

UTICAJ NAČINA MODELOVANJA DISTRIBUTIVNIH MREŽA NA PRORAČUN TOKOVA SNAGA

D. MILOŠEVIĆ¹, Elektrotehnički Institut "Nikola Tesla" a.d. Beograd, Srbija
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija
N. VRCELJ, Elektrotehnički Institut „Nikola Tesla“ a.d. Beograd, Srbija
N. ŠUŠNICA, Elektrotehnički Institut „Nikola Tesla“ a.d. Beograd, Srbija
V. STANOJEVIĆ, „EPS Distribucija“ d.o.o. Beograd, Srbija

UVOD

Proračuni tokova snaga i naponskih prilika su osnov kvalitetnih analiza pogonskih stanja distributivnih mreža. Dobijeni rezultati zavise od primenjenog algoritma, ali i u mnogome od detaljnosti i preciznosti ulaznih podataka. U zavisnosti od namene modela, potrebno je uvažiti različite uticaje na parametre elemenata mreže. U slučajevima kada je potrebno modelovati pogonsko stanje mreže vezano za jedan određeni trenutak, poželjno je da se što vernije preslikaju realni uslovi eksploatacije na sam model u softverskom paketu.

Ukoliko je model namenjen za određivanja gubitaka aktivne snage najveći uticaj na rezultate proračuna ima promena podužne električne otpornosti vodova sa trenutnim ambijentalnim uslovima – pre svega se misli na uticaj temperature vazduha i paralelnog vođenja kablova na temperaturu provodnika. Ocena osetljivosti modela na uvažavanje pomenutih uticaja je prikazana kroz promenu gubitaka aktivne snage u posmatranoj mreži.

KARAKTERISTIKE ANALIZIRANIH MODELA

Nivo i struktura potrošnje električne energije u velikoj meri zavise, kako od navika potrošača, tako i od godišnjih doba. Kao ekstremni slučajevi u pogledu temperature vazduha i ekstremnih opterećenja u mreži modelovani su trenuci letnjeg i zimskog maksimuma. Za svako od dva navedena stanja analizirani su:

Model I – podužna otpornost vodova je proračunata shodno prosečnoj temperaturi ambijenta koja se imala u posmatranoj sezoni (preporučene vrednosti iz literature (1)),

Model II – podužna otpornost vodova je proračunata shodno temperaturi ambijenta koja se imala u posmatranom trenutku,

Model III – podužna otpornost vodova je proračunata shodno temperaturi ambijenta koja se imala u posmatranom trenutku, uz uvažavanje uticaja paralelnog vođenja kablova na naponskom nivou 10 kV.

Kao polazna osnova za proračun podužne električne otpornosti provodnika u svih šest modela su uzete kataloške vrednosti za sve zastupljene tipove vodova u analiziranoj mreži. Reč je o vrednostima koje se imaju na 20°C. Za svaki tip voda vršeno je preračunavanje podužne električne otpornosti u odnosu na polazni slučaj, a u skladu sa sledećom formulom:

$$r_{\Theta} = r_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \Delta\Theta) \quad (1)$$

gde su:

Θ – posmatrana temperatura provodnika,

¹ dejan.milosevic@ieent.org

r_{Θ} – podužna električna otpornost na temperaturi Θ ,
 r_{20} – podužna električna otpornost pri jednosmernoj struji na 20°C,
 α_{20} – temperaturni koeficijent na 20°C,
 $\Delta\Theta$ – promena temperature u odnosu na 20°C.

Temperaturni koeficijent za bakar i aluminijum su računati na sledeći način:

