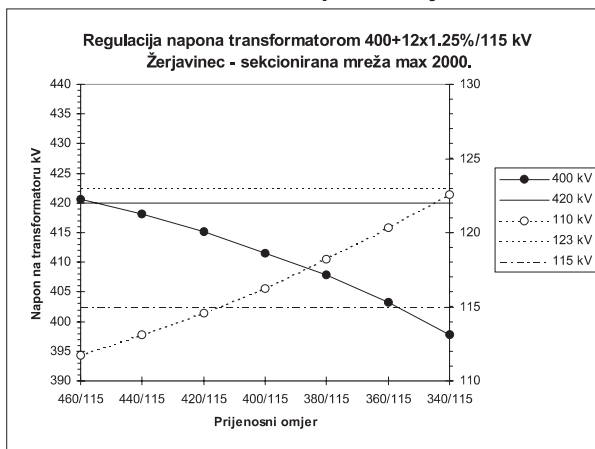


### TS ŽERJAVINEC – MOGUĆNOST REGULACIJE NAPONA TRANSFORMATOROM 400/110 kV

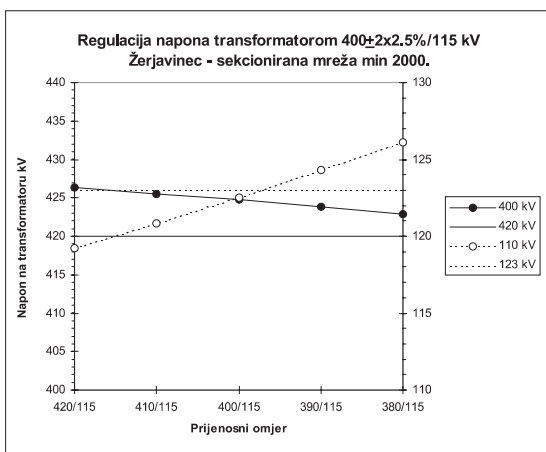
#### STANDARDNI Maksimum opterećenja



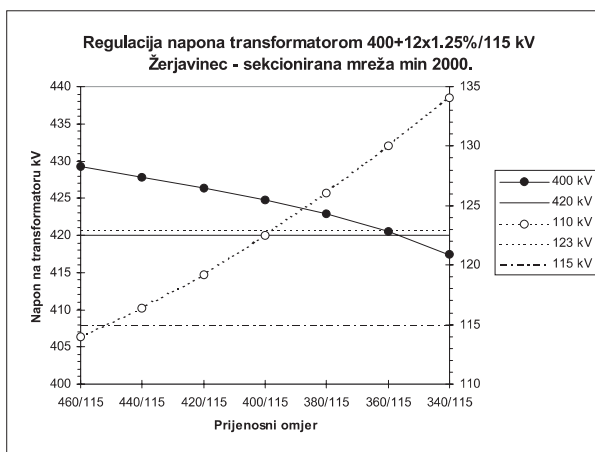
#### REGULACIONI Maksimum opterećenja



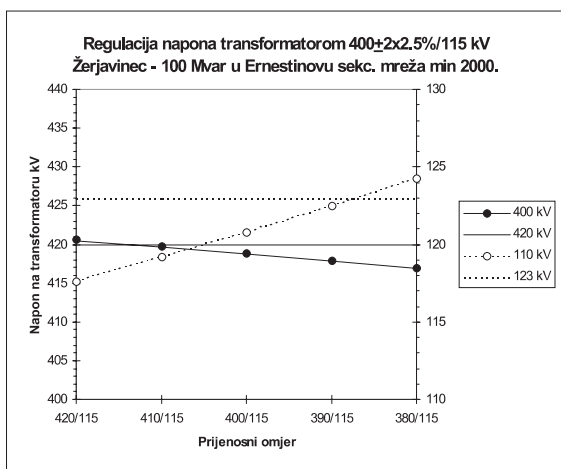
#### Minimum opterećenja



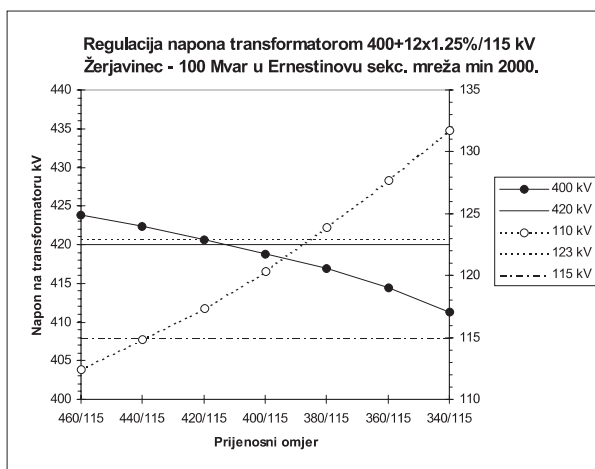
#### Minimum opterećenja



#### Minimum opterećenja – kompenzacija



#### Minimum opterećenja – kompenzacija



Slika 6 – Regulacija napona promjenom prijenosnog omjera standardnog transformatora 400±1x5%/115 kV (lijevo) i regulacijskog transformatora 400±12x1.25%/115 kV 300 MVA (desno), u maksimumu opterećenja (lijevo), minimumu opterećenja (u sredini) i minimumu opterećenja sustava s kompenzacijskom prigušnicom 100 Mvar u Ernestinovu (dolje) na modelu 2000. godine

konfiguraciji sekcionirane 110 kV mreže na području Zagreba, a provjerena je i na modelu 2010. godine za dva krajnja režima rada elektroenergetskog sustava, unutar kojih se mogu očekivati moguća stanja sustava: zimskog maksimuma i ljetnog minimuma.

