

## REGULACIJA NAPONA DISTRIBUTIVNIH MREŽA INTEGRISANA U DMS

Z.Simendić\*, PD Elektrovojvodina d.o.o. "Elektrodistribucija Sombor" – Sombor

G.Švenda, Fakultet tehničkih nauka, Institut za energetiku, elektroniku i telekomunikacije – Novi Sad

V.Strezoski, DMS Grupa d.o.o. – Novi Sad

V.Mijatović, PD Elektrovojvodina d.o.o. "Elektrodistribucija Sombor" – Sombor

### 1. UVOD

Regulacija napona distributivnih mreža (DM) u realnom vremenu, tretirana kao eksploatacioni problem, predstavlja osnovni predmet ovog rada. Pri tom, razmatraju se ključni resursi regulacije napona – regulacioni transformatori sa regulacijom pod opterećenjem i ugrađenim automatskim regulatorom napona (ARN). Dakle, regulacija napona zasniva se na unapred definisanim vrednostima pozicija regulacionih sklopki transformatora sa regulacijom u beznaponskom stanju i zakona regulacije transformatora sa regulacijom pod opterećenjem. Samim tim, praktična realizacija regulacije napona, delovanjem ARN, zasniva se na unapred definisanom zakonu regulacije i aktuelnom odnosu vrednosti napona i struje koje su izmerene na sekundaru regulacionog transformatora. Karakteristika zakona regulacije kreirana je u postupku planiranja pogona na osnovu ideje o kompenzaciji pada napona na jedinstvenomvodu [1]. Pri njegovom kreiranju razmatrane su samo vrednosti minimalnog i maksimalnog režima dela DM koja se napaja sa sekundara napojnog regulacionog transformatora [2]. Isto tako, smatra se da su topologija i dijagram opterećenja DM poznati i nepromenljivi. Posledica je da tako definisan zakon regulacije ima izrazito krutu karakteristiku. Odnosno, da se na osnovu zakona regulacije za istu vrednost struje na sekundaru regulacionog transformatora uvek zahteva ista vrednost napona, bez obzira na promenu topologije i/ili preraspodelu opterećenja unutar nadgledane mreže. Takav prilaz regulacije napona DM se u ovom radu naziva *klasičan postupak regulacije napona DM*.

U zadnjih desetak godina, za vođenje tehničkih poslova distributivnih preduzeća, sve više se nameće DMS (distributivni menadžment sistem) [3] koji se sastoji od SCADA sistema (Supervisory Control and Data Acquisition System), distributivne baze podataka (sa uključenim grafičkim okruženjem) i sistema energetske funkcije za analizu, upravljanje i planiranje pogona i razvoja DM [4]. Jedna od najvažnijih DMS funkcija je funkcija za regulaciju napona – poboljšanje kvaliteta električne energije. Centralizovana funkcija regulacije napona je svedena na optimizacionu proceduru, tako da se rešavanje problema regulacije napona svodi na rešavanje optimizacionog zadatka sa ograničenjima. Pri tom, u postavci problema regulacije napona izvršena je prostorna i vremenska dekompozicija problema, pri čemu je kriterijum štete [5,6,7] postavljen kao osnovni motiv za regulaciju napona. Takva regulacija napona, koja se zasniva na primeni i korišćenju svih resursa DMS softvera, omogućava da se navedene mane klasičnog postupka regulacije napona prevaziđu. Na osnovu aktuelnog uklopnog stanja, kratkoročne prognoze opterećenja, estimiranog (aktuelnog) režima itd, formirana je znatno kvalitetnija osnova za upravljanje regulacionim transformatorima sa regulacijom pod opterećenjem u realnom vremenu. Takav prikaz regulacije napona DM se u ovom radu naziva *regulacija napona DM na osnovu primene DMS softvera*.

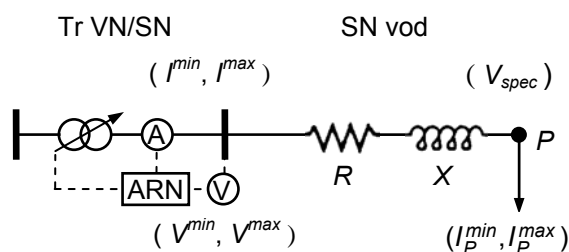
U drugom delu rada prikazan je klasičan postupak za regulaciju napona u sredjenaponskim (SN) DM zasnovan na primeni zakona regulacije. U trećem delu rada prikazan je model regulacije napona zasnovan

na primeni DMS softvera (matematičkom modelu DM, analizatoru topologije, rezultatima analitičkih funkcija prognoze opterećenja, estimacije stanja, regulaciji napona, itd). U četvrtom delu rada, na primeru realne SN DM "ED Sombor", istaknute su mogućnosti primene DMS softvera u regulaciji napona SN DM. Pri tom, upoređeni su rezultati dobijenih primenom klasičnog rada regulacije napona (zasnovanog na ARN) sa rezultatima koji bi se dobili da je regulacija napona sprovedena na osnovu primene DMS softvera. Nakon zaključka datog u petom delu, u šestom delu je referentno navedena korišćena literatura.