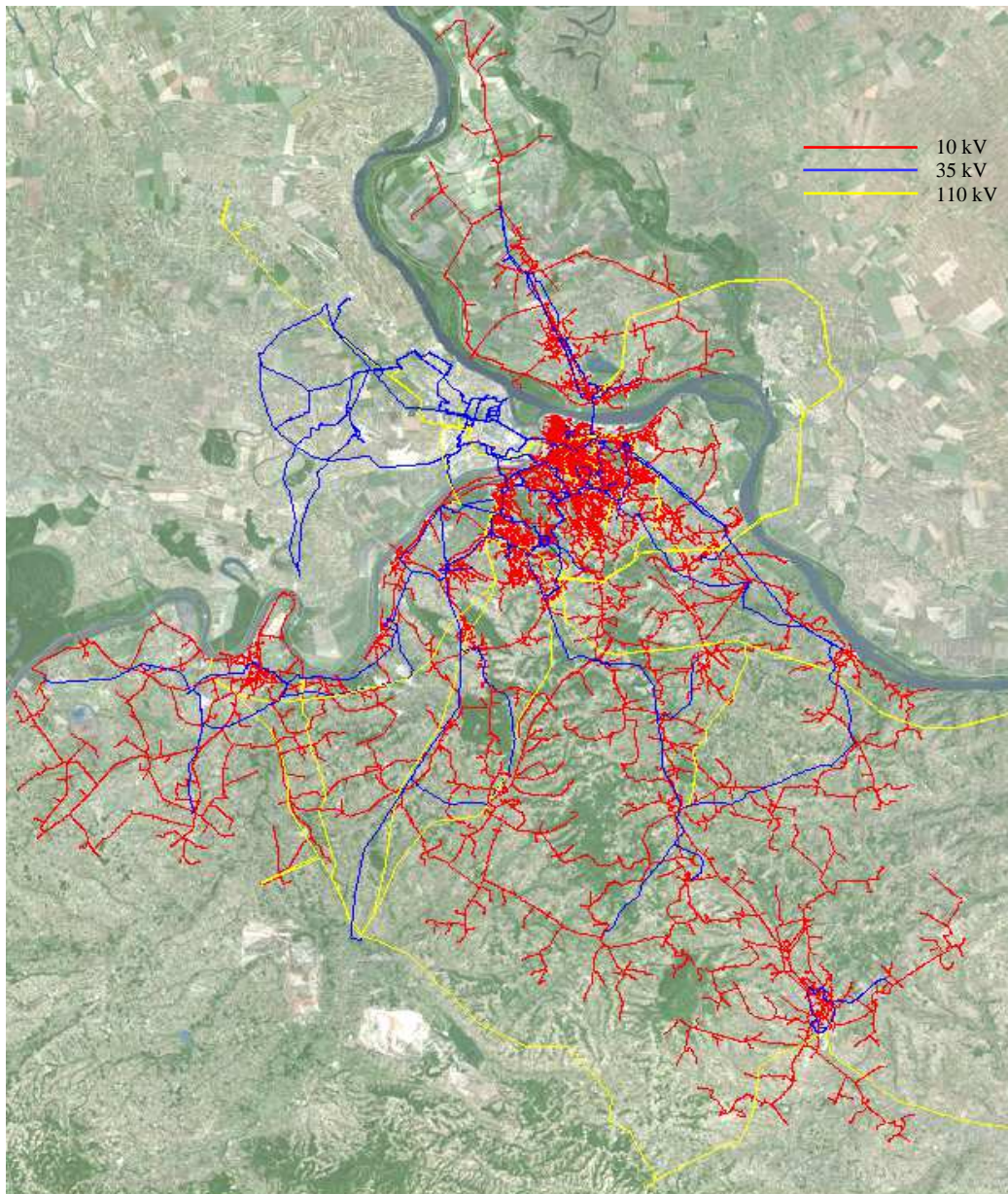
$$\alpha_{\Theta\text{Cu}} = 1/(235.5 + \Theta) \quad (2)$$

$$\alpha_{\Theta\text{Al}} = 1/(228 + \Theta) \quad (3)$$

Zavisnost temperaturnih koeficijenata iz prethodne dve formule je pri analizama zanemarena, odnosno korišćene su vrednosti koje se imaju pri temperaturi od 20°C (za bakar 0,00391 1/°C i za aluminijum 0,00403 1/°C), jer je utvrđeno da se na taj način čini zanemarljiva greška.

Za analize je korišćen model distributivne mreže Beograda jer pruža mogućnost ocene razmatranih uticaja. Konceptija mreže 10 kV u gradskoj zoni sa velikim brojem kablova koji su položeni u istom rovu, pogodna je za analizu uticaja paralelnog vođenja. Zastupljena je i razgranata nadzemna mreža gde se može lako uočiti uticaj temperature ambijenta na podužnu otpornost provodnika.

Topologija posmatrane mreže je prikazana kao SLIKA 1.