Promjenom prijenosnog omjera standardnog mrežnog transformatora 400/110 kV (s regulacijom u beznaponskom stanju – off-load) može se u maksimumu opterećenja utjecati na napon na sekundaru mrežnog transformatora u granicama 114 – 118 kV (3.7 %), što povlači za sobom promjenu primarnog napona u granicama 415 – 408 kV (1.8 %), slika 6. U minimumu opterećenja sustava napon na primarnoj strani transformatora u krajnjem gornjem položaju +5 % (420/115 kV) je **426 kV**, dok je na sekundaru 119 kV. Za srednji položaj 0 % (ili nazivni prijenosni omjer 400/115 kV) dobiveni napon na primaru transformatora je **425 kV**, a na sekundaru 115 kV. U krajnjem donjem položaju -5 % (390/115 kV) napon na primarnoj strani je **422 kV**, a na sekundarnoj 126 kV. Standardni transformator 400/110 kV u minimumu opterećenja sustava ne bi smio raditi zbog previsokog primarnog napona, dok se s obzirom na sekundarni napon na sekundaru u minimumu opterećenja sustava ne bi smjeli koristiti prijenosni omjeri donji i krajnji donji položaji 390/115 kV i 380/115 kV.

U minimumu opterećenja sustava promjenom prijenosnog omjera transformatora moguće je regulirati napon na sekundaru transformatora u granicama 119 – 126 kV (6.4 %) uz promjenu napona na primaru u granicama 426 – 423 kV (0.8 %). Primarni su naponi u minimumu opterećenja sustava izvan granica trajno dopuštenih napona za standardni mrežni transformator (bez obzira koji prijenosni omjer odabrali). Sekundarni napon od 126 kV mogao bi se granično kratkotrajno tolerirati s obzirom da je opseg regulacije standardnih mrežnih transformatora 110/niže od 15 %, pa je gornja granica primarnog napona u 110 kV mreži s obzirom na opseg regulacije 126.5 kV.

Kada bi se prijenosna mreža kompenzirala npr. prigušnicom za kompenzaciju snage 100 Mvar u Ernestinovu, slika 6 (dolje desno), tada bi se razina napona na primaru i sekundaru transformatora smanjila i postojala bi mogućnost regulacije sekundarnog napona u granicama 118 – 124 kV (5.5 %) uz promjenu primarnog napona u granicama 421 – 416 kV (1.3 %).

### 2.2.2. Regulacijski transformator

*400±12x1.25%/115/31.5 kV 300 MVA*

Mogućnosti regulacije napona primjenom regulacijskog mrežnog transformatora sa širim opsegom regulacije 400±12x1.25%/115 kV u Žerjavincu (15 %) i mogućnošću regulacije napona pod opterećenjem analizirana je u nastavku. Promjenom prijenosnog omjera regulacijskog transformatora 400±12x1.25%/115 kV (pod opterećenjem on-load) može se u maksimumu opterećenja utjecati na napon

na sekundaru mrežnog transformatora u granicama 112-123 kV (10.0 %), što povlači za sobom promjenu primarnog napona u granicama 421-398 kV (5.8 %), slika 6.

U minimumu opterećenja sustava napon na primarnoj strani transformatora u krajnjem gornjem položaju +15 % (460/115 kV) je 429 kV, dok je odgovarajući napon na sekundaru 114 kV. Za srednji položaj 0 % (400/115 kV) napon dobiven na primaru transformatora je 425 kV, a na sekundaru 123 kV. U krajnjem donjem položaju -15 % (380/115 kV) napon na primarnoj strani je 418 kV, a na sekundarnoj 134 kV. U minimumu opterećenja sustava promjenom prijenosnog omjera regulacijskog transformatora moguće je regulirati napon na sekundaru transformatora u širim granicama 114 – 134 kV (18 %) uz promjenu napona na primaru u granicama 429 – 418 kV (2.8 %). Napon od 115 kV na sekundaru regulacijskog transformatora (postavna željena vrijednost) mogao bi se u minimumu opterećenja sustava postići postavljanjem prijenosnog omjera na 450/115 kV uz napon na primarnoj strani od 428 kV.

