

## **STATIČKE KARAKTERISTIKE POTROŠNJE NA 35KV NIVOU DISTRIBUTIVNE MREŽE NIŠA**

L. Korunović, Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Republika Srbija<sup>1</sup>  
D. Stojanović, Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Republika Srbija

### **UVOD**

Kod proračuna režima elektroenergetskih mreža snaga opterećenja potrošačkih čvorova se smatra poznatom veličinom. Zbog toga je tačnost rezultata proračuna ustaljenih stanja direktno uslovljena izborom adekvatnog statičkog modela potrošnje i njegovih parametara, a tačnost proračuna prelaznih režima izborom odgovarajućeg dinamičkog modela sa njegovim parametrima. Mnogi istraživači su se bavili modelovanjem potrošnje, predlagali svoje modele i eksperimentalnim putem dolazili do konkretnih parametara. Koji će se model od brojnih razvijenih modela koristiti zavisi od sastava potrošnje i od cilja upotrebe određenog modela, a parametri ovih modela dobijaju različite vrednosti u zavisnosti od toga o kojoj kategoriji potrošnje se radi.

U literaturi se, po pravilu, daju parametri modela potrošnje za pojedine standardne komponente potrošnje. Potrošnja na višim naponskim nivoima zavisi od strukture potrošnje na nižim naponskim nivoima. Ako se zna sastav potrošnje i parametri pojedinih komponenata potrošnje, parametri ekvivalentne potrošnje mogu se odrediti primenom metoda agregacije, kao što je to urađeno na primer u Ribeiro i Lange (1) ili u Pillay, Sabir i Haq (2). Međutim, tačan sastav potrošnje na srednjem i visokom naponu je veoma teško proceniti, pa se ovako dobijeni rezultati ekvivalentiranja moraju uzeti sa dosta rezerve. Zbog toga je najbolje da se, za svaki konkretan slučaj, metodom baziranom na merenjima utvrde parametri modela potrošnje. Metod baziran na merenjima obuhvata terenska merenja u izabranim čvorovima distributivne mreže, a dobijeni parametri se potom mogu primeniti u čvorovima sa sličnim sastavom potrošnje, Kundur (3). Međutim, tako utvrđeni parametri na jednoj lokaciji, za jednu strukturu potrošača, ne mogu se bezrezervno upotrebiti u drugim uslovima i za druge EES. Parametri modela potrošnje iz literature mogu se iskoristiti samo za preliminarne proračune i uporedne analize.

---

<sup>1</sup> Lidija Korunovic, E-mail: lidijak@elfak.ni.ac.yu

Iako bolji, metod baziran na merenjima je komplikovaniji, jer podrazumeva saglasnost elektrodistributivnog preduzeća, relativno skupu mernu opremu i neminovno angažovanje većeg broja ljudi. To su verovatno razlozi zbog kojih u našoj zemlji i regionu do sada nije obavljeno opsežno istraživanje koje je bazirano na merenjima, a vezano za modelovanje potrošnje. Rezultati koji su predstavljeni u ovom radu su deo istraživanja o modelovanju potrošnje (neki od rezultata su već objavljeni u Stojanović, Korunović i Milanović (4)) na osnovu merenja na različitim naponskim nivoima srednjenaponske distributivne mreže Niša, u različitim sezonama, različitim danima u nedelji i dobima dana. Ovde su predstavljeni rezultati identifikacije parametara najčešće korišćenih statičkih modela potrošnje na 35kV nivou dobijeni na osnovu eksperimenata promene napona transformatorom 110/35kV koji ima promenljivi prenosni odnos. Pošto je izvršeno 120 eksperimenata u obe sezone dobijene su statistički pouzdane vrednosti parametara. One su razvrstane po sezonama i dobima dana, a njihova validnost je proverena.

