

Napoved prenosnih izgub v elektroenergetskem sistemu na podlagi vplivnih distribucijskih faktorjev

Jurij Klančnik¹, Matej Rejc², Miloš Pantos²

¹ Elektro Slovenija d.o.o., Hajdrihova 2, SI – 1000 Ljubljana, Slovenija

² Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška 25, SI – 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: jurij.klancnik@eles.si, matej.rejc@fe.uni-lj.si, milos.pantos@fe.uni-lj.si

Povzetek. V prvem delu članka smo predstavili meritve izgub v prenosnem omrežju Slovenije po posameznih napetostnih nivojih in transformatorjih, ki so bile dosežene v letu 2005. Opisali in predstavili smo glavne dejavnike, ki vplivajo na izgube v prenosnem omrežju Slovenije ter prikazali njihovo odvisnost. V nadaljevanju dela smo predstavili novi metodi za napovedovanje izgub, ki pri izračunih upoštevata vse glavne vplivne dejavnike in temeljita na vplivnih distribucijskih faktorjih PTDF, in sicer posredna in neposredna metoda za napoved izgub. Rezultati kažejo, da metodi omogočata hitrejši izračun, dodatne napake, ki jih v izračun vnašajo faktorji PTDF, pa so zanemarljive. Odlikujeta se po veliki hitrosti, natančnosti in učinkovitosti. Od predlaganih metod se je neposredna metoda z dvema izhodiščnima scenarijema izkazala za najboljšo, saj so odstopanja napovedanih izgub v primerjavi z dejanskimi izgubami najmanjša. Odstopanja napovedanih izgub v primerjavi z dejanskimi izgubami se pri neposredni metodi, ki uporablja več referenčnih točk, še dodatno zmanjšajo.

Ključne besede: elektroenergetski sistem, izračun pretokov moči, kazalec PTDF, napoved, prenosne izgube, vplivni dejavniki.

Transmission Loss Forecast in the Power System Based on Impacting Power Transfer Distribution Factors

Extended abstract. The paper presents an overview of the Slovenian transmission system losses over various voltage levels and transformers measured in 2005 and the main impact factors impacting the transmission system losses, and proposes two new methods for transmission system loss forecasting. The methods, which are based on power transfer distribution factors (PTDF), take into account the impacting factors that contribute to the transmission system losses.

The main factors importantly affecting the transmission system losses are described in detail: the system load, network topology and power transit. These factors are taken into account in the proposed methods for transmission loss forecasting, in which the PTDFs are introduced, too. The methods are of the direct and indirect loss-forecast type. Using the PTDF approach, the impact of the injected power changes on the system transmission power flows can be determined from the PTDFs. The PTDF-based methods require at least one power-flow simulation, using the classic power-flow methods, such as the Newton Raphson are to define the base-power flows. By using the PTDFs and the base-power flows, the forecast method determines losses for different system states for the following day. To improve the accuracy of the methods, more than one power-flow simulation can be used to define different base power flows. The paper compares the accuracy of using different base-power flows in the transmission system loss forecast.

The results given in Figs. 5–7 show that the indirect method with two base-power flows gives the best results, i.e. the deviation from the actual losses is minimal. By using two base-power flows, the accuracy of the method is significantly improved. By using through the method currently employed by

the Transmission System Operator does not give significantly worse results than the presented methods, it is slower and requires a greater amount of the user input.

The more accurate methods, such as the Newton Raphson method, are computationally more demanding and time consuming and thus inconvenient for an extensive analysis in the very short available period of time. To seem up, the PTDF-based methods are many much interesting for being computationally effective, interesting, for being accurate and reliable.

Keywords: Forecast, impact factors, power flow, power system, PTDF, transmission losses.