Za razliku od standardnog mrežnog transformatora, kod kojeg je napon na primaru u minimumu opterećenja sustava u krajnjem gornjem položaju 420/115 kV bio previsok **426 kV** (uz napon na sekundaru 119 kV); regulacijski transformator u položaju 450/115 kV može u minimumu opterećenja sustava trajno podnositi primarni napon od 428 kV uz napon na sekundaru od 115 kV (zadan).

Kada bi se prijenosna mreža kompenzirala npr. prigušnicom za kompenzaciju 100 Mvar u Ernestinovu, slika 6 (dolje desno), tada bi se razina napona na primaru i sekundaru transformatora smanjila i postojala bi mogućnost regulacije sekundarnog napona u granicama 113-132 kV (+2.7 % – +20.0 % ili 17.3 %) uz promjenu primarnog napona u granicama 424 – 411 kV (+6 % – +2.8 % ili 3.2 %). Napon 115 kV na sekundaru regulacijskog transformatora u konfiguraciji s prigušnicom, sada se postiže kod prijenosnog omjera 440/115 kV uz napon na primaru 408 kV. Prijenosni omjer regulacijskog transformatora ovisi kako o prilikama u sustavu (minimumu maksimumu opterećenja sustava, angažmanu elektrana, konfiguraciji prijenosne mreže, kompenzaciji itd.), tako i o vrijednosti napona na sekundaru koja se regulacijskim transformatorom želi održavati. Potreban opseg regulacije mrežnog transformatora stoga nije jednostavno procijeniti jer ovisi o velikom broju utjecajnih parametara.

Rezultati provedenih ispitivanja pokazuju da se u **Žerjavincu u minimumu opterećenja sustava mogu očekivati primarni naponi viši od trajno dopuštenih za standardne transformatore** (420 kV), u oba vremenska presjeka (2000. i 2010. godini). Na sekundarima transformatora naponi su također blizu (245 kV) ili na samoj granici standardom trajno dopuštenih vrijednosti (123 kV). **Promjenom prijenosnog omjera**

Tablica 1.

Rezultati proračuna naponskih prilika u TS Žerjavinec za nazivni prijenosni omjer transformatora 400/231 i 400/115 kV									
Model	Napon na strani	400/231				400/115		400/231 i 400/115	
		povezana		sekcionirana		sekcionirana		sekcionirana	
		max	min	max	min	max	min	max	min
	400 kV	410.2 kV	<b>422.4 kV</b>	410.0 kV	<b>422.9 kV</b>	411.6 kV	<b>424.8 kV</b>	408.9 kV	<b>423.4 kV</b>
<b>2000</b>	220 kV	231.8 kV	240.1 kV	231.8 kV	241.8 kV	-	-	231.6 kV	241.5 kV
	110 kV	-	-	-	-	116.2 kV	122.5 kV	116.2 kV	122.9 kV
	400 kV							413.3 kV	<b>424.9 kV</b>
<b>2010</b>	220 kV							233.3 kV	242.2 kV
	110 kV							116.3 kV	123.0 kV

Napomena: 2000 – u pogonu samo jedna trojka Heviz – Žerjavinec  
2010 – u pogonu obje trojke Heviz – Žerjavinec

**mrežnih transformatora primarni naponi mogli bi se smanjiti samo na račun povećanja sekundarnih napona koji su ionako na gornjoj granici dopuštenih.**

Osnovni uzrok visokih napona u Žerjavincu u minimumu opterećenja sustava su slabo opterećeni vodovi 400 kV mreže – **radijalno napajana Slavonija** (na modelu 2000. godine) i **pojačanje južnog poteza dvo-sistemskim 400 kV vodovima** (na modelu 2010. godine). Ispitivanjima na modelu utvrđeno je da će naponi biti unutar standardom propisanih granica ako je u minimumu opterećenja sustava 2000. godine angažirana prigušnica u Ernestinovu (snage 100 Mvar). Na modelu 2010. godine po stavljanju druge trojke voda Žerjavinec – Heviz u pogon i pojačanju južnog 400 kV poteza trebat će predvidjeti prigušnice za kompenzaciju i u Žerjavincu.

### 3. MOGUĆNOST REGULACIJE NAPONA TRANSFORMATORIMA U ERNESTINOVU

#### 3.1. Regulacija napona transformatorom 400/110 kV

##### 3.1.1. Standardni transformator

$$400 \pm 2 \times 2.5\% / 115 / 31.5 \text{ kV } 300 \text{ MVA}$$

Mogućnost regulacije napona promjenom prijenosnog omjera transformatora 400/110 kV u Ernestinovu analizirana je na modelu elektroenergetskog sustava 2000. i 2010. godine za zadanu plansku konfiguraciju prijenosne mreže (radijalno napajanje Slavonije) i dva krajnja režima rada elektroenergetskog sustava unutar kojih se mogu očekivati moguća stanja sustava: stanje zimskog maksimuma i ljetnog minimuma. Promjenom prijenosnog omjera standardnog mrežnog transformatora 400/110 kV (u beznaponskom stanju - "off-load") može se u maksimumu opterećenja utjecati na napon na sekundaru mrežnog transformatora u granicama 112 – 119 kV (od +1.5 % do +8.2 %), što povlači za sobom promjenu primarnog napona u granicama 412 – 402 kV, slika 7.

