

**KRATKOROČNA PROGNOZA PROMENE POTROŠNJE USLED PRIMENE SAVREMENIH TEHNIKA REGULACIJE NAPONA U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA****NEAR TERM FORECAST OF DEMAND CHANGE DUE TO USE OF MODERN VOLTAGE REGULATION TECHNIQUES IN DISTRIBUTION NETWORKS**Srđan Lazarov, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – U ovom radu su predstavljene matematički modeli i algoritmi za proračun prognoze promene potrošnje trofazne aktivne snage usled primene savremenih tehnika regulacije napona u distributivnim mrežama. Cilj prognoziranja ovih vrednosti je u omogućavanju fleksibilnog upravljanja potrošnjom - rezultatima ove prognoze omogućava se distributivnim mrežama da učestvuju u primarnoj i sekundarnoj regulaciji frekvencije i aktivnih snaga, smanjenju vršne potrošnje i eliminaciji dvosmernih tokova snaga. U radu je korišćena simulaciona metoda prognoziranja, koja se bazira na simuliranju primene određene tehnike regulacije napona i proračunu režima za naredni polusatni interval u elementima od interesa u okviru distributivne mreže. Kao ulazni podaci koriste se parametri tih elemenata, kao i trenutna i usrednjena merenja njihovih određenih veličina.

**Ključne reči:** *Kratkoročna prognoza promene potrošnje, fleksibilno upravljanje potrošnjom, regulacija napona*

**Abstract** – This paper presents the mathematical models and algorithms for calculating the forecast of three-phase active power demand change due to use of modern voltage regulation techniques in distribution networks. The aim of forecasting these values is to enable the flexible demand management – forecast results allow distribution networks to participate in primary and secondary frequency and active power controls, reduction of peak demand and elimination of two-way load flows. In this paper, a simulation forecasting method is used, which is based on simulating the application of a certain voltage regulation technique and calculating the regime for the next half-hour interval in the elements of interest within the distribution network. The parameters of these elements are used as input data, as well as the currently and averaged measured values of their certain variables.

**Keywords:** *Near term demand change forecast, flexible demand management, voltage regulation*

**1. UVOD**

Tokom poslednjih nekoliko decenija koncept pasivne distributivne mreže (DM) značajno se menja. Savremene DM prolaze kroz niz transformacija i unapređenja, a sve u cilju uvođenja tehnologija pametnih mreža (eng. „Smart Grid”). Globalno prognozirani porast potrošnje usled povećanja

upotrebe tehnologija sa niskim emisijama CO<sub>2</sub> (npr. električnih vozila), u kombinaciji sa sve većim udelom obnovljivih i konvencionalnih distributivnih generatora (DG) sa niskim emisijama CO<sub>2</sub> u ukupnoj proizvodnji, predstavlja veliki izazov za distributivna preduzeća u efikasnom planiranju rada i razvoja njihovih mreža. Kao posledica navedenih promena, pogon savremenih DM postaje dinamičniji i podložan brojnim pogonskim izazovima, kao što su: nedostatak pouzdanih resursa za regulaciju frekvencije i aktivnih snaga, preopterećenje u periodima vršne potrošnje, pojava dvosmernih tokova snaga itd. Jedno od rešenja za efikasnije upravljanje DM u navedenim uslovima je integracija sistema za aktivno upravljanje potrošnjom (SAUP, eng. „CLASS – Customer Load Active System Services”) sa (EMS)DMS/SCADA sistemom. SAUP se bazira na osnovnom principu elektroenergetske mreže, koji glasi: „Sa promenom napona menja se i potrošnja u elektroenergetskoj mreži” [1]. Optimalnom primenom savremenih tehnika regulacije napona, uz održavanje kvaliteta električne energije SAUP ima potencijal da:

- omogući DM da bude resurs u primarnoj i sekundarnoj regulaciji frekvencije i aktivnih snaga;
- poveća stepen iskorišćenja postojećeg kapaciteta i odloži ojačanje DM zbog vršnih potrošnji;
- unapredi rešavanje problema dvosmernih tokova snaga u radijalnim delovima DM;
- olakša priključivanje tehnologija sa niskom emisijom CO<sub>2</sub> na DM (npr. električna vozila);
- olakša priključivanje obnovljivih DG na DM;
- smanji emisije CO<sub>2</sub>;
- smanji troškove distributivnih preduzeća;
- smanji troškove potrošača.