1 Uvod

Sistemski operater prenosnega omrežja (SOP) je po Energetskem zakonu z izvajanjem sistemskih storitev zadolžen za nakup energije za pokrivanje izgub v slovenskem elektroenergetskem sistemu (EES). V ta namen SOP za prihajajoče leto oceni potrebno moč in energijo ter izvede letno dražbo za nakup energije za pokrivanje izgub v visokonapetostnem (VN) omrežju, tako za pasovno kot za trapezno energijo za točno določeno časovno obdobje. Nakup energije za pokrivanje izgub na letni ravni ne zadostuje vsem potrebam za njihovo kritje na dnevni ravni, zato SOP na podlagi napovedi še dodatno kupuje energijo za kritje izgub na dnevnem trgu. Kljub dodatnim nakupom na dnevnem trgu lahko zaradi nepredvidljivosti trga,

spremenljivosti obratovanja EES ter drugih dejavnikov nastanejo velika odstopanja med dejanskimi izgubami in kupljeno energijo za pokritje izgub. Ta odstopanja vplivajo na odstopanja EES od vozniških redov, ki jih SOPO pokriva v okviru sekundarne regulacije, kar privede do dodatnih stroškov SOPO. Da SOPO zagotovi minimalne stroške, sta izjemno pomembna kakovostna in natančna napoved izgub.

Delo je pregled izgub na slovenskem prenosnem omrežju in predlaga novi metodi za njihovo kratkoročno napovedovanje na podlagi uporabe vplivnih dejavnikov in s pomočjo kazalcev PTDF (angl. Power Transfer Distribution Faktor). Metoda, ki jo trenutno uporablja SOPO, je počasnejša in zahteva več posredovanja uporabnika, zato je smiselna uporaba metode na podlagi faktorjev PTDF, ki je dovolj učinkovita, točna in zanesljiva.

2 Izgube na prenosnem EES Slovenije

Glede na vzroke delimo izgube na tri skupine:

- stalne, ki so posledica stanja pripravljenosti EES (izgube v železu, dielektrične izgube),
- spremenljive, ki so odvisne od obremenitve EES,
- komercialne izgube kot posledica napak pri merjenju, netočnosti merilnih naprav, neregistrirane porabe in drugih nepredvidljivih dogodkov pri delovanju EES [1, 2, 3].

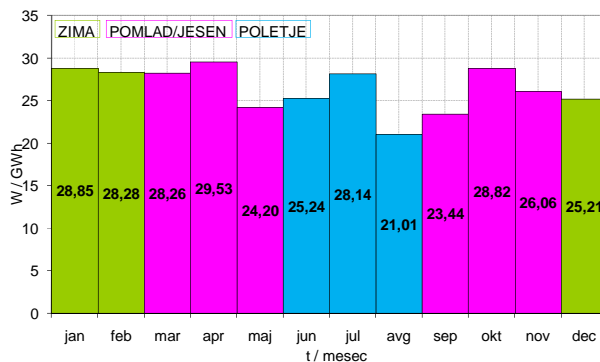
Velikost izgub je zelo odvisna od naslednjih dejavnikov:

- obremenitve EES,
- topologije omrežja in
- prehodov moči prek slovenskega omrežja.

Prenosne izgube na EES Slovenije se določajo na podlagi njihovih meritev na merilnih točkah vodov in na drugi strani interkonekcijskih vodov. Če želimo upoštevati tudi izgube na interkonekcijskih povezavah in tako prikazati dejanske izgube EES, potem moramo uporabiti tudi meritve uradnih merilnih točk (angl. accounting points), ki so v celotnem interkonekcijskem omrežju definirane na ravni združenja UCTE. Na slovensko–hrvaški meji so uradne merilne točke na slovenski strani interkonekcijskih povezav, medtem ko so na mejah z Avstrijo in Italijo uradne merilne točke na italijanski in avstrijski strani.

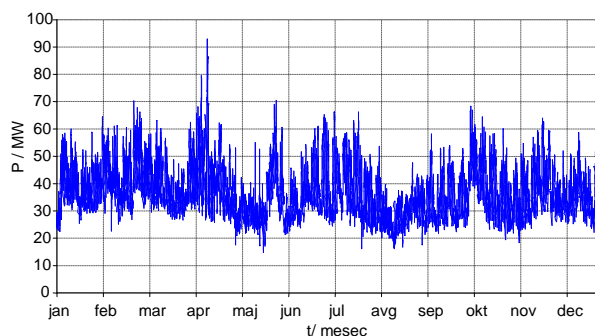
Slika 1 prikazuje izgube na VN–omrežju v GWh po posameznih mesecih za leto 2005, v katerem so izgube znašale 317 GWh. V zimskem obdobju dosežejo izgube največje vrednosti, v poletnem so najmanjše, povprečne vrednosti pa so v obdobju pomlad/jesen.