SLIKA 1 – Topologija mreže ED Beograd sa odgovarajućim delom mreže 110 kV

S obzirom da je kablovska mreža 35 kV daleko kraća nego mreža 10 kV, uticaj paralelnog vođenja kablova je uzet u obzir samo za mrežu 10 kV. Za sve modelovane kablove je sprovedena kratka analiza kako bi se valorizovao uticaj ovog fenomena na promenu podužne električne otpornosti provodnika, pa samim tim i na tehničke gubitke u mreži.

Na osnovu sačinilaca promene dozvoljenog strujnog opterećenja kablovskog voda u zavisnosti od broja kablova položenih u rovu (1), procenjeni su koeficijenti kojima se reprezentuje direktan uticaj broja kablova u rovu na povećanje podužne električne otpornosti provodnika. Na osnovu podataka iz formiranog modela proračunati su ekvivalentni korektivni koeficijenti za svaki od tri tipa kablova koji se najčešće pojavljuju u mreži.

Shodno procenjenim koeficijentima izvršena je korekcija podužne električne otpornosti ovih kablova u modelu. Proračun ekvivalentnih koeficijenata kojima je izvršena korekcija se može opisati relacijom:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^N L_i k_i}{\sum_{i=1}^N L_i} \quad (4)$$

gde su:

L_i – stvarna dužina i -tog kabla,

k_i – vrednost korekcionog koeficijenta i -tog kabla,

N – broj kablova posmatranog tipa u mreži.

Na osnovu navedene jednačine za odgovarajuće koeficijente su dobijene sledeće vrednosti:

- 1.031 za NPO 13–A 3x150 10 kV,
- 1.033 za IPO 13 3x95 10 kV i
- 1.031 za IPO 13–A 3x150 10 kV.

U skladu sa izloženom metodologijom formirano je ukupno šest različitih modela (za svako stanje po tri).

Kao mera uticaja načina uvažavanja temperature ambijenta posmatrana je promena gubitaka po elementima mreže i po naponskim nivoima, pri čemu uticaj temperature ambijenta na promenu otpornosti namotaja transformatora nije uvažen. Takođe, nije uvažena ni zavisnost aktivne i reaktivne snage od promene napona. Reč je o modelovanim opterećenjima na nivou 10 kV (sabirnice 10 kV odgovarajućih TS 10/0.4 kV).

Uklopno stanje u svakom modelu je rekonstruisano na osnovu raspoloživih podatka o stanju koje se imalo na terenu za posmatrane trenutke.

Svi proračuni su vršeni u programskom paketu CLF–OPF (softver koji se u EI Nikola Tesla koristi dugi niz godina za proračune tokova snaga i potrebe planiranja razvoja i eksploatacije elektroenergetskih mreža).

Za nadzemne vodove je za svaki posmatrani slučaj usvojena vrednost u skladu sa pogonskim uslovima. Detaljna objašnjenja konkretnih izbora su data u tekstu koji sledi.

Trenutak letnjeg maksimuma – nadzemni vodovi

Letnje maksimalno opterećenje mreže ED Beograd 2014. godine se imalo 11. juna u 14:30 h.

Model I: U stručnoj literaturi koja se bavi ovom problematikom (2), često se za proračune za sezonske temperature ambijenta koriste vrednosti oko 40°C za letnji period. Iz tog razloga, kao i uvažavanja uticaja strujnog opterećenja provodnika, za analize čiji su rezultati prikazani u ovom radu usvojena je vrednost 45°C.

Model II: Srednja dnevna temperatura, koja se imala toga dana, je iznosila oko 27°C (3). Merenja su vršena u specifičnim uslovima pa je smatrano da su nadzemni vodovi, zbog celodnevne izloženosti suncu, u trenutku letnjeg maksimalnog opterećenja bili izloženi znatno višoj temperaturi. Iz tog razloga je, pri proračunu parametara nadzemnih vodova bez obzira na tip, usvojena temperatura provodnika 70°C. Treba napomenuti da je srednja dnevna temperatura koja se imala 11. juna okarakterisana kao "ekstremno toplo" prema kvalifikaciji vremenskih uslova iz (3). Usvajanjem navedene temperature provodnika, nije uzet u obzir samo uticaj temperature ambijenta u okolini provodnika, već i njegovo zagrevanje usled opterećenja.