U minimumu opterećenja sustava napon dobiven na primarnoj strani transformatora u krajnjem gornjem položaju +5 % (420/115 kV) je previsok **440 kV**, dok je

na sekundaru 122 kV. Za srednji položaj 0 % (400/115 kV), napon dobiven na primaru transformatora je **436 kV**, a na sekundaru **126 kV**. U krajnjem donjem položaju -5 % (390/115 kV) napon na primarnoj strani je **432 kV**, a na sekundarnoj **130 kV**. Standardni transformator 400/110 kV u minimumu opterećenja sustava ne bi smio raditi zbog previsokog primarnog napona, dok bi se s obzirom na sekundarni napon transformator u minimumu opterećenja sustava smio koristiti samo u **krajnjem gornjem položaju 420/115 kV**. Promjenom prijenosnog omjera transformatora u minimumu opterećenja sustava napon na sekundaru transformatora mogao bi se regulirati u granicama **122 – 130 kV** uz promjenu napona na primaru u granicama **432 – 440 kV**. **Primarni napon je u minimumu opterećenja sustava izvan granica trajno dopuštenih napona za standardni mrežni transformator.**

Kada bi se prijenosna mreža kompenzirala npr. prigušnicom za kompenzaciju snage 100 Mvar u Ernestinovu, slika 7 (dolje lijevo), tada bi se razina napona na primaru i sekundaru transformatora smanjila i postojala bi mogućnost regulacije sekundarnog napona u granicama 113 – 120 kV uz promjenu primarnog napona u granicama 421 – 410 kV.

Tablica 2.

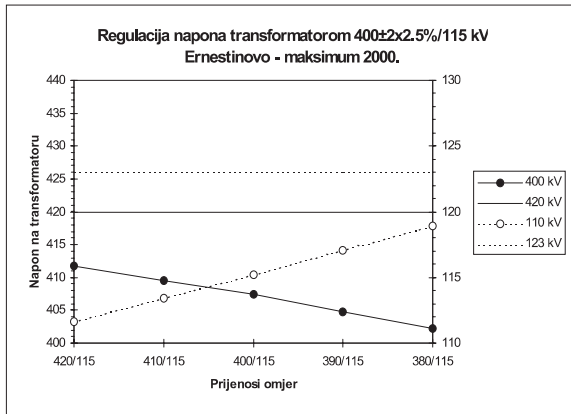
Rezultati proračuna naponskih prilika u TS Ernestinovo za nazivni prijenosni omjer transformatora 400/115 i 400/231 kV					
Model	Napon strani	400/115 kV		400/115 i 400/231 kV	
		max	min	max	min
	400 kV	407.4 kV	<b>436.0 kV</b>		
<b>2000</b>	220 kV	-	-		
	110 kV	115.2 kV	<b>125.7 kV</b>		
	400 kV			409.7 kV	<b>427.3 kV</b>
<b>2010</b>	220 kV			232.0 kV	243.5 kV
	110 kV			116.9 kV	<b>123.5 kV</b>

Napomena: 2000 – u pogonu jedna trojka Heviz – Žerjavinec  
2010 – u pogonu obje trojke Heviz – Žerjavinec