## NAJČEŠĆE KORIŠĆENI STATIČKI MODELI POTROŠNJE

U opštem slučaju potrošnja jednog „jakog“ potrošačkog čvora modeluje se složenim modelom koji u sebi sadrži jednačine statičke potrošnje i ekvivalentnog asinhronog motora, a ako postoji potreba, onda model sadrži i jednačine ekvivalentnog sinhronog motora, (3). Složenost ovakvog modela potrošnje zavisi od sastava potrošnje, vrste pojava koje se žele analizirati, željene tačnosti dobijenih rezultata, itd.

Statičku potrošnju čine: elektrotermički uređaji, osvetljenje, komunalno-stambena potrošnja i slično, odnosno potrošnja u koju nisu uključeni veliki asinhroni motori niti elektromotorni pogoni. Ona se u opštem slučaju modeluje statičkim karakteristikama aktivne i reaktivne snage po naponu i frekvenciji. Najčešće korišćen statički model potrošnje je eksponencijalni model u kome se zavisnost od frekvencije zanemaruje pošto se napon mreže obično mnogo više menja od frekvencije:

$$P = P_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{k_{pu}}, \quad (1)$$

$$Q = Q_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{k_{qu}}, \quad (2)$$

gde je

$P$  i  $Q$  – aktivna i reaktivna snaga potrošnje pri naponu  $U$  i frekvenciji  $f$ ,  
 $P_n$  i  $Q_n$  – aktivna i reaktivna snaga potrošnje pri nazivnom naponu  $U_n$ ,  
 $k_{pu}$  i  $k_{qu}$  – koeficijent samoregulacije aktivne i reaktivne snage po naponu.

Parametri eksponencijalnog modela,  $k_{pu}$  i  $k_{qu}$  pokazuju, u stvari, kolika je procentualna promena aktivne i reaktivne snage za procenat promene napona u okolini nazivne vrednosti napona što se može pokazati korišćenjem razvoja jednačina (1) i (2) u Tajlorov red u okolini  $U_n$ , Taylor (5). Zbog toga koeficijenti  $k_{pu}$  i  $k_{qu}$  predstavljaju parcijalne izvode aktivne i reaktivne snage po naponu u okolini nazivnog napona, (1), ili koeficijente osetljivosti ovih snaga na promenu napona, Tasic i Rajaković (6). Kada su oba naponska eksponenta u modelu (1) i (2),  $k_{pu}$  i  $k_{qu}$ , jednaka 0, 1 ili 2, radi se o potrošnji tipa konstantne snage, struje ili impedanse, respektivno.

Jedan od najčešće korišćenih statičkih modela potrošnje je polinomski model drugog reda. Postoji nekoliko varijanti ovog modela. Varijanta u kojoj se zavisnost od frekvencije ne uzima u obzir je

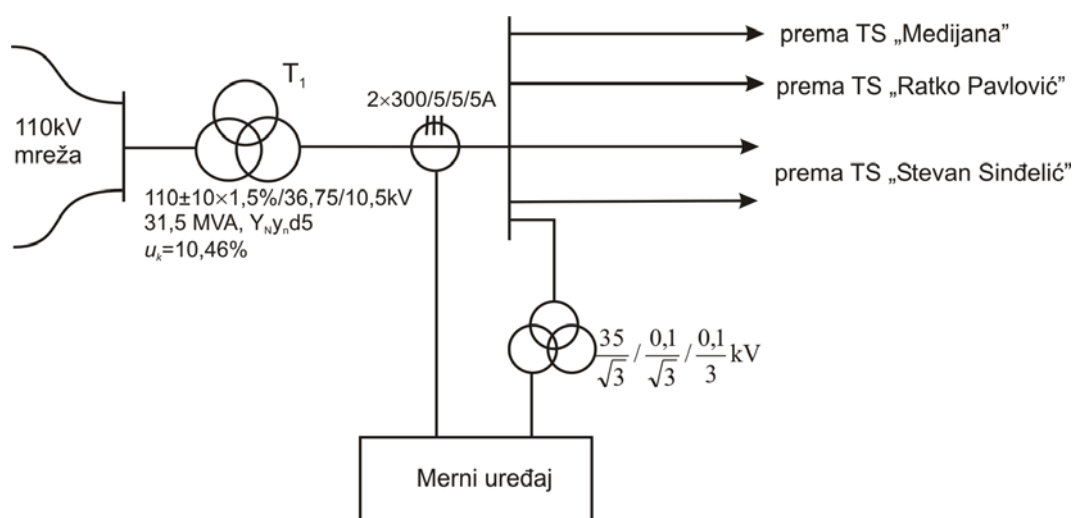
$$P = P_n \left[ p_1 \left( \frac{U}{U_n} \right)^2 + p_2 \left( \frac{U}{U_n} \right) + p_3 \right], \quad (3)$$