Meritve izgub na VN–omrežju zajemajo podatke tako o proizvodnji in porabi, kot tudi o topologiji naprav in stikal ter prehodov moči prek slovenskega omrežja.



Slika 1: Prenosne izgube (energija) na VN EES Slovenije v letu 2005

Figure 1. Transmission losses (energy) in the Slovenian HV power system in 2005



Slika 2: Izgube (moč) na VN omrežju Slovenije v letu 2005

Figure 2. Transmission losses (power) in the Slovenian transmission network in 2005

Slika 2 kaže potek merjenih izgub v letu 2005, pri čemer je časovni interval zajemanja meritev znašal 15 min. Izgube le redko presežejo 60 MW, maksimalne vrednosti dosežejo v zimskih mesecih, medtem ko minimalne vrednosti zasledimo v poletnem času. Pomlad in jesen sta zmerni obdobja s povprečnimi izgubami.

Pri analizi izgub je zanimiv podatek o njihovem deležu na vodih in transformatorjih. Tabela 1 prikazuje deleže izgub energije na letni ravni glede na napetostne nivoje, vode in transformatorje. Največji delež izgub energije je na 110 kV nivoju (32,76 %), sledijo izgube energije na 400 kV vodih (28,82 %), in izgube energije na 220 kV vodih (22,1 %). Najmanjši delež izgub energije je na transformatorjih (16,32 %).

Tabela 1. Deleži izgub energije po napetostnih nivojih in TR
Table 1. Percentage of energy losses on transformers and various voltage levels

Leto 2005	Delež izgub [%]	Delež izgub [GWh/leto]
110 kV	32,76	103,85
220 kV	22,10	70,06
400 kV	28,82	91,36
TR	16,32	51,73
Skupaj	100	317,0

Izgube energije v EES Slovenije niso zanemarljive saj dosežejo vrednosti od 2 do 2,5 odstotka celotnega odjema Slovenije, zato je bistvenega pomena predvsem njihova natančna napoved, ki se odraža v minimalnih stroških SOPO.

3 Vplivni dejavniki na napoved izgub v prenosnem omrežju

Na napoved izgub vplivajo številni dejavniki, med katerimi je zaradi nelinearnosti sistema težko poiskati soodvisnosti. Izmed množice dejavnikov, ki vplivajo na velikost izgub v VN omrežju, bomo v nadaljevanju predstavili le tiste, ki imajo največji vpliv.

3.1 Vpliv obremenitve sistema

Obremenitev sistema se vsak trenutek spreminja, s tem se spreminjajo (večajo/manjšajo) tudi izgube v elektroenergetskem omrežju (EEO), in sicer s kvadratom toka in kvadratom faktorja moči ($\cos \varphi$). Obremenitev sistema in s tem povezane izgube so najbolj odvisne od naslednjih dejavnikov:

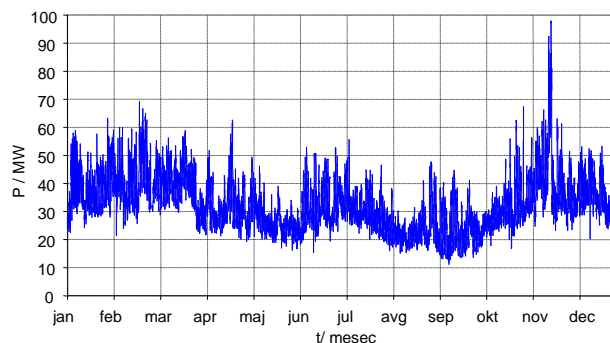
- letni čas, temperatura in dolžina dneva (zima, pomlad/jesen in poletje);
- del dneva zaradi navad ljudi in osvetljenosti (dan, noč, delavnik, sobota, nedelja ali praznik);
- cena električne energije;
- razpoložljivost energije po sistemih (presežki in primanjkljaji);
- predvideni remonts in izpadi elementov.