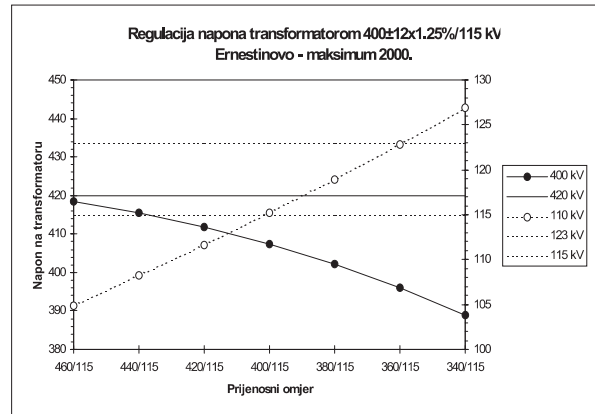


**TS ERNESTINOVO — MOGUĆNOST REGULACIJE NAPONA TRANSFORMATOROM 400/110 kV**

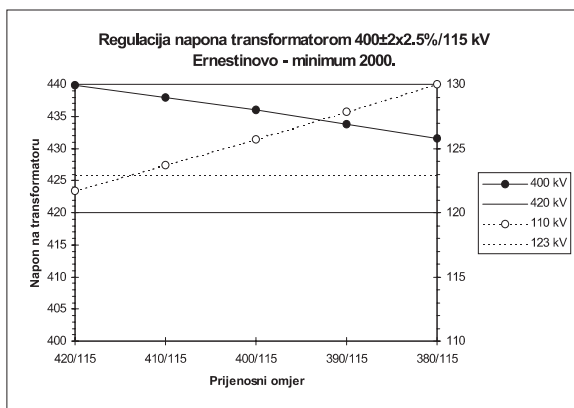
**STANDARDNI  
Maksimum opterećenja**



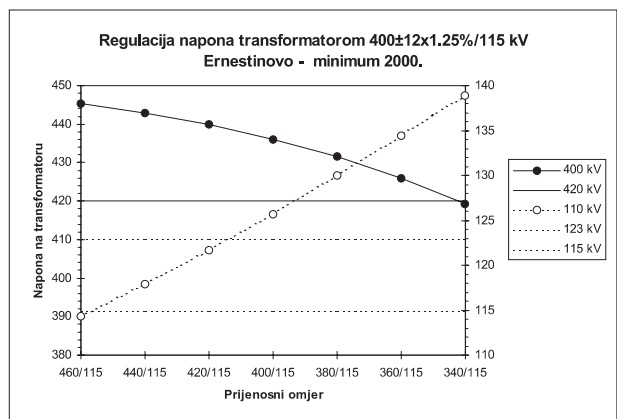
**REGULACIONI  
Maksimum opterećenja**



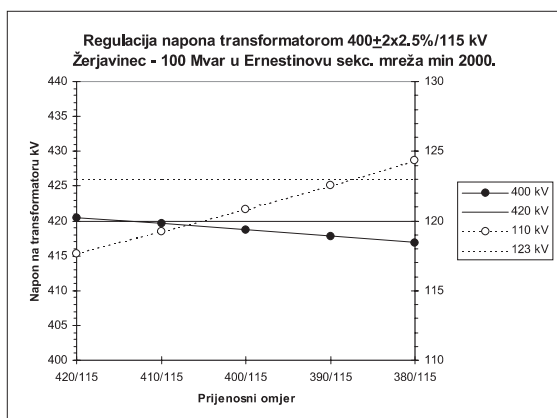
**Minimum opterećenja**



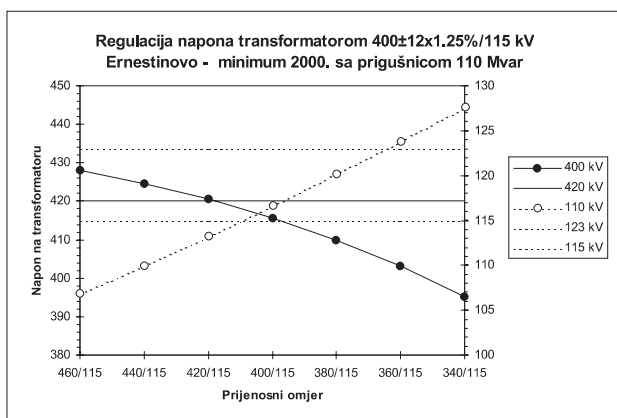
**Minimum opterećenja**



**Minimum opterećenja – kompenzacija**



**Minimum opterećenja – kompenzacija**



Slika 7. Regulacija napona promjenom prijenosnog omjera standardnog transformatora 400±1x5%/115 kV (lijevo) i regulacijskog transformatora 400±12x1.25%/115 kV 300 MVA (desno), u maksimumu opterećenja (lijevo), minimumu opterećenja (u sredini) i minimumu opterećenja sustava s kompenzacijskom prigušnicom 100 Mvar u Ernestinovu (dolje) na modelu 2000. godine

### 3.1.2. Regulacijski transformator

$400 \pm 12 \times 1.25\% / 115 / 31.5 \text{ kV } 300 \text{ MVA}$

Mogućnosti regulacije napona primjenom regulacijskog mrežnog transformatora sa širim opsegom regulacije  $400 \pm 12 \times 1.25\% / 115 \text{ kV}$  u Ernestinovu analizirana je u nastavku također za dva krajnja režima rada elektroenergetskog sustava: zimskog maksimuma i ljetnog minimuma. Promjenom prijenosnog omjera regulacionog transformatora  $400 \pm 12 \times 1.25\% / 115 \text{ kV}$  (pod opterećenjem "on-load") može se u maksimumu opterećenja utjecati na napon na sekundaru mrežnog transformatora u granicama **105-127 kV** (od -4.5 % do +15.5 %), što povlači za sobom promjenu primarnog napona u granicama **418-389 kV** (+4.5 % do -2.8 %).

U minimumu opterećenja sustava napon na primarnoj strani transformatora u krajnjem gornjem položaju +15 % (460/115 kV) je **445 kV**, dok je odgovarajući napon na sekundaru **114 kV**. Za srednji položaj 0 % (400/115 kV) napon na primaru transformatora je **436 kV**, a na sekundaru **126 kV**. U krajnjem donjnjem položaju -15 % (380/115 kV) napon na primarnoj strani je **419 kV**, a na sekundarnoj **139 kV**.