$$Q = Q_n \left[ q_1 \left( \frac{U}{U_n} \right)^2 + q_2 \left( \frac{U}{U_n} \right) + q_3 \right]. \quad (4)$$

Polinomski model (3) i (4) se još zove i ZIP model pošto je sastavljen od komponenti potrošnje tipa konstantne impedanse ( $Z$ ), konstantne struje ( $I$ ) i konstantne snage ( $P$ ). Parametri ovog modela su  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ ,  $q_1$ ,  $q_2$  i  $q_3$ , dok su  $P_n$  i  $Q_n$  aktivna i reaktivna snaga pri nazivnom naponu  $U_n$ . Parametri  $p_1$  i  $q_1$  predstavljaju relativna učešća opterećenja konstantne impedanse,  $p_2$  i  $q_2$  relativna učešća opterećenja konstantne struje i  $p_3$  i  $q_3$  relativna učešća opterećenja konstantne snage u ukupnom opterećenju. Zbir sva tri tipa potrošnje, to jest sve tri komponente iznosi 1r.j.

## OPIS EKSPERIMENTATA

U cilju utvrđivanja konkretnih parametara najčešće korišćenih statičkih modela potrošnje sredjenaponske distributivne mreže Niša izvršena su brojna merenja. U ovom radu su prikazani rezultati merenja napona i snage tokom eksperimenata namerne promene napona transformatorom  $T_1$  ( $110\pm 10\times 1,5\%/36,75/10,5\text{kV}$ ) u TS „Niš 13“ (vidi Sliku 1). Eksperimenti su izvršeni u letnjoj sezoni od 30. septembra do 2. oktobra 2005. i u zimskoj sezoni 29. i 30. marta 2007. godine, a u proseku je bilo po osam eksperimenata ujutro, poslepodne i uveče.



Slika 1. Šema merenja na 35kV nivou transformatora  $T_1$

Analiza kategorija potrošnje svih transformatorskih stanica 10/0,4kV koje se preko TS 35/10kV napajaju iz TS „Niš 13“ pokazuje da 45,67% ukupne instalisane snage ide na gradsku potrošnju bez daljinskog grejanja, 35,86% na gradsku potrošnju sa daljinskim grejanjem, 2,14% na prigradska naselja, 2,35% na seoska naselja, 3,24% na trgovačku potrošnju, 2,51 na zdravstvene ustanove, 7,09% na industriju i 1,14% na škole. To znači da stambena potrošnja učestvuje sa 86,02% u ukupnoj potrošnji i da je dominantna kategorija ukupne potrošnje razmatranog transformatora 110/35kV.

## IDENTIFIKACIJA PARAMETARA MODELA

Primera radi, na Slici 2a) i b) prikazane su promene aktivne i reaktivne snage u  $P-U$  i  $Q-U$  ravni, respektivno, u toku eksperimenta smanjenja napona od 36,60 na 34,17kV. Tačka 1 odgovara stacionarnom režimu pre poremećaja. Proces u kome se menjaju i napon i snaga odvija se po krivama  $P(U)$  i  $Q(U)$ , od tačke 1 do tačke 2. Ove krive su dobijene fitovanjem izmerenih vrednosti polinomima drugog reda po metodi najmanjih kvadrata, Nenadović (7), pri čemu se minimizuje sledeća funkcija cilja