Obstajajo tudi drugi dejavniki, ki vplivajo na obremenitev in s tem na izgube, vendar v tem poglavju navajamo le tiste, ki na same izgube najbolj vplivajo in jih v nadaljevanju upoštevamo tudi v našem modelu.

3.2 Vpliv konfiguracije omrežja

Velik vpliv na izgube ima tudi konfiguracija omrežja. V prenosnem sistemu lahko izklop posameznega elementa bistveno vpliva na nastanek izgub, saj se s posameznim izklopom porazdelijo pretoki moči po omrežju.

Slika 3 prikazuje potek izgub moči na VN–omrežju v letu 2004 ter njihovo nenadno povečanje na 100 MW v novembru, ki je nastalo ob izklopu daljnovoda 400 kV Divača–Melina.



Slika 3: Potek izgub moči na VN–omrežju Slovenije v letu 2004

Figure 3. Graph of power losses in the Slovenian transmission network in 2004

3.3 Vpliv prehodov moči

Poleg obremenitve in konfiguracije omrežja vplivajo na izgube VN omrežja tudi prehodi moči, ki so posledica prenašanja moči med sosednjimi prenosnimi sistemi. Znano je, da po slovenskem EES ne tečejo le pretoki moči, ki so posledica sklenjenih čezmejnih poslov na trgu z električno energijo–znaten del pretokov so tudi vzporedni pretoki moči, katerih ponor je v italijanskem EES. Krožni pretoki se erno spreminjajo in nastanejo zaradi delne preusmeritve pretokov moči iz smeri:

- Francija–Italija,
- Švica–Italija in
- Slovenija–Italija.

Vzporedni pretoki nastajajo skladno z voznimi redi Francije, Nemčije, Švice in Slovenije. Obstaja medsebojna zveza med voznimi redi držav, ki mejijo na Italijo. Tako se povečani pretoki odražajo pri spremembi voznih redov Francije in Nemčije, kjer se vozni redi nepredvidljivo spreminjajo predvsem zaradi vetrne energije. V zadnjem času se povečuje število vetrnih elektrarn, kar vpliva tudi na prenosni sistem. Nepredvidljiva proizvodnja iz vetrnih elektrarn vpliva na pretoke in posledično tudi na izgube v EES Slovenije. Gradnja vetrnih elektrarn in s tem spremenjena struktura proizvodnje električne energije je najbolj prisotna v Nemčiji, kar vpliva tudi na razmere v našem VN–omrežju. Vetrovno ugodne vremenske razmere, ki se odražajo v povečani proizvodnji električne energije v Nemčiji in zmanjšani proizvodnji v Franciji in Švici, povzročijo povečanje pretoka prek EES Slovenije in skladno s tem tudi povečanje izgub.

Poleg vetrne energije na povečane pretoke in samo smer dodatnih pretokov moči prek EES Slovenije vplivajo tudi spremembe hidroloških razmer v Avstriji in na Balkanu ter cena električne energije na dnevnem trgu.

4 Model za napoved prenosnih izgub

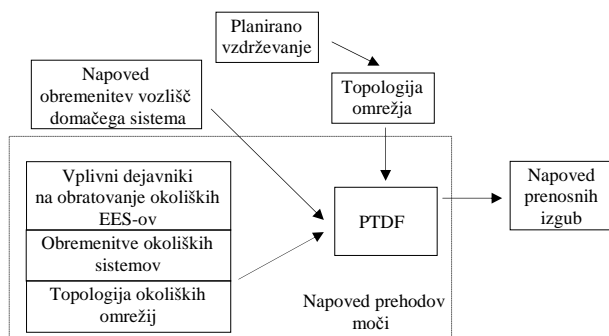
Model za napovedovanje prenosnih izgub v EES upošteva vplivne dejavnike, ki jih predstavlja poglavje 3. Model vsebuje tri module:

- napoved obremenitev vozlišč domačega omrežja,
- topologija omrežja glede na planirano vzdrževanje,
- napoved prehodov moči:
 - določitev vplivnih dejavnikov,
 - predvidena obremenitev okoliških sistemov,
 - predvidena topologija okoliških EES.