Model III: Ovaj model predstavlja nadograđeni Model II u smislu uvažavanja paralelnog vođenja tri najučestalija tipa 10 kV kablova (IPO13 3x95, IPO13–A 3x150 i NPO13–A 3x150). Uvažen je uticaj svih kablova u rovu, nezavisno od tipa, pri čemu su korekcionni koeficijenti korišćeni samo za ova tri tipa kabla.

Prvi model se najčešće koristi kada se sagledavaju uticaji sezonskih efekata na pogonske uslove mreže. Drugi i treći model na adekvatan način obuhvataju uticaje i specifičnosti koje se imaju u određenom trenutku.

Trenutak zimskog maksimuma – nadzemni vodovi

Zimsko maksimalno opterećenje mreže ED Beograd 2014. godine se imalo 31. decembra u 17:30 h.

Model I: Slično letnjem maksimumu, za zimski maksimum u stručnoj literaturi (2), u proračunima za sezonske temperature ambijenta usvajaju se vrednosti oko 0°C.

Model II: Srednja dnevna temperatura, koja se imala u trenutku zimskog maksimalnog opterećenja, iznosila je oko -9°C (4). S obzirom da je reč o srednjoj vrednosti, vrlo je verovatno da se u posmatranom trenutku imala i niža temperatura ambijenta. Kako je bila moguća i pojava vetra na području Beograda, specifična električna otpornost provodnika nadzemnih vodova je, za potrebe modelovanja zimskog maksimalnog opterećenja, proračunata upravo za ovu temperaturu od oko -9°C . Dodatno zagrevanje provodnika usled opterećenja je kompenzovano pretpostavkom pojave vetra.

Srednja dnevna temperatura vazduha u Beogradu koja se imala 31. decembra 2014. godine okarakterisana je kao "ekstremno hladno" prema kvalifikaciji vremenskih uslova iz (4).

Model III: Uvažavanje paralelnog vođenja kablova za zimski maksimum izvršeno je na isti način kao za letnji maksimum, odnosno korišćeni su isti koeficijenti.

Trenutak zimskog i letnjeg maksimuma – kablovski vodovi

Uticao temperature ambijenta je za kablove, za sva modelovana stanja mreže, uvažavanjem temperatura koje su date u (1). Odnosno, za stanje letnjeg maksimalnog opterećenja 20°C i za stanje zimskog maksimalnog opterećenja 5°C .

POREĐENJE MODELA KROZ PROMENU GUBITAKA AKTIVNE SNAGE

S obzirom da nivo opterećenja elemenata mreže ima dominantan uticaj na nivo ukupnih gubitaka u mreži, najveća promena u proračunu gubitaka sa uvažavanjem uticaja temperature vazduha i paralelnog vođenja za kablove se ima pri maksimalnim opterećenjima. U trenutku letnjeg maksimuma pri opterećenjima koja su bila oko 60% zimskog maksimalnog opterećenja ima se značajno povećanje gubitaka u nadzemnim vodovima kao posledica visokih temperatura vazduha.

Zimski maksimum, koji ujedno predstavlja vršno opterećenje mreže na godišnjem nivou, je interesantan iz razloga što je je uticaj paralelnog vođenja izraženiji u odnosu na letnji maksimum.

U TABELI 1, su navedene dužine vodova po tipu i naponskom nivou, kao i procenutalno učeše svakog od njih u ukupnoj dužini mreže 10 kV i 35 kV.

TABELA 1 – Udeo pojedinih tipova vodova po naponskim nivoima u strukturi analiziranih modela

Tip voda	10 kV (km)	35 kV (km)	Ukupno po tipu voda (km)	Procenat u odnosu na ukupnu dužinu mreže	
				10 kV	35 kV
Nadzemni (km)	1307.73	527.16	1834.88	29%	12%
Kablovi (km)	2107.98	474.93	2582.91	48%	11%
Ukupno po naponskim nivoima (km)	3415.71	1002.08	4417.79	77%	23%

Mreža 35 kV je kraća oko 3,3 puta od mreže 10 kV. Kablovska mreža 10 kV je oko 1,6 puta duža od nadzemne mreže istog naponskog nivoa, dok je u slučaju mreže 35 kV taj odnos oko 0,9. Navedeni podaci se odnose na instalirane kapacitete, odnosno nisu svi navedeni vodovi bili u pogonu u svim modelima. Uklopno stanje je bilo takvo da je broj isključenih vodova u toku letnjeg maksimuma bio neznatno veći.