$$J = \sum_{i=1}^N (P_m(t_i) - P(t_i))^2, \quad (5)$$

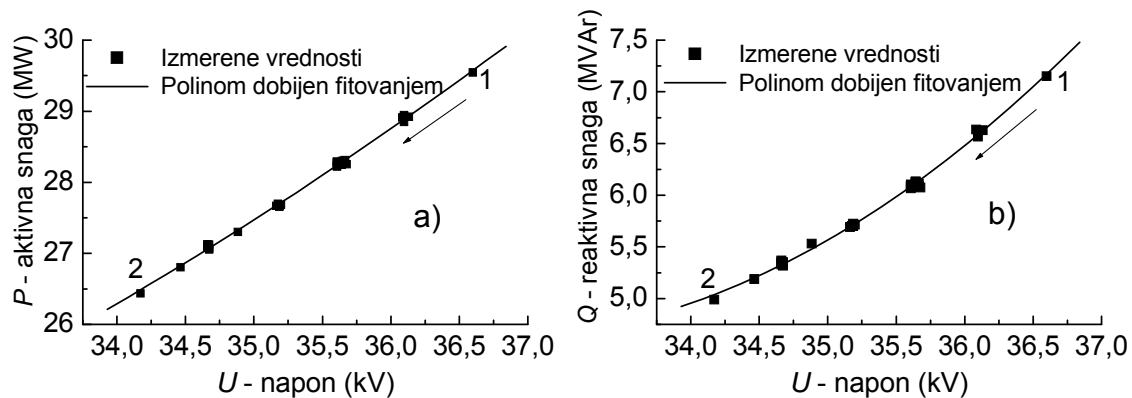
u kojoj  $P_m(t_i)$  i  $P(t_i)$  označavaju u trenutku  $t_i$  izmerene vrednosti aktivne snage i odziv aktivne snage na promenu napona na osnovu izabranog polinomskog modela potrošnje, respektivno, dok je  $N$  broj uzoraka merenja.

Statičke karakteristike aktivne i reaktivne snage u polinomskom obliku koje opisuju ponašanje potrošnje tokom smanjenja napona od tačke 1 do tačke 2 sa Slike 2 su

$$P = 48,654 - 2,4423 \cdot U + 0,0525 \cdot U^2 \quad (6)$$

$$Q = 163,437 - 9,7791 \cdot U + 0,1506 \cdot U^2. \quad (7)$$

U ovim jednačinama je napon u kV, a aktivna i reaktivna snaga u MW i MVar, respektivno. Obe karakteristike, koje su date jednačinama (6) i (7), veoma dobro opisuju ponašanje potrošnje tokom razmatranog prelaznog procesa - imaju velike koeficijente korelacije koji u skladu sa definicijom datom u (7) iznose  $R=0,9988$  za  $P(U)$  i  $R=0,9984$  za  $Q(U)$ , respektivno, i male standardne devijacije,  $\sigma=0,0374$  i  $\sigma=0,0291$ . Polinomskie karakteristike koje su dobijene fitovanjem rezultata svih preostalih eksperimenata (njih 119) takođe veoma dobro opisuju ponašanje snage tokom promene napona i ni u jednom slučaju njihov koeficijent korelacije nije manji od 0,9.



Slika 2. Izmerene vrednosti i polinom dobijen fitovanjem pri eksperimentu smanjenja napona za: a) aktivnu i b) reaktivnu snagu

Da bi karakteristike potrošnje koje su dobijene pri različitim režimima rada mreže mogle međusobno da se uporede, potrebno je da se izvrši normalizacija vrednosti napona i snage koje su dobijene merenjima. Ovde je normalizacija izvršena nazivnom vrednošću napona mreže,  $U_n=35\text{kV}$ , a snaga onom svojom vrednošću koja se dobija na osnovu fitovanih polinoma pri nazivnom naponu mreže. Nakon normalizacije izmerenih vrednosti napona i snage, parametri polinomskog, ili eksponencijalnog statičkog modela potrošnje dobijeni su fitovanjem po metodi najmanjih kvadrata.

## ANALIZA REZULTATA

U ovom odeljku analizirane su statičke karakteristike potrošnje 35kV mreže koje su dobijene na osnovu eksperimenata u letnjoj i zimskoj sezoni. Normalizovane karakteristike aktivne i reaktivne snage 35kV mreže u letnjoj sezoni iz svih 68 eksperimenata promene prenosnog odnosa transformatora 110/35kV u ovoj sezoni prikazane su na Slici 3. Na istoj slici date su i srednje karakteristike koje su dobijene primenom metode najmanjih kvadrata na niz ulaznih tačaka koje odgovaraju pojedinim karakteristikama u njima validnim opsezima napona. Ove srednje karakteristike su

$$P(U) = 0,1027 + 0,2492 \cdot U + 0,6483 \cdot U^2 \quad (8)$$

$$Q(U) = 18,9834 - 40,9682 \cdot U + 22,9831 \cdot U^2, \quad (9)$$

i one su validne u opsegu napona od 0,95 do 1,1r.j. Pri tome su maksimalna odstupanja individualnih karakteristika od srednje 2,06% kod aktivne i 6,32% kod reaktivne snage pri  $U=1,1r.j.$  Zato se mogu izdvojiti jedna reprezentativna – srednja karakteristika aktivne snage i, u cilju postizanja veće tačnosti modelovanja reaktivne snage, tri karakteristike ove snage:  
za jutro

$$Q(U) = 18,8240 - 40,7511 \cdot U + 22,9250 \cdot U^2, \quad U \in (0,95r.j.; 1,1r.j.), \quad (10)$$

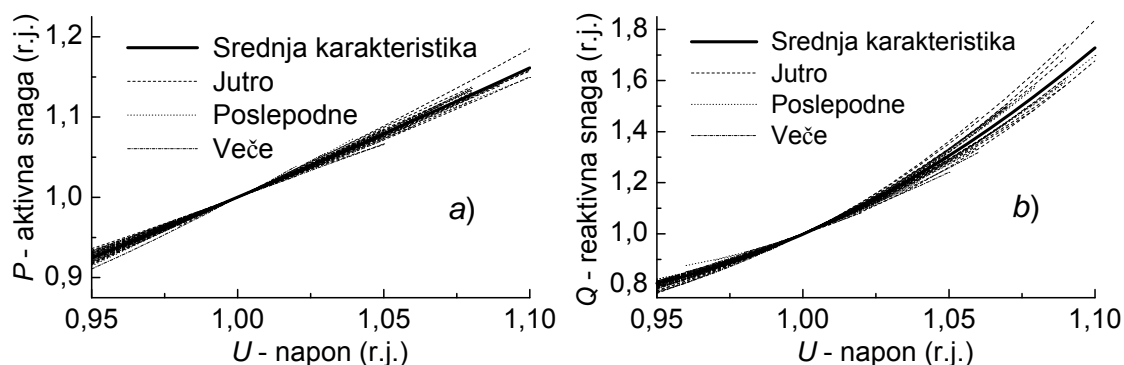
za poslepodne

$$Q(U) = 18,4147 - 39,7471 \cdot U + 22,3329 \cdot U^2, \quad U \in (0,95r.j.; 1,1r.j.), \quad (11)$$

i za več

$$Q(U) = 12,0690 - 26,9525 \cdot U + 15,8828 \cdot U^2, \quad U \in (0,95r.j.; 1,07r.j.). \quad (12)$$

Korišćenjem tri karakteristike reaktivne snage, maksimalno odstupanje individualnih karakteristika od srednje karakteristike odgovarajućeg doba dana smanjuje se na najviše 5%.



Slika 3. Individualne i srednja karakteristika u letnjoj sezoni:  
a) aktivne i b) reaktivne snage

Polinomske karakteristike mogu se aproksimirati eksponencijalnim karakteristikama. To je učinjeno na Slici 4 na primeru srednjih karakteristika za leto. Analiza ovih karakteristika pokazuje da se u opsegu napona od 0,95 do 1,1r.j. može usvojiti eksponencijalni model aktivne snage čiji je parametar  $k_{pu} = dP/dU|_{U=1} = 1,546$  uz najveće odstupanje od odgovarajuće polinomske karakteristike od - 0,22%. Kod reaktivne snage odstupanja aproksimativne eksponencijalne karakteristike od polinomske su veće, pa se eksponencijalni model sa parametrom  $k_{qu} = dQ/dU|_{U=1} = 4,998$  može smatrati dovoljno dobrim u opsegu napona od 0,95 do 1,081r.j., jer su u tom opsegu greške aproksimacije manje od 5%.