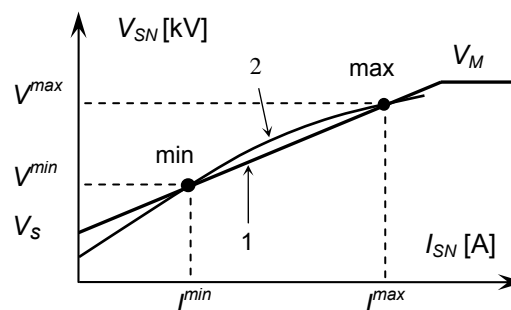
## 2. KLASIČAN POSTUPAK REGULACIJA NAPONA

Uobičajeni način regulacije napona u distributivnim mrežama Vojvodine zasniva se na bazičnoj ideji *kompenzacije pada napona jedinstvenog voda* [1,2,5] korišćenjem sledećih tipova ARN: ARN4, ARN5, REG5A, REG5L, REG9, TDU1010, TEU2000 i MARN. Kompenzacija se ustanovljava za jednostavnu "distributivnu mrežu", koju čine: napojni transformator visoki na srednji napon (VN/SN) s regulacijom pod opterećenjem, snabdeven sa ARN i jedinstvenim (fiktivnim) SN vodom, s rednim parametrima  $R$  i  $X$ , na čijem je kraju priključen jedinstven potrošač – slika 1. Ideja kompenzacije pada napona primenom ARN sastoji se od kontrole napona na sekundaru napojnog transformatora, tako da se na kraju voda, kod potrošača, realizuje specificiran i konstantan napon  $V_{spec}$ , nezavisan kako od struje potrošača, tako i od promena napona na VN strani napojnog transformatora. Za poznate parametre voda ( $R$  i  $X$ ) definisan je *zakon regulacije ARN* u vidu linije prikazane na slici 2 (npr. 1 – prava ili 2 – parabola) [1,2,5]. Zakon regulacije garantuje da će, za određen faktor snage potrošača, napon na potrošaču imati praktično konstantantnu vrednost, nezavisno od promene vrednosti struje potrošača i napona na VN strani napojnog transformatora. Naime: 1) u ARN se uvode vrednosti struje i napona sekundara napojnog transformatora; 2) poređenjem tog napona s naponom koji diktira zakon regulacije –  $V_{ref}$ , za konkretnu struju sekundara napojnog transformatora, utvrđuje se odstupanje napona; 3) na osnovu tog odstupanja, inicira se delovanje ARN, koji, dalje, inicira delovanje regulacione preklapke napojnog transformatora, s ciljem da se odstupanje napona anulira. Zakon regulacije svakako obuhvata i tačke maksimalnog (max) i minimalnog (min) opterećenja potrošača – slike 1 i 2.

Kada je linearan, zakon regulacije ARN je određen zadatom vrednošću napona  $V_s$  (slika 2) i nagibom prave. Tada je, za utvrđivanje zakona, dovoljno da se poznaju dva režima (minimalni i maksimalni), odnosno dva para vrednosti napona i struja na SN sabirnicama napojnog transformatora.



Slika 1 – Jednostavna DM



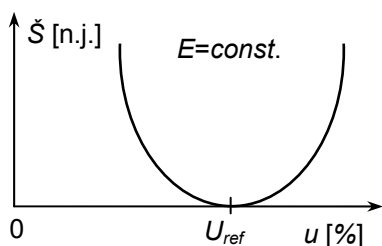
Slika 2 – Krive zakona regulacije napona

Iako, određivanje i zadavanje zakona regulacije ARN, materija koja je detaljno obrađena u [1,2,5,6,7], nije predmet ovog rada, treba naglasiti da se u tim momentima kriju najveći problemi primene klasične regulacije napona. Jednom definisana karakteristika zakona regulacije ne samo da je kruta već je i definisana samo na osnovu dva procenjena, ili ranije ostvarena, režima sa minimalnim i maksimalnim opterećenjem. Samim tim postavlja se pitanje kvaliteta njegove primene u realnom vremenu, za aktuelne režime koji su daleko od procenjenog minimalnog i maksimalnog režima. U klasičnom postupku regulacije napona smatra se da su topologija i dijagrami opterećenja poznati i nepromenljivi. Posledica je da tako definisan zakon regulacije ima izrazito krutu karakteristiku. Odnosno da se na osnovu zakona regulacije za istu vrednost struje na sekundaru regulacionog transformatora uvek zahteva ista vrednost napona, bez obzira na promenu topologije i/ili preraspodelu opterećenja unutar nadgledane mreže.

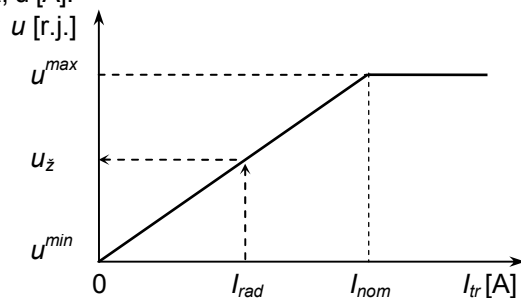
## 3. REGULACIJA NAPONA NA OSNOVU PRIMENE DMS SOFTVERA

Jedna od najvažnijih DMS funkcija je funkcija za regulaciju napona – poboljšanje kvaliteta električne energije. Ona se zasniva na činjenici da svaki potrošač, bez obzira na naponski nivo, kad se snabdeva električnom energijom s naponom čija je vrednost različita od željene, trpi štetu [1,4]. Zavisnost štete od

napona, u okolini željene vrednosti  $u_z$ , može da se predstavi npr. parabolom, slika 3. Željeni napon, za elementarni potrošač, npr. električni aparat, jednak je njegovom nominalnom naponu. Naravno, vrednosti željenih (nominalnih) napona više elementarnih potrošača, koji se napajaju sa jedne zajedničke NN sabirnice, nisu jednake željenom naponu na tim sabirnicama. Jedinствena željena vrednost napona NN sabirnica predstavlja napon za koji je suma pojedinačnih odstupanja napona grupe elementarnih potrošača od nominalnog napona minimalna. Tu vrednost, koja zavisi od strukture i režima celokupne NN mreže (uobičajeno nedostupnih podataka) nije moguće izračunati, ali je moguće proceniti [6]. Npr. vrednost željenog napona na NN sabirnicama Tr SN/NN, preko kojih se napaja grupa elementarnih potrošača ukupnom radnom strujom  $I_{rad}$ , definisana je dijagramom sa slike 4, gde je:  $I_{tr}$  – struja sekundara transformatora, u [A], a  $I_{nom}$  – nominalna struja sekundara, u [A].



Slika 3 – Zavisnost štete potrošača od modula napona



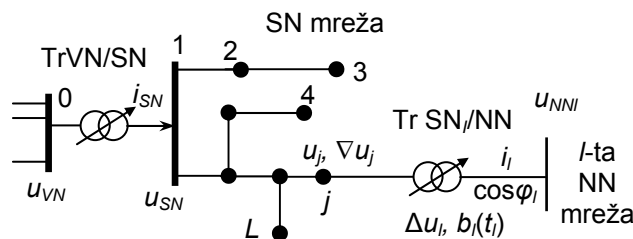
Slika 4 – Izbor optimalnog napona grupe potrošača

Vrednost štete na jednom potrošaču definisana je izrazom [1,5]:

$$\dot{S} = C(u - u_z)^2 E \text{ [n.j.]}, \quad (1)$$

gde je:  $C$  – konstanta štete [novčane jedinice (n.j.)/%<sup>2</sup>kWh];  $E$  – električna energija potrošača [kWh];  $u$  – modul napona [%] i  $u_z$  – željena vrednost napona potrošača [%]. Promenom pozicija regulacionih sklopki mogu da se kontrolišu naponi u DM, odnosno može da se kontroliše šteta koju potrošači trpe usled odstupanja napona od željene vrednosti. Saglasno s kriterijumom štete, koji odmah posle tehničkih granica, predstavlja ključni momenat za regulaciju napona u DM [2,5], razvijen je matematički model za regulaciju napona DM, primenom regulacionih transformatora.

Razmatranja koja slede zasnivaju se na višenaponskoj DM koja se napaja preko trofaznog regulacionog transformatora Tr VN/SN, slika 5. Sa njegovog sekundara se napaja SN DM sa  $L$  SN i  $N$  NN čvorova ( $L \neq N$ ).



Slika 5 – Višenaponska distributivna mreža

Šteta koju trpi  $N$  NN potrošača, u toku vremenskog intervala  $m$ , trajanja  $T^m$ , definisana je kriterijumom optimizacije [6]:

$$\begin{aligned} \dot{S}^m &= \min \left[ \sum_{j=1}^N C_j (u_j^m - u_{jz}^m)^2 E_j^m \right] \\ &= \min \left\{ T^m \sum_{j=1}^N C_j \left\{ u_{VN}^m - \nabla u_j^m - \sum_{i \in \alpha_j} [\Delta u_i^m(t_i) - b_i(t_i)] - u_{jz}^m \right\}^2 i_j^m \cos \varphi_j^m \right\}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$C_j = 3C_j U_j^{nom} I_j^{baz}, \quad E_j^m = T^m 3U_j^{nom} I_j^m \cos \theta_j^m,$$

uz ograničenja:

$$u_{l,teh}^{min} \leq u_l^m \leq u_{l,teh}^{max}, \quad t_i^{min} \leq t_i \leq t_i^{max}, \quad (3)$$

gde je:

- $\alpha_j$  – skup regulacionih transformatora od  $j$ -tih NN sabirnica do VN sabirnica;
- $u_{VN}^m$  – napon VN sabirnice [r.j.];

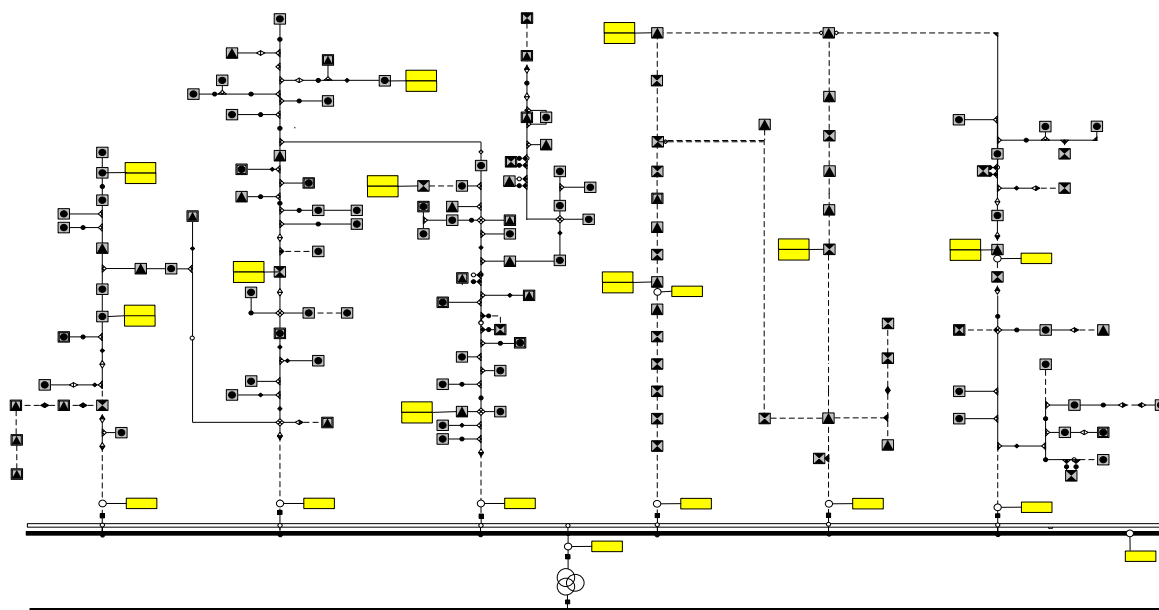
- $u_{jz}^m$  – željeni napon  $j$ -tih NN sabirnica [r.j.];
- $u_{l\text{ teh.}}^{\min}, u_{l\text{ teh.}}^{\max}$  – donja i gornja tehnička granica  $l$ -tog čvora DM,  $l \in (\text{svi čvorovi DM, } L+N)$ ;
- $t_i^{\min}, t_i^{\max}$  – maksimalna i minimalna vrednost pozicije regulacione sklopke  $i$ -tog Tr SN/NN (diskretne celobrojne vrednosti).

Rezultat optimizacione procedure su: optimalne vrednosti pozicije regulacione sklopke svih regulacionih transformatora sa regulacijom u beznaponskom stanju i/ili optimalna vrednost napona na SN sabirnicama regulacionog transformatora sa regulacijom pod opterećenjem.

Što je vrednost štete  $\check{S}$ , definisana izrazom (2) manja, to je globalni naponski profil mreže kvalitetniji. Mogućnost da se ta šteta kontroliše (minimizira), predstavlja osnovu za utvrđivanje regulacije napona, kao jedne od osnovnih centralizovanih analitičkih funkcija DMS-a [4].

#### 4. VERIFIKACIJA PRIMENE DMS SOFTVERA U REGULACIJI NAPONA

Ekperimenti za analizu i verifikaciju matematičkog modela regulacije napona izvršeni su u periodu februar – mart 2008. godine, na delu DM "ED Sombor", koji se električnom energijom snabdeva preko napojnog transformatora 110/20 kV/kV (Tr 1), snage 31.5 MVA, u transformatorskoj stanici (TS) "Sombor 2". TS je nadgledana i upravljana SCADA sistemom VIEW 6000. Preko Tr 1 se električnom energijom snabdeva DM ukupne dužine 130 km, u kojoj se nalazi 133 TS 20/0,4 kV/kV ukupne instalisane snage 40,29 MVA i skoro 12.000 potrošača. Razmatrana DM pripada gradu Somboru i naseljima Bezdan, Kolut, Bački Monoštor, Bački Breg i Kupusina i napaja više vrsta potrošača: 50% domaćinstvo, 35% industrija i 15% trgovačko poslovni objekti. Njena jednopolna šema, sa istaknutim mestima sa kojih se na osnovu SCADA sistema i deset dubinskih merenja (memorijskih registratora električnih veličina napona i struja postavljenih u TS 20/0,4 kV/kV), prikazana je na slici 6. Regulacija napona razmatranog konzuma se sprovodi ARN tipa REG 5.



Slika 6 – DM koja se napaja transformatorom Tr 1, TS "Sombor 2"

U ED Sombor je 2001. godine instaliran DMS softver [4]. Na osnovu rezultata analitičkih funkcija DMS softvera i merenja koja su arhivirana putem SCADA sistema i dubinskih merenja izvršena je analiza rezultata klasičnog rada regulacije napona (zasnovanog na ARN) u odnosu na rezultate koji bi se dobili da je regulacija napona sprovedena na osnovu primene DMS softvera. Postupak se sastoji od sledećih koraka:

- na osnovu SCADA sistema na Tr 1 memorisane su deseto-sekundne vrednosti modula struja i napona na 110 kV i 20 kV naponskom nivou, kao i pozicije regulacione sklopke;
- na osnovu dubinskih merenja, na naponskom nivou 0,4 kV, memorisane su petnaesto-minutne srednje vrednosti modula struja i napona;
- u dispečerskom centru su, automatski svakog punog sata i u trenucima kada je došlo do promene pozicije regulacione sklopke Tr 1, zapisivani rezultati DMS softvera, pre svega: 1) estimirani režim DM i 2) rezultati proračuna funkcije Regulacija napona;
- upoređene su izmerene vrednosti napona na NN sabirnicama sa vrednostima koje su dobijene kao rezultat primene DMS softvera (estimirane, optimalne i željene vrednosti).

MOST  
SEBESVOK  
KENDJIJA  
PAZMAN.  
CRPKA  
BARAČKA 1  
KORLATOS  
VEKON

Kvalitet rezultata regulacije napona zasniva se na izrazu (1) – kvantifikaciji odstupanja željenih vrednosti napona na NN sabirnicama od: izmerenih vrednosti (naznačene sa  $\alpha=M$ ), vrednosti koje su ostvarene na osnovu zakona regulacije ( $\alpha=ZR$ ) i vrednosti koje bi se ostvarile primenom DMS softvera ( $\alpha=DMS$ ):

$$\check{S}_{\alpha}^m = \min \left[ T^m \sum_{j=1}^N C_j (u_{j\alpha}^m - u_{jz}^m)^2 E_j^m \right], \quad \alpha \in \{M, ZR, DMS\}. \quad (4)$$

Kvalitet rezultata kvantifikovan je i vrednostima srednjeg apsolutnog i srednjeg procentualnog odstupanja tih vrednosti:

$$\Delta U_{\alpha} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m |U_{\alpha j} - U_{jz}|, \quad \Delta U_{\alpha\%} = \frac{100}{m} \sum_{j=1}^m \frac{|U_{\alpha j} - U_{jz}|}{U_{jz}} [\%], \quad \alpha \in \{M, ZR, DMS\}. \quad (5)$$

U tabeli 1 prikazano je 20 reprezentativnih stanja razmatrane DM u toku jednog dana, 6. marta 2008. godine, koji predstavljaju momente kada je: 1) na osnovu izmerenih veličina na sekundaru regulacionog transformatora i karakteristike zakona regulacije došlo do promene pozicije regulacione sklopke, odnosno 2) kada je na osnovu primene DMS softvera signalizirano da bi trebalo promeniti poziciju regulacione sklopke. U prvom delu tabele, koji je naznačen sa "Klasičan postupak", prikazane su: vrednosti potrebne za klasičan postupak regulacije napona (20 kV vrednosti modula struje  $I_{20}$  i napona  $U_{20}$ , izmerene na sekundaru Tr 1) i vrednosti dobijene kao rezultat klasičnog upravljanja ARN (vrednost 20 kV napona kojoj se na osnovu izmerenih vrednosti i zakona regulacije teži  $U_{20ZR}$ ; tekuća ostvarena promena pozicije  $\Delta T_{ZR}$ ; tekuća pozicija regulacione sklopke  $K_{ZR}$  i šteta ostvarena od prethodnog do tekućeg momenta  $\check{S}_{ZR}$ ). U drugom delu tabele, koji je naznačen sa "DMS softver" prikazane su vrednosti koje su rezultat primene DMS softvera: optimalni napon na sekundaru Tr 1  $U_{20DMS}$ , predlog promene pozicije  $\Delta T_{DMS}$ , predlog pozicije regulacione sklopke  $K_{DMS}$  i šteta za prethodni vremenski interval  $\check{S}_{DMS}$  koja bi bila da je regulacija napona izvršena na osnovu DMS softvera.

Tabela 1 – Klasičan postupak i regulacija na osnovu primene DMS softvera

vreme	Klasičan postupak					DMS softver					$\Delta \check{S} = \check{S}_M - \check{S}_{DMS}$	
	$I_{20}$	$U_{20}$	$U_{20ZR}$	$\Delta T_{ZR}$	$K_{ZR}$	$\check{S}_{ZR}$	$U_{20DMS}$	$\Delta T_{DMS}$	$K_{DMS}$	$\check{S}_{DMS}$		
	[A]	[kV]	[kV]			[n.j.]	[kV]			[n.j.]	[n.j.]	[%]
0:00	392,1	20,72	20,90		9	2.389,12	21,12		10	2389,12	0,00	0,00
0:24	372,7	20,80	20,90		9	57.252,75	20,90	-1	9	54.264,82	2.987,93	5,21
2:14	313,5	20,69	20,71	-1	8	262.858,50	20,98		9	216.711,30	46.147,20	17,56
3:29	273,1	20,83	20,64		8	121.529,03	20,70	-1	8	43.197,24	953,81	0,78
5:45	312,4	20,69	20,78		8	254.477,34	21,00	+1	9	221.714,91	32.762,43	12,87
6:45	374,8	20,36	20,90		8	170.490,90	21,10	+1	10	155.335,35	15.155,55	8,89
6:51	386,8	20,36	20,90	+1	9	26.039,40	20,89		10	19.200,43	6838,97	26,26
7:30	416,7	20,34	20,90	+1	10	140.002,95	21,16	+1	11	120.504,75	19.498,20	13,93
8:06	435,6	20,37	20,90	+1	11	136.646,40	20,97	+1	12	94610,88	42.035,52	30,76
8:14	446,3	20,81	20,90		11	27.380,40	21,03	-1	11	24989,76	2.390,64	8,73
8:58	500,5	20,56	20,90		11	263.922,12	20,94	+1	12	158.345,88	105.575,24	40,00
13:54	437,2	20,98	20,90		11	981.117,18	21,06	-1	11	894.906,76	86.210,42	8,79
15:34	414,9	21,19	20,90	-1	10	265.105,58	21,22		11	265.105,58	3.400,00	1,28
16:47	410,8	20,94	20,90		10	213.782,44	21,25	-1	10	206.651,42	7.131,02	3,34
17:22	433,1	20,71	20,90		10	101.251,18	21,03	+1	11	97.469,82	3.781,36	3,73
17:49	454,5	20,49	20,90	+1	11	98.642,34	21,01	+1	12	78.031,08	20.611,26	20,89
20:32	465,3	20,86	20,90		11	797.237,37	21,35	-1	11	653.221,73	144.015,64	18,06
21:40	447,2	21,07	20,90	-1	10	247.528,60	21,31		11	236.836,6	10.692,00	4,32
21:46	431,5	20,96	20,90		10	20.895,96	21,02	-1	10	20.895,96	0,00	0,00
24:00	402,9	21,02	20,90		10	359.804,26	21,17		10	359.804,26	0,00	0,00
UKUPNO					7	4.548.353,82		14	3.924.187,65	624.166,17	13,72	

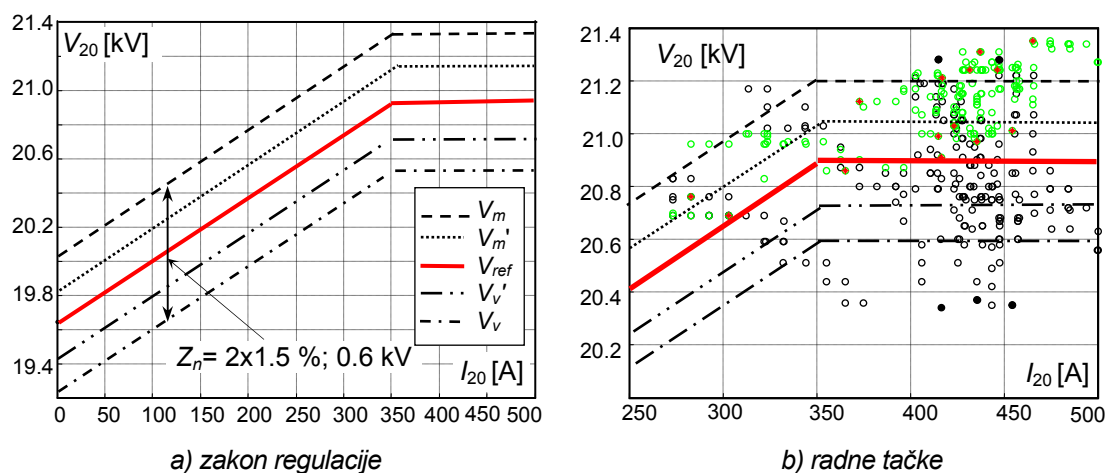
U poslednjem redu tabele sumarno su prikazane vrednosti štete koje su za razmatrana 24 časa ostvarene na osnovu klasičnog postupka i koje bi se ostvarile na osnovu primene DMS softvera. Može se uočiti, da bi se primenom DMS softvera odstupanje napona na NN potrošačima od željene vrednosti smanjilo za skoro 14 %. Pri tom, broj promena pozicije regulacione sklopke bi se povećao sa 7 na 14, što je i dalje daleko od dozvoljenog broja promena pozicija u toku jednog dana (za razmatran ARN to je 30 promena/dan [8]).

Na slici 7a prikazana je zatečena kriva zakona regulacije koja je utvrđena i analizirana u radu [9]. Ona je prikazana punom linijom –  $V_{ref}$ . Na slici su istaknute i sledeće veličine:

- $V_m = V_{ref} + \Delta V_{doz}$ , minimalna vrednost regulisanog napona za koju ARN deluje u smislu smanjenja napona;
- $V_v = V_{ref} - \Delta V_{doz}$ , maksimalna vrednost regulisanog napona za koju ARN deluje u smislu povećanja napona;

- $V_m'$ , *gornji napon povratka*, granica ispod koje, kada bi se napon vratio, pobuđeni ARN ne bi delovao;
- $V_v'$ , *donji napon povratka*, granica iznad koje, kada bi se napon vratio, pobuđeni ARN ne bi delovao.

Dozvoljeno odstupanje napona iznosi 1.5% (praktično je jednako stepenu regulacije –  $\Delta V_{otc} = 1.6\%$ ), tako da zona neosetljivosti iznosi  $2 \times 1.5 = 3\%$ . Na slici 7b kružićima su prikazane radne tačke sekundara napojnog transformatora Tr 1 ostvarene za razmatran dan u toku 6. mart 3.2008. Sa crnim kružićima i crnim tačkama su naznačene vrednosti napona i struja realizovane na sekundaru Tr 1. Sa crnim tačkama su naznačeni momenti kada je došlo do promene pozicije regulacione sklopke (reagovao je regulator napona ARN). Sa zelenim kružićima naznačene su vrednosti napona i struja koje bi se na sekundaru Tr 1 dobile primenom DMS softvera, a crvenim zvezdicama momenti kada bi njegovom primenom došlo do povećanja ili smanjenja pozicije regulatora. Može se uočiti da su vrednosti napona koje bi se dobile primenom DMS softvera po unapređenom postupku veće od ostvarenih vrednosti (dobijenih primenom zakona regulacije).



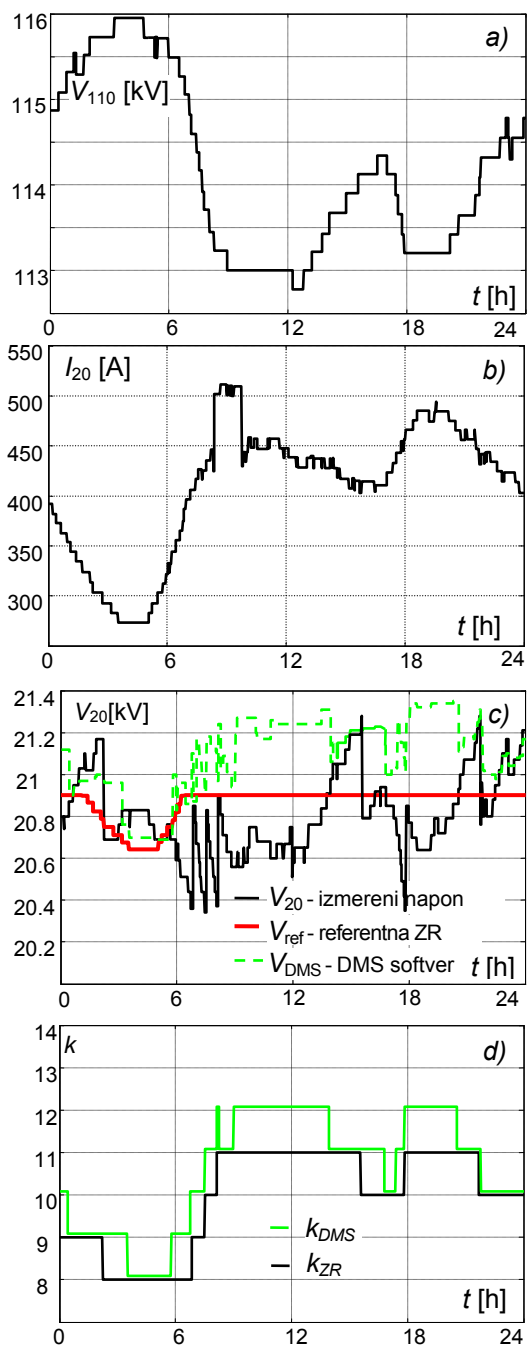
Slika 7 – Zakon regulacije napona

Za razmatrani dan, na slici 8a prikazana je promena vrednosti napona na 110 kV sabirnicama Tr 1. Promena vrednosti struje na sekundaru Tr 1 prikazana je na slici 8b. Izmerene vrednosti napona na 20 kV sabirnicama koje je potrebno ostvariti na osnovu zakona regulacije i DMS softvera prikazane su na slici 8c. Pozicije regulacione sklopke koje su ostvarene i koje bi na osnovu DMS softvera trebalo ostvariti prikazane su na slici 8d. Na osnovu dijagrama može se uočiti sledeće:

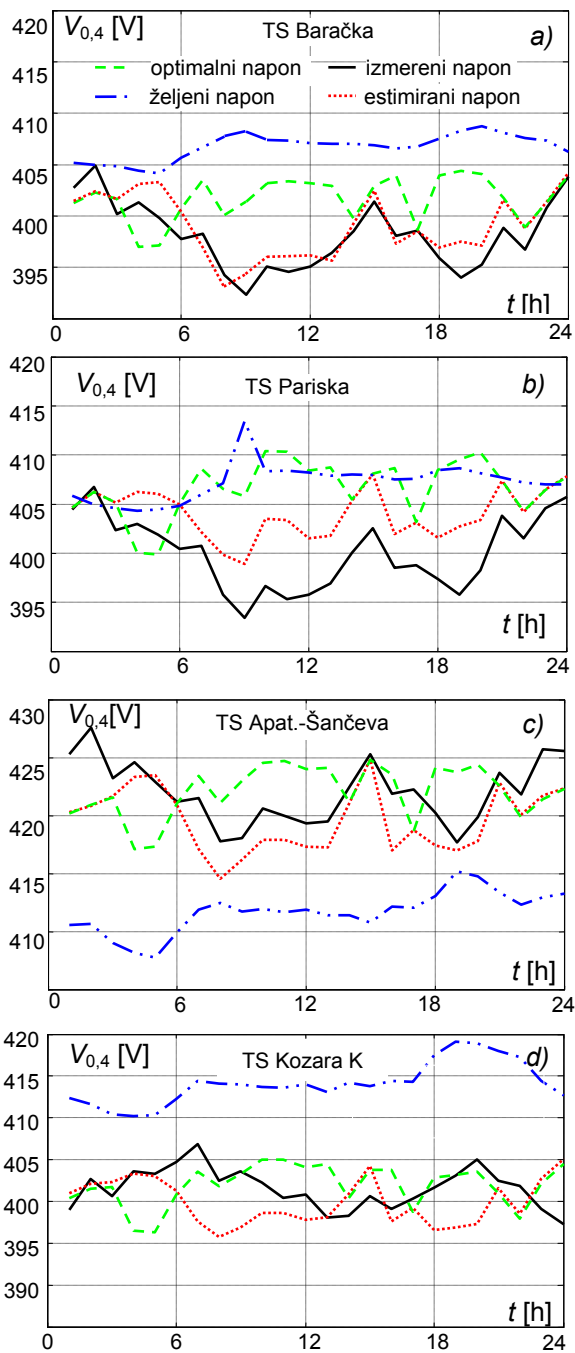
- u periodu od 8:22 do 9:49 došlo do promene uklopnog stanja (naglog povećanja struje  $I_{20}$  i smanjenja napona  $U_{20}$ ) na takvu promenu ARN nije reagovao, ali je zato u 8:59 na osnovu DMS softvera zahtevano povećanje pozicije regulacione sklopke;
- ukoliko bi komande ka regulacionoj sklopki bile posledica odstupanja izmerene i vrednosti dobijene na osnovu DMS softvera na sabirnicama NN potrošača ostvarile bi se znatno bolje vrednosti napona (šteta bi se smanjila za 13,72%, slika 8c i tabela 1).

Na slikama 9a, b, c i d prikazani su dijagrami vrednosti 0,4 kV napona na četiri TS 20/0,4 kV/kV sa dubinskim merenjem: Baračka, Pariska, Apat.-Šančeva i Kozara K. Crna puna linija predstavlja izmerene vrednosti (ostvarene na osnovu zakona regulacije), crvena tačkasta estimirane, zelena isprekidana optimalne (na osnovu primene DMS softvera) i plava (crta-tačka) željene vrednosti. Primenom DMS softvera za 6 od 10 TS vrednosti 0,4 kV napona bi bile veoma bliske željenim vrednostima (primeri: TS Baračka, slika 9a i TS Pariska, slika 9b). Kod tri TS primenom DMS softvera ne bi došlo do značajnijeg povećanja kvaliteta napona (TS Apat.-Šančeva slika 9c, TS Kozara K slika 9d i TS Elektrovojvodina), ali ni do pogoršanja. U razmatranom periodu samo kod jedne TS Škola, bi došlo do pogoršanja naponskih prilika.

Prethodna analiza je urađena na osnovu izmerenih vrednosti napona u dubini DM. Naravno, nije za očekivati da će se u klasičnim DM raspolagati sa velikim brojem takvih uređaja (ako ih uopšte bude i bilo). Samim tim postavlja se pitanje provere i pre svega poverenja u rezultate, ako oni nisu potvrđeni merenjima. Umesto komentara na slikama 9 su prikazane i estimirane vrednosti napona na 0,4 kV sabirnicama u TS 20/0,4 kV/kV sa merenjem. Srednje i maksimalne vrednosti odstupanja preestimiranih i estimiranih od izmerenih vrednosti modula napona na 0,4 kV sabirnicama u TS sa merenjem, prikazane su u tabeli 2. Prosečna vrednost greške estimiranih vrednosti napona u TS je 0,71%, odnosno maksimalna 3,02%. Ovim su granice greške estimiranih vrednosti napona, ustanovljene u radu [10], potvrđene i rezultatima ovog rada. Samim tim i kvalitet regulacije napona realizovane na osnovu estimiranih vrednosti (na osnovu DMS softvera), u DM bez dubinskih merenja, ne bi bio narušen.



Slika 8 – Režim regulacionog transformatora



Slika 9 – 0,4 kV napon TS 20/0,4 kV/kV

Tabela 2 – Rezultati verifikacije estimacije vrednosti modula 0,4 kV napona za 6.3.2008

Energetski objekat	$S_n$ [kVA]	$U_n$ [kV]	$\Delta U_{PRE-IZM}$		$\Delta U_{EST-IZM}$		$max.\Delta U_{PRE-IZM}$		$max.\Delta U_{EST-IZM}$	
			[V]	[%]	[V]	[%]	[V]	[%]	[V]	[%]
TS Apat. - Šančeva	160	0,4	8,64	2,10	2,49	0,59	13,29	3,25	6,73	1,60
TS Somb. – Željezn.	160	0,4	8,45	2,16	2,58	0,65	14,29	3,69	5,26	1,33
TS V. Nazor	630	0,4	6,25	1,59	1,98	0,50	10,69	2,75	4,81	1,20
TS Baračka 1	160	0,4	3,44	0,89	1,51	0,38	7,76	1,99	3,51	0,88
TS Kozara K	160	0,4	8,06	2,05	4,35	1,09	16,52	4,23	11,02	2,78
TS Škola	400	0,4	7,13	1,78	2,48	0,61	15,96	4,01	7,27	1,77
TS Suvajska	400	0,4	2,86	0,71	1,86	0,46	6,75	1,69	4,74	1,17
TS Istarska 1	630	0,4	5,80	1,45	4,19	1,04	9,79	2,43	12,21	3,02
TS Pariska	630	0,4	1,70	0,42	4,04	1,00	6,56	1,64	8,04	1,99
TS Elektrovojevina	630	0,4	7,34	1,78	3,12	0,74	17,27	4,20	10,58	2,53
Prosek TS			5,97	1,49	2,86	0,71	11,89	2,99	7,42	1,83

U tabeli 3 su prikazana odstupanja izmerene, estimirane (klasičan postupak) i optimalne vrednosti (primena DMS softvera) napona od željene vrednosti napona na 0,4 kV sabirnicama. Uočava se da su odstupanja vrednosti NN napona na osnovu primene DMS softvera od željene vrednosti napona ( $\Delta U_{DMS} = 0,55\%$ ), značajno manja od odstupanja napona koja su ostvarena primenom klasičnog postupka ( $\Delta U_{ZR} = 2,14\%$ ). U skladu sa tim primenom DMS softvera ostvarena je znatno manja šteta:  $(\dot{S}_{ZR} - \dot{S}_{DMS})100/\dot{S}_{ZR} = 24,67\%$ .

Tabela 3 – Pokazatelji regulacije napona klasičnim postupkom i DMS softverom

Energetski objekat	$S_n$	$U_n$	Klasičan postupak						DMS softver		
			$\dot{S}_M$	$\dot{S}_{ZR}$	$\Delta U_M$		$\Delta U_{ZR}$		$\dot{S}_{DMS}$	$\Delta U_{DMS}$	
	[kVA]	[kV]	[n.j.]	[n.j.]	[V]	[%]	[V]	[%]	[n.j.]	[V]	[%]
TS Apat. - Šančeva	160	0,4	29.844,48	18.416,22	10,33	2,51	7,89	1,92	29.005,42	2,04	0,50
TS Somb. – Željezn.	160	0,4	30.574,33	47.503,68	9,74	2,36	12,30	2,99	27.367,95	1,78	0,43
TS V. Nazor	630	0,4	138.868,22	180.634,40	10,64	2,59	12,47	3,03	95.327,86	2,33	0,57
TS Baračka 1	160	0,4	20.959,99	17.438,88	8,03	2,04	7,48	1,84	6.209,00	2,76	0,68
TS Kozara K	160	0,4	53.035,86	92.111,46	12,00	2,89	15,44	3,72	59.682,36	3,02	0,73
TS Škola	400	0,4	12.415,96	11.023,50	4,87	1,20	4,52	1,11	17.433,16	2,83	0,70
TS Suvajska	400	0,4	5.683,46	3.359,70	3,35	0,82	2,53	0,62	2.031,31	1,80	0,44
TS Istarska 1	630	0,4	91.757,66	72.166,32	9,81	2,39	7,81	1,90	29.438,90	3,03	0,74
TS Pariska	630	0,4	68.841,30	22.243,92	7,37	1,80	3,76	0,92	5.392,33	1,70	0,42
TS Elektrovovodina	630	0,4	168.743,10	122.711,60	13,85	3,39	13,46	3,30	170.745,34	1,30	0,32
Ukupno			620.724,36	587.609,68					442.633,63		
Prosek					9,00	2,20	8,77	2,14		2,26	0,55

## 5. ZAKLJUČAK

Kvalitet rezultata estimacije napona distributivnih mreža, koji je potvrđen u ranijim i ovom radu, omogućava centralizovanu kontrolu napona, odnosno primenu funkcije regulacije napona integrisane u DMS softver. U tako integrisanom DMS sistemu, za proračune regulacije napona, na raspolaganju su rezultati velikog broja drugih funkcija: matematičkog model, analizatora topologije, kratkoročne prognoze, estimacije stanja, itd. Samim tim, za razliku od klasičnog postupka regulacija napona, regulacija napona zasniva se na aktuelnom uklopnom stanju. Isto tako, zasniva se na rezultatima estimacije stanja, dakle na proceni aktuelnog, a ne na unapred, kruto definisanom režimu (i raspodeli opterećenja). Rezultat tako fleksibilnog postupka je znatno bolji kvalitet napona distributivne mreže. Potvrda njegove efikasnosti i mogućnosti primene u on-line modu predstavlja težište ovog rada. Konačno, na osnovu rezultati rada pokazuje se da primena regulacije napona u okviru DMS softvera ne samo da je moguća već i da se na osnovu nje dobijaju znatno bolji rezultati (manja šteta) nego kada se regulacija naponom vrši na osnovu klasičnog postupka.

## 6. LITERATURA

1. R. Pelissier: Les reseaux d'énergie électrique – Tome 1, Dunod, Paris, France, 1971.
2. V.Strezoski i dr.: Regulacija napona distributivnih mreža, studija za EPS JP Elektrovovodina, Institut za energetiku i elektroniku, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1992.
3. D.S.Popović: Power Application – A Cherry on the Top of the DMS Cake, DA/DSM DistribuTECH Europe 2000, Vienna, Austria, October 10-12, 2000, Specialist Track 3, Session 3, Paper 2.
4. V.Strezoski, D.Popović, D.Bekut, G.Švenda, Z.Gorečan: Energetske aplikacije za operativno upravljanje i planiranje pogona sredjenaponskih distributivnih mreža, Projekat za Javno preduzeće za distribuciju električne energije "Elektrovovodina", Fakultet tehničkih nauka – Institut za energetiku, elektroniku i telekominukacije, Novi Sad, 1995-2005.
5. V. Strezoski, D. Janjić: Sistem regulacije napona radijalnih distributivnih mreža, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad 1997.
6. G.Švenda, R.Bibić: Unapređen matematički model za regulaciju napona u distributivnim mrežama; Elektroprivreda, No.2, 2001, pp. 120-126.
7. V.Strezoski, N.Katić, D.Janjić: Voltage control integrated in distribution management systems, Electric Power Systems Research, USA, 60 (2001) 85-97.
8. Uputstvo za upotrebu: On-Load Tap Changer, Maschinenfabrik Reinhausen, Germany, 1986.
9. Z.J.Simendić, V.C.Strezoski, G.S.Švenda: Analiza rada automatskih regulatora napona u ED Sombor, JUKO CIGRE 28 savetovanje 2007. – Vrnjačka Banja, STK – B5.
10. Z.J.Simendić, V.C.Strezoski, G.S.Švenda: In-Field Verification of the Real-Time Distribution State Estimation, 18<sup>th</sup> International Conference on electricity Distribution, Turin, 6.-9. June 2005, Session No. 3.