Kada bi se prijenosna mreža kompenzirala npr. prigušnicom za kompenzaciju **100 Mvar** u Ernestinovu, slika 7 (dolje desno), razina napona na primaru i sekundaru transformatora bi se smanjila i postojala bi mogućnost regulacije sekundarnog napona u granicama **107 – 128 kV** uz promjenu primarnog napona u granicama **428 – 395 kV**. Napon **115 kV** na sekundaru regulacijskog transformatora u konfiguraciji s prigušnicom, sada se postiže kod prijenosnog omjera **410/115 kV** uz napon na primaru **418 kV**.

Za razliku od standardnih mrežnih transformatora 400/110 kV koji u minimumu opterećenja sustava ne bi smjeli raditi zbog previsokih primarnih (420 kV), odnosno previsokih sekundarnih napona (245 kV, 123 kV), mrežni transformatori s regulacijom pod opterećenjem i širim opsegom regulacije mogli bi raditi u širem opsegu primarnih napona i regulirati željenu razinu napona na sekundaru.

## 4. NEKE DVOJBE VEZANE UZ REGULACIJU NAPONA MREŽNIM TRANSFORMATORIMA

### 4.1. Koju stranu regulirati mrežnim transformatorima (primarnu ili sekundarnu)?

**Mrežnim transformatorima u pravilu se regulira napon na sekundaru transformatora** ili niženaponskoj strani (zato se u literaturi i zovu "step down" transformatori), u našem slučaju u 220 i 110 kV mreži. Razlog tome je prije svega u različitoj krutosti mreže, koja je najčešće na primarnoj strani mrežnog transformatora veća nego na sekundarnoj strani. Mrežnim transformatorom mogao bi se regulirati napon i na primarnoj strani, no kako je krutost mreže na primarnoj strani

najčešće veća, efikasnost regulacije bit će manja. Drugim riječima za **smanjenje napona na primarnoj strani transformatora u mreži koja ima veću krutost (400 kV), trebat će relativno više povećati napon na sekundarnoj strani (110 kV)**. Konkretno u našoj prijenosnoj mreži jedino bi Konjsko mogla biti stanica u kojoj bi se mrežnim transformatorima imalo smisla regulirati visokonaponsku stranu s obzirom da je krutost primarne 400 kV mreže i sekundarne 220 kV mreže približno jednaka (zbog većeg broja izvora priključenih na 220 kV mrežu). Provedene analize pokazuju da je uzrok visokim naponima slabo opterećena 400 kV mreža. Regulacija napona na primarnoj strani mrežnim transformatorom u Žerjavincu bila bi zbog veće krutosti mreže na primarnoj strani neracionalna. Drugim riječima, trebali bismo relativno više podići sekundarni napon (110 kV ili 220 kV) da bismo malo smanjili primarni napon (400 kV).

### 4.2. Kako izvesti regulacijski namot na transformatoru?

Naglasimo da treba razlikovati **stranu transformatora** na kojoj je **izveden regulacijski namot** (kod autotransformatora serijski namot, paralelni namot, ili zvjezdište) od **strane transformatora kojoj se napon regulira** (primar, sekundar). Regulator napona uspoređuje zadanu (postavljenu) i stvarnu vrijednost napona i daje signal regulacijskoj preklopci da mijenja prijenosni omjer transformatora (bilo na primaru, sekundaru ili u zvjezdištu) kako bi se postigla zadana vrijednost napona (bilo na primaru ili sekundaru). Sa stanovišta elektroenergetskog sustava važnije je definirati stranu kojoj se napon regulira (primar, sekundar) od mjesta na kojem će regulacijski namot u transformatoru biti konkretno izveden. Dakako, o položaju regulacijskog namota ovisi korak regulacije, postizanje prijenosnih omjera pojedinih odcjeka regulacijskog namota. Sa stanovišta sustava u cjelini izvedba i položaj regulacijskog namota nije presudan.

Regulacija napona na mrežnom autotransformatoru može se izvesti na višenaponskoj strani, niženaponskoj strani ili u zvjezdištu. Budući da je na primarnoj strani transformatora struja u pravilu manja regulacija se najčešće izvodi na primarnoj strani (serijski namot) ili u zvjezdištu. Prednost regulacije u zvjezdištu je u činjenici da je regulacijska sklopka na potencijalu zvjezdišta, odnosno na potencijalu transformatorskog kotla.

### 4.3. Treba li regulacija napona na 400 kV mrežnim transformatorima biti pod opterećenjem

Dugogodišnja praksa u našem sustavu pokazala je da se mogućnost regulacije napona mrežnim transformatorima 400/220 kV i 400/110 kV u beznaponskom stanju ne koristi jer je procedura promjene prijenosnog omjera transformatora složena. Promjena prijenosnih omjera bi zbog složene procedure trebala biti sezon-

ska. Prijenosni omjeri mrežnih transformatora prilagođavali bi se sezonskom opterećenju u mreži. Tako bismo imali jedan postav prijenosnih omjera za zimski režim rada, a drugi za ljetni kao što je to praksa u nekim zemljama.