Individualne karakteristike u zimskoj sezoni takođe su obrađene i određene su srednje sezonske karakteristike aktivne i reaktivne snage:

$$P(U) = -0,1217 + 0,7007 \cdot U + 0,4210 \cdot U^2 \quad (13)$$

$$Q(U) = 17,5872 - 38,2270 \cdot U + 21,6490 \cdot U^2, \quad (14)$$

respektivno, koje važe u opsegu u kojem je napon menjan na 35kV sabirnicama u zimskoj sezoni, od 0,95 do 1,08r.j. Maksimalna odstupanja individualnih od odgovarajućih srednjih karakteristika se imaju

pri naponu od 1,07r.j. i sličnog su procentualnog iznosa kao maksimalna odstupanja u letnjoj sezoni: - 1,17% kod aktivne i 5,23% kod reaktivne snage. Da bi se odstupanja individualnih karakteristika reaktivne snage od reprezentativne smanjila ispod 5%, mogu se usvojiti tri karakteristike reaktivne snage:

za jutro

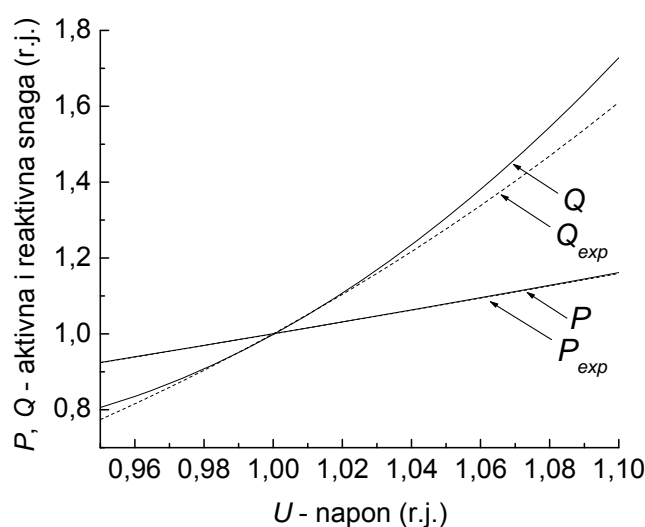
$$Q(U) = 15,9086 - 34,7315 \cdot U + 19,8230 \cdot U^2, U \in (0,95r.j.; 1,07r.j.), \quad (15)$$

za poslepodne

$$Q(U) = 22,3435 - 48,2129 \cdot U + 26,8684 \cdot U^2, U \in (0,95r.j.; 1,07r.j.), \quad (16)$$

i za več

$$Q(U) = 14,3514 - 31,4089 \cdot U + 18,0578 \cdot U^2, U \in (0,95r.j.; 1,08r.j.). \quad (17)$$



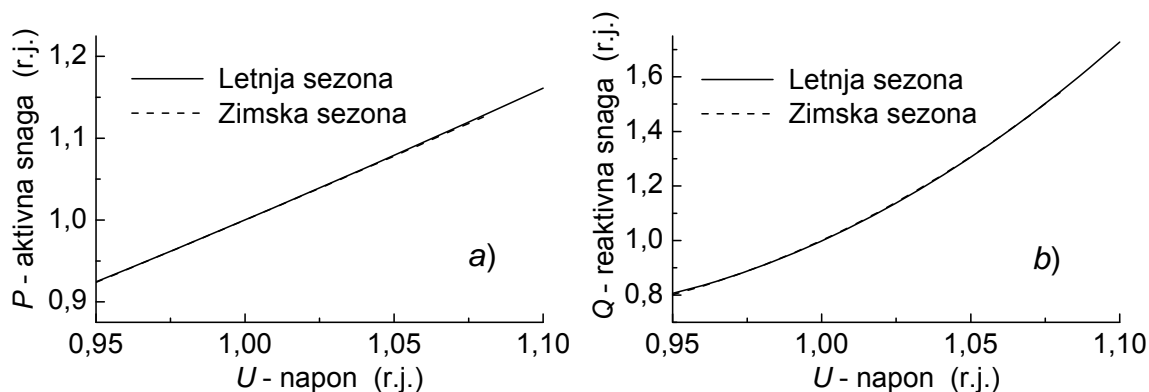
Slika 4. Srednje polinomske i eksponencijalne karakteristike u letnjoj sezoni

Kao i kod letnje sezone i u zimskoj se polinomske karakteristike mogu aproksimirati eksponencijalnim modelom. Kod srednje polinomske karakteristike aktivne snage, aproksimacija eksponencijalnom karakteristikom čiji je eksponent  $k_{pu} = 1,543$  takva je da se praktično poklapa sa polinomskom krivom u čitavom opsegu napona (uz greške koje su manje od 0,01%). U slučaju reaktivne snage eksponencijalna kriva sa  $k_{qu} = 5,053$  takođe se može smatrati valjanom u čitavom ispitivanom opsegu napona od 0,95 do 1,08r.j. uz najveću grešku od -4,38%.

## POREĐENJE REPREZENTATIVNIH KARAKTERISTIKA

Na Slici 5 prikazane su sezonske statičke karakteristike kako aktivne tako i reaktivne snage. Sa ove slike se vidi da se odgovarajuće karakteristike u letnjoj i zimskoj sezoni praktično poklapaju, uz najveće odstupanje karakteristike u zimskoj sezoni od odgovarajuće karakteristike u letnjoj sezoni od - 0,52% (pri  $U=0,95r.j.$ ) koje se ima kod reaktivne snage.

Radi preglednosti, u Tabeli 1. dati su parametri eksponencijalnog modela potrošnje dobijeni na 35kV nivou u letnjoj i zimskoj potrošnji. Odgovarajući parametri u dve sezone veoma su bliski jedni drugima: koeficijent samoregulacije aktivne snage je 0,19% manji od onog u zimskoj, a koeficijent samoregulacije reaktivne snage je 1,1% veći u zimskoj sezoni.



Slika 5. Statičke karakteristike u letnjoj i zimskoj sezoni:  
a) aktivne i b) reaktivne snage

TABELA 1 - PARAMETRI EKSPONENCIJALNOG MODELA POTROŠNJE 35KV MREŽE

Sezona	$k_{pu}$	$k_{qu}$
Letnja	1,546	4,998
Zimska	1,543	5,053

Uzrok ovako malih razlika među karakteristikama dve sezone su slične vremenske prilike u danima letnje i zimske sezone kada su izvršeni eksperimenti. Analiza podataka o vremenu iz perioda merenja pokazuju da su prosečne maksimalne dnevne temperature u dve sezone bile skoro iste: 14°C i 15,5°C u letnjoj i zimskoj sezoni, respektivno. Pokazuje se da je maksimalna dnevna temperatura dominantan faktor koji utiče na sastav potrošnje i posledično na identifikovane statičke karakteristike. Naime, ostali vremenski podaci iz perioda kada su izvršena merenja mnogo se više razlikuju, recimo u letnjoj sezoni je prosečna vlažnost vazduha bila 89,7%, a u zimskoj 44%, prosečna minimalna temperatura u letnjoj sezoni 11°C, a u zimskoj 4,5°C, brzina vetra 1,7m/s i 3,5m/s u letnjoj i zimskoj sezoni, respektivno, ali se ove razlike ne odražavaju vidljivo na identifikovane parametre potrošnje.

Karakteristike potrošnje koje su analizirane u ovom radu, dobijene su na osnovu merenja u periodima koji su vremenski udaljeni čak jednu i po godinu. To pokazuje da su dobijene karakteristike validne i nakon dužeg vremena i da se rezultati, prikazani u ovom radu, mogu primeniti sve dok se ne dogode značajne ekonomske i socijalne promene koje će uticati da se u većoj meri promeni sastav potrošnje razmatrane mreže.

## ZAKLJUČAK

U radu su analizirani rezultati 120 eksperimenata promene prenosnog odnosa transformatora 110/35kV koji napaja pretežno stambenu potrošnju u cilju dobijanja statistički pouzdanih statičkih karakteristika potrošnje u različitim sezonama, danima u nedelji i dobima dana. Utvrđeno je da se ponašanje potrošnje sa promenom napona veoma dobro modeluje polinomskim (ZIP) modelom, uz koeficijent korelacije koji ni kod jednog eksperimenta nije manji od 0,9. Identifikovane su reprezentativne, srednje, polinomske karakteristike aktivne snage u svakoj sezoni i po tri reprezentativne karakteristike reaktivne snage - za jutro, poslepodne i večer, tako da ni jedna statička karakteristika dobijena nekim od eksperimenata ne odstupa više od 5% od odgovarajuće srednje karakteristike.

Pokazano je da je aproksimacija polinomskih karakteristika eksponencijalnim modelom kod razmatrane potrošnje moguća u opsegu napona od 0,95r.j. do 1,08r.j. i u letnjoj i u zimskoj sezoni. U ovom opsegu napona je maksimalno odstupanje aproksimativne eksponencijalne karakteristike od polinomske manje od 5%.

Analiza statičkih karakteristika potrošnje iz letnje i zimske sezone pokazala je da su identifikovane statičke karakteristike gotovo identične i da je njihovo međusobno odstupanje manje od procenta. Utvrđeno je da na parametre potrošnje razmatrane mreže iz dve sezone dominantno utiče maksimalna dnevna temperatura koja je u bila skoro ista u periodima kada su izvršena merenja. Takođe je pokazano se rezultati prezentovani u ovom radu mogu primeniti i nakon dužeg vremena sve dok se značajno ne promeni sastav potrošnje razmatrane mreže.

## ZAHVALNOST

Ovaj rad je nastao kao rezultat istraživanja u okviru istraživačko-razvojnog projekata pod nazivom "Karakterizacija dijagrama potrošnje, razvoj metodologije za proračun gubitaka energije u distributivnim mrežama EPS-a i njena eksperimentalna verifikacija", koji finansira Ministarstvo za nauku i zaštitu životne sredine Republike Srbije.

Autori zahvaljuju rukovodstvu PD "Jugoistok" Niš, a posebno gospodi Slađanu Jovanoviću, Andriji Vukašinoviću, Goranu Kostiću i Daliboru Nikoliću, koji su omogućili i/ili pomogli merenja u objektima ovog preduzeća.

## LITERATURA

1. Ribeiro J, Lange F, 1982, "A New Aggregation Method for Determining Composite Load Characteristics", *IEEE Trans., Power Appar. Syst.*, "No. 8", pp. 2869-2875.
2. Pillay P, Sabur S, Haq M, 1997, "A model for induction motor aggregation for power system studies", *Elect. Power Syst. Res.*, "No. 3", pp. 225-228.
3. Kundur P, 1994, "Power System Stability and Control", "Mc Graw-Hill", New York.
4. Stojanović D, Korunović L, Milanović J, 2008, "Dynamic load modelling based on measurements in medium voltage distribution network", *Elect. Power Syst. Res.*, "No. 2", pp. 228-238.
5. Taylor C, 1994, "Power System Voltage Stability", "Mc Graw-Hill", New York.
6. Tasić D, Rajaković N, 2000, "Uticaj potrošnje na naponsku nestabilnost elektroenergetskog sistema", monografija, "Elektronski fakultet", Univerzitet u Nišu, Niš.
7. Nenadović M, 1988, "Matematička obrada podataka dobijenih merenjem", "Srpska akademija nauka i umetnosti", Beograd.

**Ključne reči:** statičke karakteristike, modelovanje potrošnje, distributivna mreža.  
*Lidija Korunovic, E-mail: lidijak@elfak.ni.ac.yu*