Rezultati analiza za trenutak letnjeg maksimuma

Nakon proračuna tokova snaga i naponskih prilika dobijeni su zbirni gubici po elementima mreže za svaki posmatrani model – TABELA 2. Poređenje modela je izvršeno na osnovu procentualnih promena gubitaka u Modelu II i Modelu III u odnosu na Model I. Efekat uvažavanja uslova u posmatranom trenutku, odnosno uvažavanja značajno više temperature vazduha u trenutku letnjeg maksimuma u Modelu II, su značajno veći gubici u mreži oba naponska nivoa. Promena gubitaka u vodovima 35 kV je veća nego u vodovima 10 kV, jer je odnos dužina nadzemne i kablovske mreže 35 kV oko 0,9 (TABELA 1).

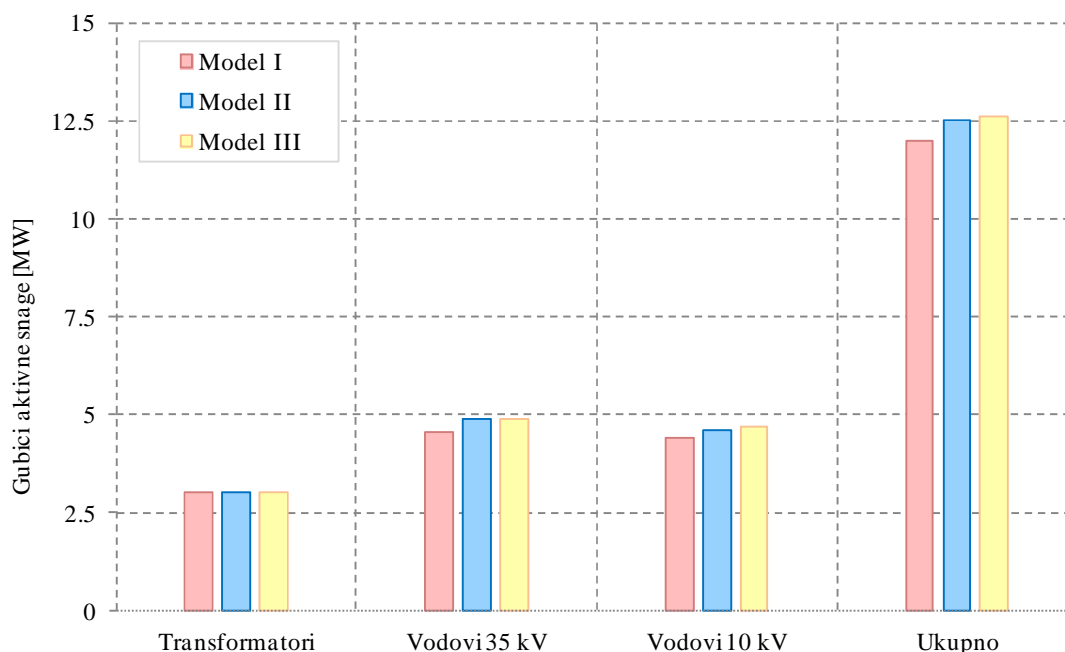
TABELA 2 – Gubici po elementima mreže za modele letnjeg maksimuma

Element mreže	Letnji maksimum [MW]			Procentualna promena u odnosu na Model I		
	Model I	Model II	Model III	Model I	Model II	Model III
Transformatori	3.03	3.032	3.033	0%	0.07%	0.10%
Vodovi 35 kV	4.552	4.872	4.878	0%	7.03%	7.16%
Vodovi 10 kV	4.402	4.625	4.681	0%	5.07%	6.34%
Ukupno	11.984	12.529	12.592	0%	4.55%	5.07%

Za uvažavanje uticaja paralelnog vođenja kablova merodavna je promena proračunatih gubitaka na vodovima 10 kV kada se uporede Model III i Model II. U oba modela je uvažena temperatura ambijenta za posmatrani trenutak, a samo u Modelu III paralelno vođenje kablova 10 kV. Promena gubitaka na vodovima 10 kV u Modelu III je takva da se ima veća vrednost gubitaka za oko 1,2% u odnosu na vrednost koja se ima u Modelu II (TABELA 2).

Neznatno povećana vrednost gubitaka u mreži 35 kV i na transformatorima u Modelu III u odnosu na Model II je iz razloga što se u Modelu III imaju veći gubici u mreži 10 kV, odnosno opterećenje svih elemenata mreže je u tom slučaju neznatno veće.

Na SLICI 2 su grafički prikazani gubici po elementima mreže i po naponskim nivoima za trenutak letnjeg maksimalnog opterećenja.



SLIKA 2 – Gubici po elementima mreže u posmatranim slučajevima u trenutku letnjeg maksimalnog opterećenja

Sa grafičkog prikaza (SLIKA 2) se zaključuje da ukoliko se pri modelovanju odgovarajućih stanja u mreži uvažavaju uticaji pogonskih uslova na povećanje podužne otpornosti vodova, proračun gubitaka se menja i do 5% u odnosu na situaciju kada se mreža modeluje sa vrednostima preporučenim iz literature. U slučaju mreže ED Beograd ova promena izražena u snazi iznosi 608 kW, odnosno novčano izraženo iznosi oko 66 880 € (računato sa cenom gubitaka od oko 110 €/kW).

Iz svega navedenog sledi da se za precizne proračune tokova snaga i naponskih prilika za jedan određeni trenutak moraju uzeti u obzir i trenutni pogonski uslovi mreže.

Rezultati analiza za trenutak zimskog maksimuma

Zbirni gubici po elementima mreže za trenutak zimskog maksimalnog opterećenja su dati u TABELI 3. Procentualna promena proračunatih gubitaka je dobijena na isti način kao i u slučaju letnjeg maksimuma. Najnepovoljniji slučaj sa aspekta gubitaka, što se može videti u pomenutoj tabeli je Model I, kada su podužne otpornosti računane prema predloženim temperaturama iz literature za odgovarajuću sezonu. Najveća greška u

proračunu gubitaka sa zanemarenjem trenutnih temperatura vazduha se čini za vodove 35 kV – gubici u Modelu II su za oko 3,4% niži u odnosu na Model I. Negativan predznak je posledica značajno niže temperature u posmatranom trenutku od prosečnih sezonskih vrednosti.

Udeo kablova u ukupnoj dužini mreže 10 kV je značajno veći, tako da je zbog veće temperaturne inercije kablova procentualna promena proračunatih gubitaka manja u odnosu na mrežu 35 kV.

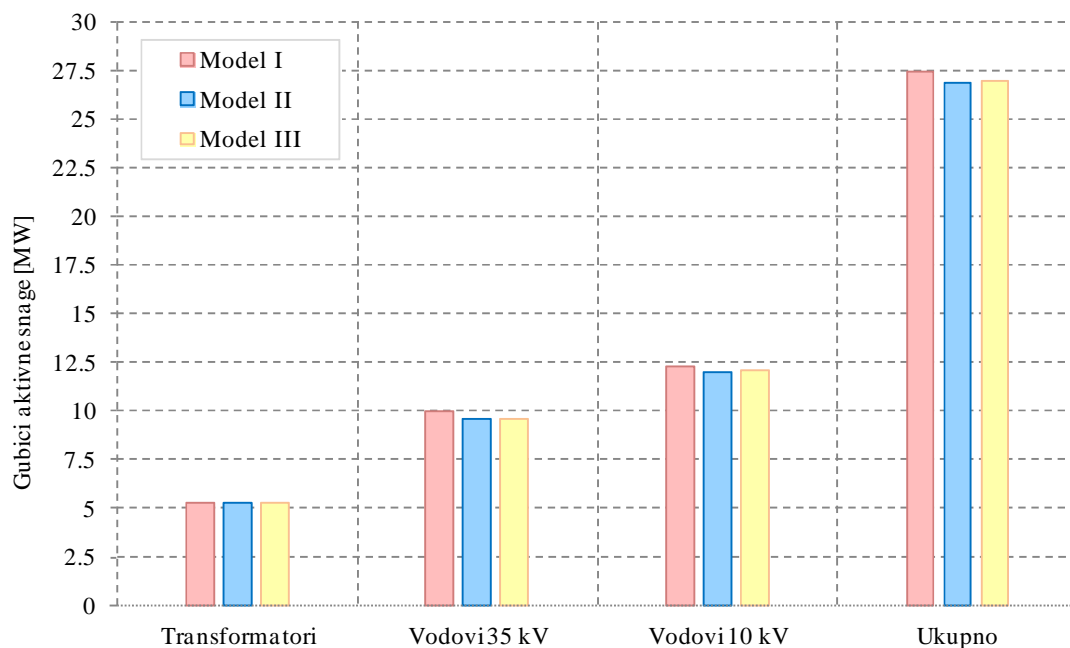
Greška u proračunu se u nekoj meri kompenzuje uvažavanjem efekta paralelnog vođenja u kablovskoj mreži 10 kV, što se vidi kroz povećanje gubitaka u Modelu III u odnosu na Model II za oko 1,3% i na taj način se približava vrednostima dobijenim sa sezonskim temperaturama (Model I).