S pomočjo analize obratovanja okoliških sistemov je mogoče poiskati najpomembnejše dejavnike, ki vplivajo na prehode moči prek domačega omrežja in posledično na izgube. Ta modul je najzahtevnejša naloga, saj obremenitve tujih vozlišč niso poznane in jih je treba oceniti s pomočjo izbranih dejavnikov. Prav tako je treba upoštevati predvidena vzdrževalna dela v tujih sistemih, ki vplivajo na topologijo omrežij in s tem na razporeditev pretokov moči.

Poleg teh parametrov so vhodne spremenljivke tudi obremenitve vozlišč domačega omrežja. Opozoriti velja, da točnost napovedi obremenitev vozlišč močno vpliva na napoved prenosnih izgub, zato je ta naloga dodaten raziskovalni izziv.

Poleg omenjenih vhodnih podatkov velja omeniti še topologijo omrežja kot pomemben dejavnik, ki vpliva na točnost napovedi, ker se obremenitev razporeja različno glede na topologijo po Kirchhoffovem zakonu. Ta parameter zahteva oblikovanje in izračun novih vplivnih distribucijskih faktorjev PTDF ob vsaki spremembi topologije, saj se s spremembo spremenijo tudi soodvisnosti vhodnih spremenljivk in njihovih vplivov na prenosne izgube. Ker so planirana vzdrževalna dela vnaprej znana, je znana tudi topologija omrežja.



Slika 4: Model za napoved prenosnih izgub
Figure 4. Transmission-loss forecast model

4.1 Vplivni distribucijski faktor PTDF

Kazalci PTDF [4] obravnavajo vpliv določenih prenosov moči na prerezporeditev obremenitve po omrežju. Faktorje PTDF je mogoče uporabiti za

napoved pretokov moči ob znani topologiji omrežja in obnašanju proizvajalcev in odjemalcev v sistemu. Napoved temelji na izračunu pretokov moči izhodiščnega obratovalnega stanja in predpostavki o konstantnih vrednosti faktorjev PTDF.

$$P_{ij} = P_{ij}^{(0)} + \Delta P_{ij}, \quad (1)$$

pri čemer je $P_{ij}^{(0)}$ pretok delovne moči na vodu i-j v izhodiščnem obratovalnem stanju, kjer indeks i in j pomeni vozlišči na obeh koncih voda. ΔP_{ij} predstavlja spremembo pretoka na vodu i-j ob pojavu prehoda moči, P_{ij} pa pomeni novi pretok delovne moči na tem vodu. Tako se pretoki moči določijo na hiter način brez ponovnega, časovno zamudnega, iterativnega izračuna.

Izračun faktorjev PTDF temelji na enačbah statičnega ravnotežja delovnih moči v EES. Pretok moči na vodu i-j, je v splošnem odvisen od vseh napetosti in faznih kotov v posameznih vozliščih, dolžine in karakteristik voda in se zapiše kot:

$$P_{ij} = |\underline{U}_i|^2 \cdot G_{ii} - |\underline{U}_i| \cdot |\underline{U}_j| \cdot [G_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j)], \quad (2)$$

pri čemer je P_{ij} pretok delovne moči med vozliščema i in j, G_{ii} pomeni vsoto prečne in vzdolžne prevodnosti med vozliščema i in j, G_{ij} vzdolžna prevodnost voda med vozliščema i in j, B_{ij} pa vzdolžna susceptanco voda med vozliščema i in j. Amplitudi napetosti i-tega oz. j-tega vozlišča sta $|\underline{U}_i|$ in $|\underline{U}_j|$, kota i-tega in j-tega vozlišča pa δ_i in δ_j .

Enačba spremembe pretoka delovne moči na vodu v odvisnosti od spremembe napetosti in faznega kota z upoštevanjem linearnega člena v Taylorjevi vrsti je enaka izrazu:

$$\Delta P_{ij} = \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta} \cdot \Delta \delta + \frac{\partial P_{ij}}{\partial |\underline{U}|} \cdot \Delta |\underline{U}|, \quad (3)$$

kjer je ΔP_{ij} sprememba pretoka delovne moči na vodu i-j, $\Delta |\underline{U}|$ pomeni vektor sprememb napetosti vozlišč, $\Delta \delta$ pa vektor sprememb kotov vozlišč. Odvoda injiciranih delovnih moči po napetostih in kotih sta vektorja sprememb spremenljivk stanja.