Da bi se to ostvarilo, neophodno je operatoru DM pružiti uvid u mogućnosti određene SAUP funkcionalnosti, tj. uvid u promenu potrošnje usled njenog aktiviranja u budućem vremenskom periodu (polusatnom intervalu).

**2. SAUP – SISTEM AKTIVNOG UPRAVLJANJA POTROŠNJOM**

SAUP je niskobudžetno, lako i brzo primenjivo rešenje koje koristi savremene tehnike regulacije napona preko parova regulacionih transformatora (TR) sa mogućnošću regulacije pod opterećenjem, koji rade u paraleli u transformatorskoj stanici (TS) u okviru DM, kako bi se operatoru DM i/ili prenosno mreže (PM) pružio niz mogućnosti upravljanjem potrošnjom, koje je rezultat samoregulacije potrošača usled promene napona [1].

**NAPOMENA:**

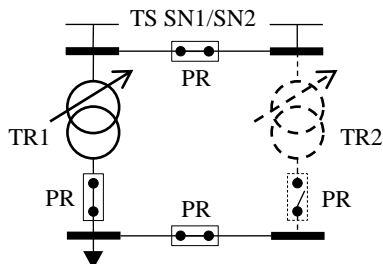
**Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Andrija Sarić, red. prof.**

Cilj SAUP rešenja je da se regulacijom napona upravlja potrošnjom električne energije, a da pri tome potrošači ne primete razliku u kvalitetu i pouzdanosti snabdevanja – njegovom primenom upravlja se potrošnjom, a ne samim potrošačima, čime se izbegava njihovo isključenje. U toku eksploatacije DM, cilj je da se električna energija isporučuje sa naponima unutar definisanih tehnički tolerantnih granica [2]. Obezbeđivanjem takvih napona u svim tačkama DM, problem isporuke kvalitetne električne energije (sa aspekta napona), u klasičnom pristupu regulaciji napona, smatra se rešenim [2]. Očigledno da u takvom rešenju postoji sloboda u izboru napona, na kojoj se i zasniva SAUP rešenje, kao i na osobini potrošača u vidu samoregulacije pri promeni napona. Primenom SAUP rešenja izostavlja se kriterijum regulacije napona u vidu minimiziranje štete koju trpe potrošači, a sve u cilju postizanja željenog upravljanja potrošnjom. Potrošači će se i dalje snabdevati kvalitetnom električnom energijom, tj. naponi će biti unutar dozvoljenih granica, ali se neće obezbeđivati minimiziranje „dozvoljene” štete koju potrošači trpe. Korišćene tehnike regulacije napona su:

- tehnika brze regulacije napona i
- tehnika sporije regulacije napona.

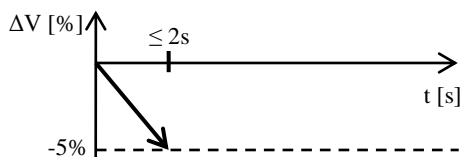
## 2.1 Tehnika brze regulacije napona

Zasniva se na isključenju iz pogona jednog od TR u TS, otvaranjem prekidača (PR) na niženaponskoj (NN) strani, usled čega se povećava opterećenje TR koji ostaje u pogonu, a to rezultuje većim padom napona i smanjenjem napona na NN strani TS [1]. Na slici 2.1 ilustrovana je primena ove tehnike u TS SN1/SN2 (TR2 isključen).