TABELA 3 – Gubici po elementima mreže za modele zimskog maksimuma

Element mreže	Zimski maksimum [MW]			Procentualna promena u odnosu na Model I		
	Model I	Model II	Model III	Model I	Model II	Model III
Transformatori	5.267	5.257	5.258	0%	-0.19%	-0.17%
Vodovi 35 kV	9.956	9.62	9.624	0%	-3.37%	-3.33%
Vodovi 10 kV	12.24	11.96	12.117	0%	-2.29%	-1.00%
Ukupno	27.463	26.837	26.999	0%	-2.28%	-1.69%

Grafički prikazani rezultata dat je na SLICI 3.

Proračunati gubici u mreži 35 kV (Model III i Model II) i na transformatorima (sva tri modela) se relativno malo menjaju, i te promene su posledica promene gubitaka u mreži 10 kV, odnosno opterećenje svih elemenata mreže u tim slučajevima se neznatno razlikuje.



SLIKA 3 – Gubici po elementima mreže u posmatranim slučajevima u trenutku zimskog maksimalnog opterećenja

U slučaju zimskog maksimuma greška koja se čini zanemarenjem trenutnih pogonskih uslova izražena u snazi iznosi 464 kW, što novčano izraženo iznosi 51 040 €.

ZAKLJUČAK

Modelovanje stanja distributivnih mreža za konkretne trenutke zahteva širok spektar ulaznih podaka koji bliže opisuju posmatrani trenutak. Analize su pokazale da pored opterećenja mreže značajnu ulogu imaju podaci o ambijentalnim uslovima i njihovom uticaju na parametre elemenata mreže. Uvažavanjem temperature vazduha u posmatranim trenucima, kao i paralelnog vođenja kablova, značajno se smanjuje greška koja se pravi pri proračunima tokova snaga i naponskih prilika, a samim tim i gubitaka snage u modelu.

Koncepcija mreže i nivo opterećenja elemenata mreže takođe imaju veliki uticaj na tačnost rezultata proračuna, tako da je preporuka da se pri modelovanju razmatraju svi raspoloživi podaci koji mogu imati uticaja na modelovano pogonsko stanje mreže.

Slično promeni otpornosti provodnika vodova sa temperaturom, se menja i otpornost namotaja transformatora, što bi moglo biti predmet daljeg istraživanja. Na taj način bi se povećao kvalitet analiza sprovedenih na sličnim modelima na još viši nivo.

LITERATURA

1. Podzemni kablovski vodovi 10 kV – Kablovi i kablovski pribor (S.B1.2.210/00), Službeni glasnik ED Beograd – Interni standardi ED Beograd, u primeni od 2002. godine.
2. N. Petrović, N. Čukalevski, S. Krstonijević, „Matematički modeli u standardima za proračun trajno i kratkotrajno dozvoljenih struja provodnika nadzemnih vodova“, Elektroprivreda, br.3, 2009. godina, str. 43–51, ISSN 0013–5755
3. Sezonski bilten za Srbiju – Leto 2014. godine, Republički hidrometereološki zavod Srbije, <http://www.hidmet.gov.rs>, Beograd, 2014.
4. Sezonski bilten za Srbiju – Zima 2014/2015. godine, Republički hidrometereološki zavod Srbije – <http://www.hidmet.gov.rs>, Beograd, 2015.