Budući da su postojeći mrežni transformatori **220 / niže kV i 110 / niže kV** u našem sustavu regulacijski transformatori sa **širokim opsegom regulacije od 15 % (187 – 253 kV odnosno 93.5 – 126.5 kV) i regulacijom pod opterećenjem**, njima se mogu kompenzirati široke varijacije napona u 220 i 110 kV mreži. Stoga bi se moglo zaključiti da mrežni transformatori 400/220 kV i 400/110 kV ne bi trebali biti s regulacijom pod opterećenjem. No, sve veći broj zemalja i gotovo sve susjedne zemlje, osim Srbije i Crne Gore imaju u svojoj mreži u pogonu regulacijske transformatore posebno one 400/110 kV. Razlika u cijeni između transformatora s mogućnošću regulacije pod opterećenjem i regulacije u beznaponskom stanju stalno se smanjuje (pretpostavlja se da je regulacijski transformator 10 – 20 % skuplji).

#### 4.4. Regulacijski transformatori ili kompenzacija prijenosne mreže?

U situaciji kada već imamo mrežne transformatore s regulacijom u beznaponskom stanju i opsegom regulacije 5 %, prijelaz na regulacijske transformatore sa širim opsegom regulacije npr. 15 % pod opterećenjem nije jednostavno. Primjene li se u mreži regulacijski transformatori koji podnose veća odstupanja primarnih napona, odgovarajuću pozornost trebat će posvetiti postojećim transformatorima s manjim dopuštenim odstupanjima primarnih napona i regulaciji napona u sustavu općenito. Po isteku životne dobi postojeći transformatori s regulacijom u beznaponskom stanju mogli bi se zamijeniti regulacijskim transformatorima s regulacijom pod opterećenjem.

Iz rezultata provrđenih analiza možemo zaključiti da se problem visokih napona efikasnije rješava kompenzacijom. Takav zaključak vrijedi posebno dok je mreža najvišeg napona bez planiranih novih izvora. Kompenzacija prigušnicom djeluje na smanjenje napona na obje strane transformatora istodobno, dok se regulacijom transformatorom poboljšanje naponskih prilika na jednoj strani postiže pogoršanjem naponskih prilika na drugoj strani i obrnuto.

#### 4.5. Potreban opseg i korak regulacije

Potreban opseg regulacije transformatora ovisi o velikom broju utjecajnih parametara pa ga nije jednostavno procijeniti. Opseg regulacije transformatora ovisi o prilikama u sustavu (minimumu / maksimumu opterećenja sustava, angažmanu elektrana, konfiguraciji prijenosne mreže, izgrađenosti mreže, postojanju izvora na najvišem naponu, kompenzaciji itd.), ali i o reguliranoj veličini – vrijednosti napona koja se želi regulacijskim transformatorom održavati. Najčešće se opseg regulacije mrežnih transformatora pod op-

terećenjem kreće u granicama od 10 % do 15 %. Koraci regulacije biraju se između sljedećih vrijednosti 1 %, 1.25 %, 1.5 % ili 2 %. Korak regulacije ovisi o odabranom opsegu regulacije i broju položaja regulacijske preklopke. Ponekad je broj koraka regulacijske preklopke unaprijed zadan trenutno raspoloživim tipom preklopke dostupnom na tržištu, pa je za željeni opseg regulacije korak regulacije unaprijed određen.

## 5. ZAKLJUČAK

Provedenim analizama na modelima prijenosne mreže za 2000. i 2010. godinu utvrđena je ovisnost napona u interkonektivnim čvorištima Žerjavinec i Ernestinovo o prijenosnom omjeru interkonektivnih transformatora za dva krajnja režima koji se mogu očekivati u pogonu prijenosne mreže. Rezultati analiza pokazuju da su najutjecajniji parametri na naponske prilike: opterećenje sustava, konfiguracija prijenosne mreže i angažman elektrana. Naponske prilike bit će u granicama naponskih prilika s kakvima smo se već sretali u dosadašnjem pogonu prijenosne mreže.

Prema primjeni regulacijskih transformatora u Žerjavincu bilo određenih dvojbi, jer je ta stanica dobro umrežena između Tumbra i Ernestinova, a dobivene varijacije napona nisu toliko izražene. U Ernestinovu kao radijalno napajanoj stanici dobivene su nešto izraženije varijacije napona zbog radijalnog napajanja Slavonije, pa smo preporučili primjenu regulacijskih transformatora. Rezultat provedenih ispitivanja je logičan, prijenosna mreža na području Slavonije nije povezana sa susjednim sustavima pa mogućnosti regulacije napona transformatorima dolaze do izražaja. U povezanoj mreži dobivena odstupanja napona su manja jer se jalova snaga može vodovima prelijevati u susjedne sustave. Pri tom treba biti oprezan sa zaključcima u pogledu utjecaja susjednih sustava jer on može biti dvojak. Susjedni sustavi mogu preuzimati jalovu snagu, ali ovisno o situaciji i generirati jalovu snagu te tako dodatno pogoršati naponske prilike.