V enačbi (3) je mogoče vektorja sprememb spremenljivk stanja izraziti na podlagi enačbe (4).

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \delta} & \frac{\partial P_i}{\partial |\underline{U}|} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_i}{\partial |\underline{U}|} \end{bmatrix}}_{\mathbf{J}} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |\underline{U}| \end{bmatrix} = \mathbf{J} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |\underline{U}| \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Vektorja sprememb spremenljivk stanja izrazimo kot:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |\underline{U}| \end{bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

kjer \mathbf{J} pomeni Jacobijevo matriko, $\Delta \mathbf{P}$ in $\Delta \mathbf{Q}$ pa spremembo injiciranih moči v posameznih vozliščih v

sistemu. Uporaba enačbe (5) privede do končnih enačb za spremembo delovnih moči na vodu i-j:

$$\Delta P_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial U} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{J}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Enačba (6) je v matrični obliki enaka:

$$\Delta P_{ij} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_g} & \dots & \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_N} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial |U_{g+1}|} & \dots & \frac{\partial P_{ij}}{\partial |U_N|} \end{bmatrix}}_{\text{PTDF}_{ij}} \cdot \mathbf{J}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \dots \\ \Delta P_g \\ \dots \\ \Delta P_N \\ \Delta Q_{g+1} \\ \dots \\ \Delta Q_N \end{bmatrix}. \quad (7)$$

PTDF za pretok moči na vodu i-j je vrstični vektor:

$$\text{PTDF}(P)_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_g} & \dots & \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_N} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial |U_{g+1}|} & \dots & \frac{\partial P_{ij}}{\partial |U_N|} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{J}^{-1}, \quad (8)$$

kjer posamezen element vektorja pomeni odvod pretoka po vodu i-j po kotu in napetosti posameznega vozlišča.

Z določitvijo spremembe obremenitve delovnih moči na posameznih vodih lahko določimo tudi spremembo izgub na vodih [5].

4.2 Metode za napoved prenosnih izgub

V nadaljevanju predstavljamo dve metodi za napoved izgub na VN omrežju, pri čemer velja, da so izgube razlika med pretokom na začetku in koncu voda:

$$\mathbf{P}_{izg} = \left| \mathbf{P}_{ij} + \mathbf{P}_{ji} \right|, \quad (9)$$

pri čemer sta \mathbf{P}_{ij} in \mathbf{P}_{ji} vektorja pretokov delovne moči na obeh koncih vodov.

1) *Neposredna metoda za napoved prenosnih izgub* temelji na uporabi enačbe (1), pri čemer se pretok na obeh koncih voda napove na podlagi matrik PTDF_{ij} in PTDF_{ji} , ki sta rezultat izmeničnega izračuna pretokov moči. Izgube se izračunajo po (10):

$$\mathbf{P}_{izg,PTDF} = \underbrace{\left(\mathbf{P}_{ij}^{(0)} - \text{PTDF}_{ij} \cdot \Delta \mathbf{P} \right)}_{\mathbf{P}_{ij}(PTDF)} + \underbrace{\left(\mathbf{P}_{ji}^{(0)} - \text{PTDF}_{ji} \cdot \Delta \mathbf{P} \right)}_{\mathbf{P}_{ji}(PTDF)} \quad (10)$$

2) *Posredna metoda za napoved prenosnih izgub* temelji na uporabi samo ene matrike PTDF , saj zaradi enosmernega izračuna pretokov moči velja $\text{PTDF}_{ij} = \text{PTDF}_{ji}$. Metoda upošteva izgube v izhodiščnem obratovalnem stanju $\mathbf{P}_{izg}^{(0)}$ izračunane po enačbi (9). Napoved izgub v omrežju poteka po enačbi:

$$\mathbf{P}_{izg,PTDF} = \mathbf{P}_{izg}^{(0)} + \frac{\text{PTDF}_{ij} \cdot \Delta \mathbf{P}}{\mathbf{P}_{ij}^{(0)}} \cdot \mathbf{P}_{izg}^{(0)}. \quad (11)$$

Enosmerni izračun pretokov moči velja za hitrejšega, a manj natančnega, kar obravnava poglavje v nadaljevanju.