Slika 2.1 Tehnika brze regulacije napona

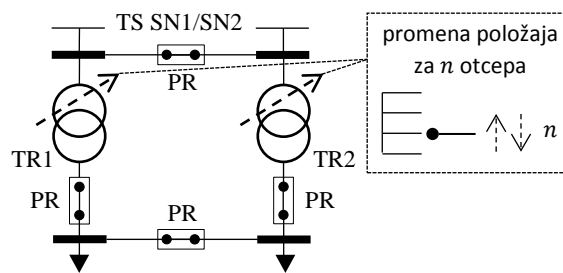
Ovaj postupak pruža kontinualnu i trenutnu promenu napona. Naredba za otvaranje NN prekidača TR se izvršava veoma brzo – za manje od 2 s [1]. Moguće je samo smanjenje napona i ne postoji opcija podešavanja željenog smanjenja, već to zavisi od parametara TR i njihovih opterećenja u trenutku primene. Na slici 2.2 prikazana je osobina kontinualnosti.



Slika 2.2 Kontinualnost tehnike brze regulacije napona

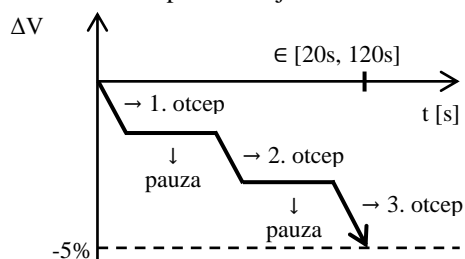
## 2.2 Tehnika sporije regulacije napona

Zasniva se na promeni položaja regulacionih sklopki oba TR u TS za isti broj otepa u istom smeru, pod opterećenjem, a to rezultuje smanjenjem napona na NN strani TS [1]. Na slici 2.3 ilustrovana je primena ove tehnike u TS SN1/SN2 (položaji regulacionih sklopki se menjaju za  $n$  otepa).



Slika 2.3 Tehnika sporije regulacije napona

Ova metoda omogućava diskretnu i sporiju promenu napona. Položaji regulacionih sklopki TR menjaju se otecep po otecep, sa pauzama između uzastopnih promena, što zahteva vreme od 20 s do 2 min, zavisno od broja otepa za promenu i tipa regulacionih sklopki [1]. Moguće je smanjenje/povećanje napona i postoji opcija podešavanja željene promene kroz zadavanje broja otepa promene. Na slici 2.4 prikazana je osobina diskretnosti.



Slika 2.4 Diskretnost tehnike sporije regulacije napona

## 2.3 Funkcionalnosti

Aktivnim upravljanjem potrošnje, upotrebom prethodno opisanih tehnika regulacije napona, SAUP omogućava distributivnim preduzećima da učestvuju u:

- primarnoj regulaciji frekvencije i aktivnih snaga (**PRF** – tehnikom **brze** regulacije napona);
- sekundarnoj regulaciji frekvencije i aktivnih snaga (**SRF** – tehnikom **sporije** regulacije napona);
- smanjenju vršne potrošnje (**SVP** – tehnikom **sporije** regulacije napona);
- eliminaciji dvosmernih tokova snage (**EDTS** – tehnikom **sporije** regulacije napona).

Ovo su ujedno i nazivi SAUP funkcionalnosti koje se obrađuju u ovom radu.