Prednost primjene regulacijskih transformatora je u mogućnosti održavanja sekundarnog napona u dopuštenim granicama uz veća dopuštena odstupanja primarnog napona zbog šireg opsega regulacije. Promjenom prijenosnog omjera regulacijskog transformatora može se međutim znatnije utjecati samo na jalovo opterećenje transformacije. Zbog prazne 400 kV mreže u početnoj fazi njenog planiranog daljnjeg razvoja, povoljnije bi bilo ugraditi regulacijske mrežne transformatore koji su dimenzionirani za širi opseg primarnih napona. Promjenom prijenosnog omjera regulacijskih transformatora međutim neće se moći znatnije utjecati na naponske prilike u 400 kV mreži. Do izgradnje novih snažnijih izvora priključenih na 400 kV povoljno bi bilo pored regulacijskih transformatora ugraditi i kompenzacijske prigušnice kako bi se moglo utjecati na naponske prilike u 400 kV mreži.

Paralelno s primjenom mrežnih transformatora s regulacijom pod opterećenjem i širim opsegom regulacije treba prilagoditi i postojeće tehničke propise koji definiraju najviši dopušteni napon u prijenosnoj mreži (mrežna pravila - grid code). Ukoliko je najviši trajno dopušteni pogonski napon 420 kV nema svrhe odabirati transformatore sa širim opsegom regulacije od postojećih  $400 \pm 5\%$ . Praksa međutim pokazuje da se u našoj mreži javljaju pa i toleriraju odstupanja napona sve do 440 kV. Stoga bi s obzirom na postojeću praksu vođenja i ograničene mogućnosti utjecaja na naponske prilike u mreži imalo smisla primijeniti mreže transformatore sa širim opsegom regulacije i prilagoditi propise.

Danas su TS Žerjavinec i Ernestinovo pred dovršetkom izgradnje, odnosno obnove. Nabavljeni su i ugrađeni transformatori s regulacijom pod opterećenjem  $400+16\%-11\%/115/10.5$  kV nazivne snage 300 MVA. Regulacijska preklopka s 25 položaja smještena je u zvjezdistu transformatora. U TS Žerjavinec ugrađen je i transformator s regulacijom pod opterećenjem  $400+16\% -9\%/231/(10.5)$  kV nazivne snage 400 MVA s mogućnošću poprečne regulacije. Nova mrežna pravila kojima se propisuju dopuštena odstupanja napona u prijenosnoj mreži još su u postupku donošenja.

#### LITERATURA

- [1] G. JERBIĆ: "TS 400/220/110 kV žerjavinec regulacija napona na transformatorima 400/220 kV 400 mVA i 400/110 kV, 300 mVA", Institut za elektroprivredu i energetiku dd, Zagreb, Studija lipanj 1998. godine
- [2] G. JERBIĆ: "Istraživanje potrebe ugradnje transformatora 400/110 kv i 400/220 kv s regulacijom pod teretom i/ili prigušnice na 110 kV sabirnicama u TS 400/110 kV - 400/220 kV Ernestinovo", Institut za elektroprivredu i energetiku dd, Zagreb, Studija studeni 1998. godine

- [3] G. JERBIĆ: "istraživanje naponskih prilika na južnom 400 kv potezu elektroenergetskog sustava hrvatske pri uključivanju u isti te na uvozni ugljen - Lukovo šugarje, snage  $1 \times 350$  mW ( $2 \times 350$  mW) na pragu", Institut za elektroprivredu i energetiku dd, Zagreb, Studija travanj 1999. godine

#### VOLTAGE CIRCUMSTANCES IN TRANSMISSION NETWORK AND VOLTAGE REGULATION BY NETWORK TRANSFORMERS

Analysis results of 400/220 kV and 400/110 kV network transformers' transformation rate change on voltage circumstances in inter connection nodes are given. Some problems connected to voltage regulation by network transformers are stressed as well as the way of choice and transformation regulation range in 400/220/110 kV Žerjavinec and Ernestinovo transformer stations.

#### ABHÄNGIGKEIT DER IM ÜBERTRAGUNGSNETZ BESTEHENDEN SPANNUNGSMÜNDIGKEITEN VON DER SPANNUNGSREGELUNG AN NETZUMSPANNERN

Dargestellt sind Ergebnisse der Nachforschung von Einflüssen einer Änderung der Übertragungsverhältnisse von Netzumspannern 400/220 kV und 400/110 kV auf Spannungsumstände in Knotenpunkten der Interkonnektionen. Betont wurden manche Fragen im Bezug auf die Spannungsregelung von Netzumspannern, sowie die Wahl von Art und Umfang der Umspannerregelung in den 400/220/110 kV Umspannerwerken "Žerjavinec" und "Ernestinovo".

Naslov pisca:

**Goran Jerbić, dipl. ing.**  
**Institut za elektroprivredu i energetiku d.d.**  
**Ulica grada Vukovara 37**  
**10000 Zagreb, Hrvatska**

Uredništvo primilo rukopis:  
 2003 - 07 - 17.