5 Rezultati

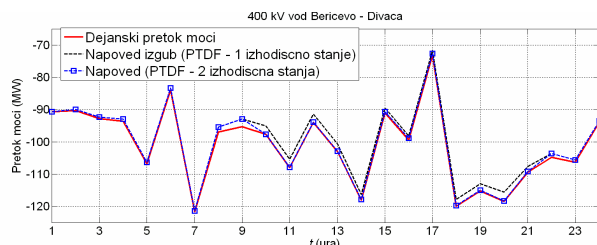
5.1 Napoved izgub

Model za napoved prenosnih izgub upošteva 400 kV, 220 kV in 110 kV EES Slovenije ter nekaj prvih vozlišč sosednjih sistemov. Delovanje modela za napoved izgub smo preizkusili na 24 obratovalnih stanjih z dne 15.01.2003, pri čemer smo privzeli konstantno topologijo, spreminjajo pa se injicirane moči po vozliščih. Predlagani metodi temeljita na izbiri izhodiščnega obratovalnega stanja, zato smo izbrali dva scenarija:

- z enim izhodiščnim obratovalnim stanje (ob 1.00 uri) kot referenčno stanje s $\mathbf{P}_{ij}^{(0)}$ za celoten čas opazovanja,
- s prvim izhodiščnim obratovalnim stanjem (ob 1.00 uri) za čas 1.00 do 12.00 ure in drugim stanjem (ob 13.00 uri) za čas od 13.00 do 23.00 ure.

Pričakujemo, da vmesna prilagoditev izhodiščnega obratovalnega stanja zagotavlja boljše rezultate, kar morajo potrditi analize v nadaljevanju.

Slika 5 prikazuje primerjavo med izmerjenimi in z modeli izračunanimi napovedi pretokov moči po (1) za 400 kV vod Beričevo–Divča. Zaradi linearne aproksimacije enačb pretokov moči prihaja do večjih odstopanj pri večjih odstopanjih od izhodiščnega obratovalnega stanja. Torej je točnost metode odvisna od »oddaljenosti« trenutnega obratovalnega stanja od izhodiščnega. To je bil razlog za oblikovanje dveh scenarijev, omenjenih zgoraj. Velja, da do večjih odstopanj med dejanskimi in napovedanimi pretoki moči ne prihaja, kar velja tudi za druge vode. V nadaljevanju je torej smiselno napovedati izgube po predlaganih metodah.



Slika 5: Primerjava dejanskih pretokov moči z napovedanimi

Figure 5. Comparison of power-flow results

Slika 6 prikazuje medsebojno primerjavo metod:

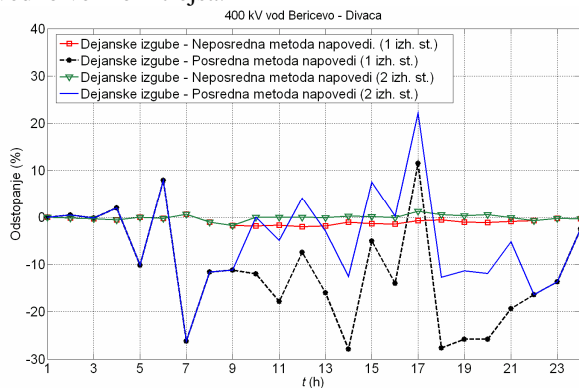
- polna črta s trikotniki velja za primerjavo med dejanskimi in napovedanimi izgubami prek neposredne metode z enim izhodiščnim stanjem;
- polna črta s kvadrati velja za primerjavo med dejanskimi in napovedanimi izgubami prek

neposredne metode z dvema izhodiščnima stanjema;