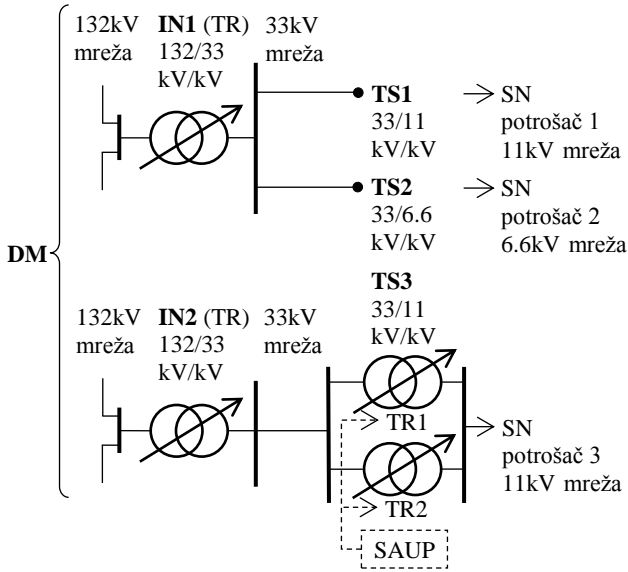
## 3. OPIS DISTRIBUTIVNE MREŽE

Ispituju se stacionarni efekti regulacije napona na promenu potrošnje trofazne aktivne snage u TS SN1/SN2 u normalnim radnim režimima koji su trofazni, stacionarni i simetrični (direktnog redosleda), i pri tome se smatra da su svi elementi DM uravnoteženi.

Od konstitutivnih elemenata DM od interesa su jedino potrošači i TR, jer se proračuni prognoze vrše na nivou TS, a za više hijerarhijske elemente – izvore napajanja (IN) i DM se vrši sumiranje prognoziranih vrednosti.

Posmatraju se SN potrošači u vidu TS SN1/SN2 koje sadrže dva trofazna dvonamotajna regulaciona TR koji rade u paraleli i imaju mogućnost regulacije napona pod opterećenjem. Potrošnja je svedena i modelovana na NN stranama TS, i predstavlja koncentrisanu potrošnju većeg broja TS SN/NN, koje napajaju veliki broj NN potrošača, a oni se sastoje od različitih elementarnih potrošača (električnih aparata).

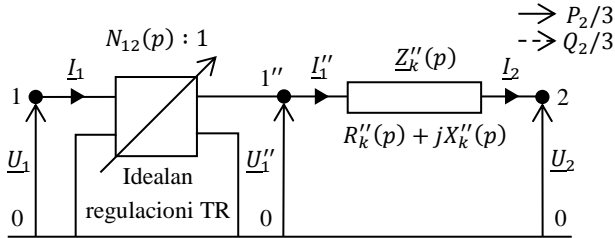
Na slici 3.1. prikazana je radijalna test DM, na kojoj je samo jedan SN potrošač (TS3) prikazan detaljnije.



Slika 3.1 Test distributivna mreža

### 3.1 Model transformatora

Na slici 3.2 prikazana je pogonska šema predstavljenih TR, sprege Yy0, bez grane magnećenja i sa impedansama kratkog spoja (KS) koncentrisanim na NN strani, za opisane radne režime. Regulatorna sklopka TR izvedena je na VN strani, sa direktnom logikom rada – podizanjem ručice (angažovanjem većeg otepa) zahvata se manje navojaka VN namotaja čime se, za isti napon na VN strani, podiže napon na NN strani TR, i obrnuto [2].



Slika 3.2 Pogonska šema transformatora

Svi parametri šeme zavise od angažovanog otepa –  $p$ . Izraz za realni odnos transformacije –  $N_{12}(p)$  je sledeći:

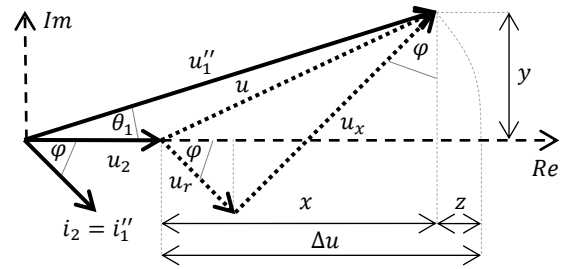
$$N_{12}(p) = \left(1 - (p - p_n) \cdot \frac{\Delta u_{n[\%]}}{100}\right) \cdot \frac{U_{1n}}{U_{2n}}, \quad (1)$$

gde je:

- $p_n$  – nominalni regulatorni otepa;
- $\Delta u_{n[\%]}$  – nominalni napon između susednih otepa u %;
- $U_{1n}$  – nominalan fazni napon VN namotaja;
- $U_{2n}$  – nominalan fazni napon NN namotaja.

Za određivanje ostalih parametara šeme, na osnovu dobro poznatih izraza, potrebno je odrediti procentualni napon (impedansu) KS –  $u_k[\%](p)$  i trofazne gubitke u bakru TR –  $P_{Cu}(p)$  za otepa  $p$ , pri čemu se to radi linearnom interpolacijom između poznatih vrednosti za minimalni, nominalni i maksimalni otepa.

Analitički izrazi za određivanje unutrašnjeg pada napona izvode se polazeći od fazorskog dijagrama u relativnim jedinicama za induktivno opterećenje TR, koji je prikazan na slici 3.3.



Slika 3.3 Fazorski dijagram induktivnog opterećenja TR

Relativna vrednost unutrašnjeg pada napona TR –  $\Delta u$  određuje se dobro poznatim izrazom:

$$\left. \begin{aligned} x &= u_r \cos \varphi + u_x \sin \varphi \\ y &= u_x \cos \varphi - u_r \sin \varphi \end{aligned} \right\} \Delta u = x + \frac{1}{2} \frac{y^2}{u_1''}, \quad (2)$$

gde je:

- $u_1''$  – relativni napon VN strane sveden na NN stranu;
- $x$  – uzdužna komponenta relativnog pada napona;
- $y$  – poprečna komponenta relativnog pada napona;
- $u_r$  – relativni napon koji se realizuje na rezistansi TR;
- $u_x$  – relativni napon koji se realizuje na reaktansi TR;
- $\varphi$  – ugao kompleksne snage TR (za sva 4 kvadranta).

### 3.2 Model potrošača

Koristi se eksponencijalni statički model potrošača, čiji je analitički oblik zavisnosti napona i potrošnje iskazan sa:

$$P = P_0 \cdot \left(\frac{U}{U_0}\right)^{k_{pu}} \quad \wedge \quad Q = Q_0 \cdot \left(\frac{U}{U_0}\right)^{k_{qu}}. \quad (3)$$

U izrazima su  $U_0$ ,  $P_0$  i  $Q_0$  uglavnom nominalne vrednosti napona, aktivne i reaktivne snage, respektivno, koje određuju radne tačke  $(U_0, P_0)$  i  $(U_0, Q_0)$  oko kojih se razvija model. Koeficijenti samoregulacije aktivne i reaktivne snage po naponu ( $k_{pu}$  i  $k_{qu}$ ) praktično se ne mogu izračunati, već se moraju odrediti eksperimentalno, na polusatnom intervalu uz uvažavanje sezone i tipa dana.

## 4. PROGNOZA PROMENE POTROŠNJE

Svaki TR ima dostupna trenutna i usrednjena merenja sledećih veličina: linijski napon NN strane ( $V_2$ ), trofazna aktivna/reaktivna snaga NN strane ( $P_2/Q_2$ ) i položaj regulatorne sklopke (angažovani otepa) ( $p$ ).

Posmatraju se dva režima na nivou TR i TS:

1. režim pre simuliranja regulacije napona i
2. režim posle simuliranja regulacije napona.

Poznavanjem ova dva režima za TS i eksponencijalnog statičkog modela SN potrošača, promena potrošnje trofazne aktivne snage TS (SN potrošača) za naredni polusatni interval –  $\Delta P_{(TS)}$  može se odrediti izrazima:

$$\Delta u_{reg[\%]} = \frac{U_{2(TS)}^{postle} - U_{2(TS)}^{pre}}{U_{2(TS)}^{pre}} \cdot 100, \quad (4)$$

$$\Delta P_{(TS)} = P_{2(TS)}^{pre} \cdot \left[ \left(1 + \frac{\Delta u_{reg[\%]}}{100}\right)^{k_{pu(TS)}} - 1 \right]. \quad (5)$$

### 4.1 Režim pre simuliranja regulacije

Režim pre simuliranja regulacije napona je većim delom određen dostupnim usrednjenim merenjima u TS. Za potrebe proračuna režima posle simuliranja, neophodno je da se u ovom režimu odrede još i fazni napon na VN strani TS (smatra se konstantnim), kao i ugao kompleksne

snage i struja jednog od TR i cele TS. Postupak za proračun ovih veličina u režimu pre simuliranja je sledeći:

1. Proračun parametara TR za angažovani otecep;
2. Proračun ugla kompleksne snage i struje TR i TS;
3. Proračun pada napona TR (TS) – izraz (2);
4. Proračun napona na VN strani TR (TS).

#### 4.2 Režim posle simuliranja tehnike brze regulacije

Neposredno posle simuliranja ove tehnike, TR koji ostaje u pogonu je opterećen celokupnim snagama TS, tj. aktuelan je režim TS pre simuliranja. Parametri TR se ne menjaju, jer se ne menja angažovani otecep. Poznavanjem režima TS i parametara TR pre simuliranja, određuje se režim TR, odnosno TS posle simuliranja ove tehnike. Postupak za proračun režima posle simuliranja je sledeći:

1. Proračun pada napona TR (TS) – izraz (2);
2. Proračun napona na NN strani TR (TS);
3. Proračun procentualne promene napona – izraz (4);
4. Proračun promene potrošnje TS – izraz (5).

#### 4.3 Režim posle simuliranja tehnike sporije regulacije

Smer promene –  $\Delta p$  i broj otecepa –  $n$  za koji je potrebno promeniti položaje ručica regulacionih sklopki TR, kako bi se realizovala željena promena napona usled primene SAUP funkcionalnosti –  $\Delta u_{SAUP}[\%]$ , određuju se izrazima:

$$\Delta p = \begin{cases} -1, & \Delta u_{SAUP}[\%] < 0, \\ +1, & \Delta u_{SAUP}[\%] > 0, \end{cases} \wedge n = \frac{|\Delta u_{SAUP}[\%]|}{\Delta u_n[\%]} \quad (6)$$

Broj  $n$  je ceo i pozitivan, i potrebno ga je validirati i po potrebi korigovati ako nema dovoljno otecepa za promenu.

Diskretnost promene napona se uvažava iterativnim ( $n$  puta) simuliranjem promene položaja regulacionih sklopki TR za po jedan otecep u odgovarajućem smeru.

Neposredno posle simuliranja iteracije ove tehnike, TR su opterećeni snagama iz režima pre simuliranja, tj. u njima je aktuelan prethodni režim. Parametri TR se menjaju, jer se menjaju angažovani regulacioni otecepi. Poznavanjem režima TS pre simuliranja i parametara TR posle simuliranja, određuje se režim TR, odnosno TS posle simuliranja iteracije ove tehnike. Postupak za proračun režima posle simuliranja je sledeći:

1. Određivanje smera i broja otecepa promene – izraz (6);
2. Podešavanje početnih uslova za prvu iteraciju;
3. Iterativni postupak simuliranja, za  $h = 1, 2, \dots, n$ :
  - 3.1 Određivanje novog angažovanog otecepa;
  - 3.2 Proračun parametara TR za angažovani otecep;
  - 3.3 Proračun pada napona TR (TS) – izraz (2);
  - 3.4 Proračun napona na NN strani TR (TS);
  - 3.5 Proračun procentualne promene napona – izraz (4);
  - 3.6 Proračun promene potrošnje TR i TS – izraz (5);
  - 3.7 Proračun ugla kompleksne snage i struje TR;
4. Proračun ukupne promene potrošnje TS – suma promena potrošnji TS u svakoj iteraciji (korak 3.6).

### 5. PRIMER PRORAČUNA

Koriste se tri skupa ulaznih podataka: podešenja SAUP funkcionalnosti (tabela 5.1), parametri TR i TS (tabela 5.2) i dostupna merenja u TS (tabela 5.3). Rezultati proračuna prognoze prikazani su u tabeli 5.4.

Tabela 5.1 Podešenja željenih procentualnih promena napona

SAUP funkcionalnost	SRF	SVP	EDTS
$\Delta u_{SAUP}[\%]$	-5	-3	+3

Tabela 5.2 Koeficijenti samoregulacije aktivne i reaktivne snage po naponu za sve TS i parametri svih TR u test DM

	TS1		TS2		TS3	
	TR1	TR2	TR1	TR2	TR1	TR2
$k_{pu}$	1.29		1.53		1.07	
$k_{qu}$	6.41		5.74		5.98	
$S_n$ [MVA]	19	19	11.5	11.5	16	16
$V_{1n}$ [kV]	33	33	33	33	33	33
$V_{2n}$ [kV]	11	11	6.6	6.6	11	11
$u_{k_{min}}$ [%]	17.6	17.6	11.2	11.2	12.5	12.5
$u_{k_n}$ [%]	19.1	19.1	12.6	12.6	13.9	13.9
$u_{k_{max}}$ [%]	28.1	28.1	18.2	18.2	20.3	20.3
$P_{Cu_{min}}$ [kW]	165.2	165.2	64.1	64.1	98.8	98.8
$P_{Cu_n}$ [kW]	179.1	179.1	71.7	71.7	110.5	110.5
$P_{Cu_{max}}$ [kW]	264.4	264.4	104.6	104.6	161.1	161.1
$p_n$	4	4	5	5	5	5
$p_{max}$	17	17	17	17	17	17
$\Delta u_n$ [%]	1.36	1.36	1.43	1.43	1.45	1.45

Tabela 5.3 Merenja za sve TR u test DM ( $0.5S_n$  i  $\cos\varphi=0.9$  ind)

	TS1		TS2		TS3	
	TR1	TR2	TR1	TR2	TR1	TR2
$P_2$ [MW]	8.55	8.55	5.17	5.17	7.20	7.20
$Q_2$ [MVar]	4.14	4.14	2.51	2.51	3.50	3.50
$V_2$ [kV]	11	11	6.6	6.6	11	11
$p$	4	4	5	5	5	5

Tabela 5.4 Rezultati prognoze promene potrošnje

	PRF [MW]	SRF 5% [MW]	SVP 3% [MW]	EDTS 3% [MW]
DM	-3.08	-1.60	-1.11	+0.72
IN1	-2.31	-1.15	-0.80	+0.50
<b>TS1</b>	<b>-1.35</b>	<b>-0.71</b>	<b>-0.50</b>	<b>+0.27</b>
<b>TS2</b>	<b>-0.96</b>	<b>-0.44</b>	<b>-0.30</b>	<b>+0.23</b>
IN2	-0.77	-0.45	-0.31	+0.34
<b>TS3</b>	<b>-0.77</b>	<b>-0.45</b>	<b>-0.31</b>	<b>+0.34</b>

## 6. ZAKLJUČAK

Na osnovu dobijenih rezultata, primenom određene SAUP funkcionalnosti u narednom polusatnom intervalu može se ostvariti smanjenje potrošnje trofazne aktivne snage od 7.4% (PRF), 3.8% (SRF) ili 2.6% (SVP), ili povećanje od 1.7% (EDTS), u odnosu na ukupnu potrošnju test DM u aktuelnom režimu (41.85MW), uz srednje vrednosti smanjenja napona u TR od 4.7% (PRF), 5.5% (SRF) ili 3.8% (SVP), ili povećanja od 2.8% (EDTS).

## 7. LITERATURA

- [1] Electricity North West: *Functional Specifications and Voltage Regulation Scheme for ASCs*, Electricity North West Ltd., Manchester, UK, February 2014;
- [2] V. Strezoski, D. Janjić: *Sistemi regulacije napona radialnih distributivnih mreža*, Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, Srbija, 1997;

### Kratka biografija:



**Srđan Lazarov** rođen je u Zrenjaninu 1991. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Elektroenergetski sistemi odbranio je 2018. godine.