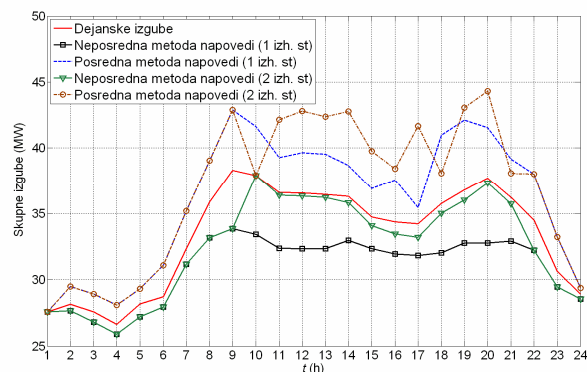
- polna črta velja za primerjavo med dejanskimi in napovedanimi izgubami prek posredne metode z enim izhodiščnim stanjem;
- črtkana črta velja za primerjavo med dejanskimi in napovedanimi izgubami prek posredne metode z dvema izhodiščnim stanjema.

Vidi se, da neposredna metoda z dvema izhodiščnima scenarijema daje najboljše rezultate, saj so odstopanja napovedanih izgub v primerjavi z dejanskimi najmanjša. To ugotovitev potrjuje tudi slika 7, ki prikazuje dejanske in napovedane skupne izgube na VN-omrežju Slovenije.

Opozoriti velja, da večje število izhodiščnih obratovalnih stanj ob boljši natančnosti podaljša čas izračuna, kar je v primerjavi s klasičnim izračunom še vedno veliko hitrejša.



Slika 6: Odstopanja med metodami za napoved izgub
Figure 6. Transmission-loss forecast estimation error



Slika 7: Skupne izgube na VN omrežju Slovenije za opazovan dan
Figure 7. Total transmission-loss forecast

Predlagana metoda je opisana neposredna metoda napovedi izgub z dvema izhodiščnima stanjema. Ta metoda ni bistveno točnejša od trenutno uporabljene, je pa bistveno hitrejša in manj zamudna s še sprejemljivimi odstopanji.

6 Sklepi

Članek predstavlja pregled prenosnih izgub VN EES Slovenije, vplivne faktorje na izgube in dve novi metodi za napovedovanje prenosnih izgub v EES, ki temeljita na uporabi kazalcev PTDF. Ti omogočajo hitrejši izračun, dodatne napake, ki jih vnašajo ti faktorji v izračun, pa so zanemarljive. Natančnost se poveča z izbiro dodatnih referenčnih točk. Metodi se torej odlikujeta po hitrosti in dejstvu, da omogočata natančnejšo napoved izgub, saj upoštevata vplive na prenosne izgube.

7 Literatura

- [1] EIMV: "Izgube energije v elektroenergetskem sistemu", Ref. št.: 764 / 1, Ljubljana, 1980.
- [2] EIMV: "Metode in ugotavljanje izgub električne energije v distributivnih omrežjih", Ref. št.: 922, Ljubljana 1985.
- [3] ANSI/IEEE Standard Terminology for Power and Distribution Transformers, New York, 1992.
- [4] F. Alvarado, "Solving Power Flow Problems with a Matlab Implementation of the Power System applications Data Dictionary", IEEE System Sciences, Proceedings of the 32nd Annual Hawaii International Conference, 1999.
- [5] T.Ogawa, S.Kadota, S. Iwamoto, "Transmission line loss Allocation Using Power Flow Tracing with Distribution Factors," IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007.

Jurij Klančnik je leta 2002 diplomiral na fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Trenutno je kot vodja službe za razvoj EES zaposlen na Elektro Slovenija, d.o.o. Njegovo raziskovalno področje obsega obratovanje, delovanje in razvoj EES, analizo EES in ekonomiko EES.

Matej Rejc je diplomiral leta 2007 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Trenutno je zaposlen kot raziskovalec v Laboratoriju za elektroenergetske sisteme in visoko napetost na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani.

Miloš Pantoš je diplomiral leta 2001 in doktoriral leta 2005 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Od leta 2006 je zaposlen kot docent in vodja Laboratorija za elektroenergetske sisteme in visoko napetost in Laboratorija za zaščito, avtomatizacijo in vodenje na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani.