

DOI: [10.46793/CIGRE37.C2.07](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.C2.07)**C2.07****UTICAJ TAČNOSTI PROGNOZE PROIZVODNJE IZ OIE NA DSO NIVOU NA
OPERATIVNO PLANIRANJE PRENOSNOG SISTEMA****THE IMPACT OF FORECAST ACCURACY OF RES GENERATION CONNECTED TO
THE DISTRIBUTION SYSTEM ON THE OPERATIONAL PLANNING OF THE
TRANSMISSION SYSTEM****Ivana Stamenić, Srđan Mladenović, Marija Đorđević, Ana Bukara, Miroslav Vilček***

Kratak sadržaj: Iako je u Srbiji trenutno udeo proizvodnje iz obnovljivih izvora energije (OIE) na distributivnom nivou relativno nizak, očekuje se da će njegov značaj u budućnosti rasti. Precizna prognoza proizvodnje OIE na DSO nivou postaje ključna ne samo za analize i operativno planiranje prenosnog sistema, već i za njegovo upravljanje, jer može uticati na tokove snaga, naponske profile, proračune prenosnih kapaciteta i sigurnost rada elektroenergetskog sistema. Ovaj rad analizira kako odstupanja u prognozama proizvodnje iz OIE na distributivnom nivou mogu uticati na procese operativnog planiranja u prenosnom sistemu, a samim tim i na donošenje odluka u realnom vremenu. Iako trenutni uticaji nisu značajni, pravovremena priprema kroz unapređenje metodologija prognoziranja i bolju koordinaciju između DSO i TSO može doprineti preciznijim analizama, optimalnijem korišćenju mrežnih kapaciteta i pouzdanijem radu elektroenergetskog sistema. Kroz analizu mogućih scenarija, rad ukazuje na potrebu za unapređenjem razmene podataka i razvojem prognoza kako bi se omogućilo kvalitetnije operativno planiranje. Na taj način, uticaj distributivne proizvodnje iz OIE može biti pravovremeno prepoznat i adekvatno uzet u obzir, čime se poboljšava i upravljanje prenosnim sistemom u uslovima sve veće integracije obnovljivih izvora na nižim naponskim nivoima.

Ključne reči: OIE, TSO, DSO, prognoza proizvodnje

Abstract: Although the share of renewable energy production (RES) at the distribution level in Serbia is currently relatively low, it is expected that its importance will grow in the future. Accurate forecasting of RES production at the DSO level is becoming crucial not only for analysis and operational planning of the transmission system but also for its control, as it can impact power flows, voltage profiles, transmission capacity calculations, and the overall reliability of the electricity system.

* Ivana Stamenić, EMS AD, ivana.stamenic@ems.rs

Srđan Mladenović, EMS AD, srdjan.mladenovic@ems.rs

Marija Đorđević, EMS JSC, marija.djordjevic@ems.rs

Ana Bukara, EMS, ana.bukara@ems.rs

Miroslav Vilček, EMS, miroslav.vilcek@ems.rs

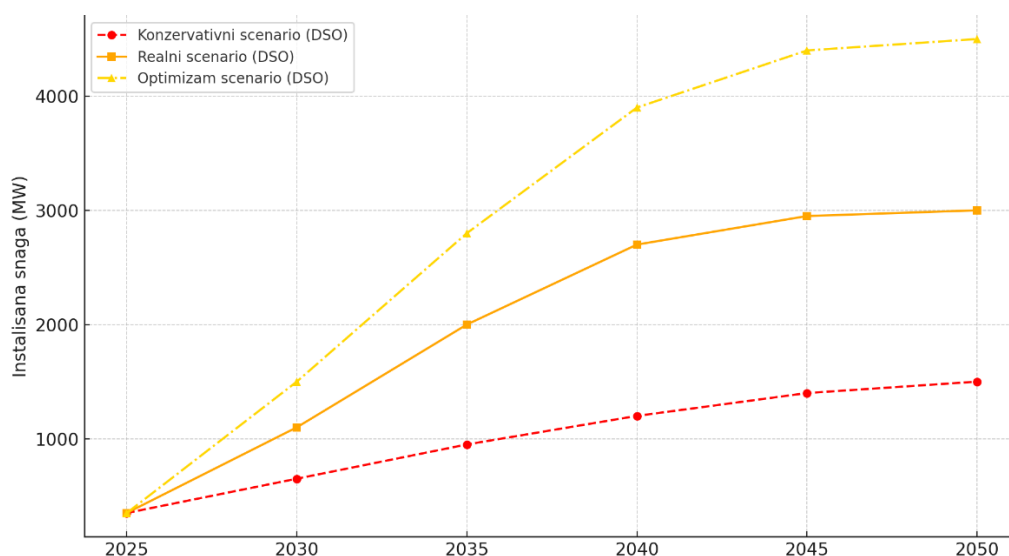
This paper analyzes how deviations in the forecasts of RES production at the distribution level can affect the operational planning processes in the transmission system and, consequently, decision-making in real-time. Although the current impacts are not significant, timely preparation through improved forecasting methodologies and better coordination between DSOs and TSOs can contribute to more accurate analyses, more optimal use of network capacities, and more reliable operation of the electricity system. Through the analysis of possible scenarios, the paper highlights the need for improving data exchange and the development of forecasts to enable better operational planning. In this way, the impact of distributed RES production can be timely recognized and adequately taken into account, thereby improving transmission system control as the integration of renewable energy sources at lower voltage levels increases.

Key words: OIE, TSO, DSO, production forecast

1 OIE NA DISTRIBUTIVNOM NIVOU

Obnovljivi izvori energije (OIE) na distributivnom nivou, poput solarnih panela na krovovima domaćinstava i manjih vetroelektrana, beleže konstantan porast u mnogim evropskim zemljama, a isti trend je prisutan i u Srbiji. Sve veći broj priključenih proizvodnih jedinica može dovesti do značajnog uticaja na rad elektroenergetskog sistema (EES), kako u distributivnoj, tako i u prenosnoj mreži. Operativno planiranje u prenosnim sistemima tradicionalno je zasnovano na stabilnim i predvidivim tokovima, ali sa porastom OIE tokovi postaju dinamičniji i manje predvidivi.

Najpovoljniji uslovi za razvoj solarnih elektrana na distributivnom nivou nalaze se u južnoj i istočnoj Srbiji, gde sunčevo zračenje prelazi 1400 kWh/m² godišnje. Lokalni razvoj vetroelektrana moguć je u južnom Banatu, istočnoj i jugozapadnoj Srbiji, u oblastima sa prosečnom brzinom vetra većom od 6 m/s. Realizacija ovih projekata zavisice od tehničkih kapaciteta za priključenje, dostupnosti mrežne infrastrukture i postojanja efikasnih tržišnih mehanizama. Na slici 1 prikazana su tri scenarija za porast kapaciteta solarnih i vetroelektrana na distributivnom nivou do 2050.

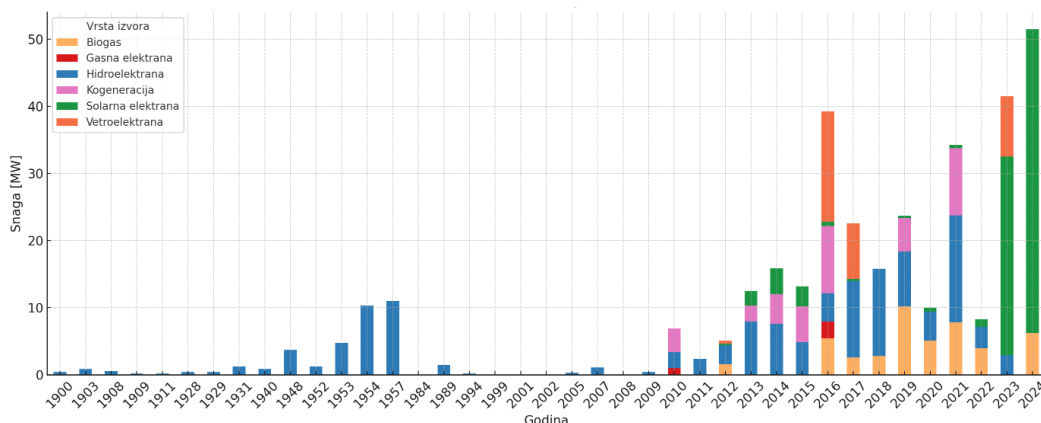


Slika 1: Prognozirana snaga solarnih i vetroelektrana priključenih na distributivnom nivou za različite scenarije u budućnosti

Scenariji rasta kapaciteta OIE na distributivnom nivou razvijeni su na osnovu tehničkih mogućnosti mreže, regulatornog okvira i tržišnih pretpostavki. Uvaženi su infrastrukturni limiti za priključenje novih izvora, potreba za modernizacijom i automatizacijom mreže, kao i ciljevi definisani u NEKP-u (Nacionalni energetske i klimatski plan – 40% udela OIE do 2030) i Strategiji razvoja energetike. U obzir su uzeti i tržišni mehanizmi poput aukcija, PPA ugovora, podrške prozumerima i uloge agregatora, kao i očekivani pad troškova tehnologije. Scenariji prate logiku postepenog prelaska ka decentralizovanom energetskom modelu.

- Konzervativni scenario: Očekuje se sporiji rast zbog ograničene podrške i potencijalnih problema u mreži. Do 2050. godine dostiže ~1500 MW.
- Realni scenario: Umereni rast u skladu sa postojećim NEKP i nacionalnim planovima. Do 2050. se dostiže ~3000 MW, sa zasićenjem nakon 2040.
- Optimistični scenario: Ambiciozan razvoj uz snažne tržišne podsticaje, povoljne cene tehnologije

Prema podacima iz novembra 2024. godine, na distributivni nivo u Srbiji priključeno je više od 2.100 proizvodnih postrojenja iz OIE, čija je ukupna instalisana snaga oko 450 MW. Najzastupljeniji izvori su solarne elektrane (oko 180 MW), potom hidroelektrane (130 MW), kogeneracija, biogoriva i vetroelektrane. Najveći porast broja priključenja zabeležen je nakon 2020. godine, posebno među kupcima – proizvođačima (prosumer). Na slici 2 prikazan je broj priključenih OIE po godinama.



Slika 2: Broj novih OIE elektrana po godinama na osnovu DSO podataka

2 ULOGA PROGNOZE OIE U OPERATIVNOM PLANIRANJU

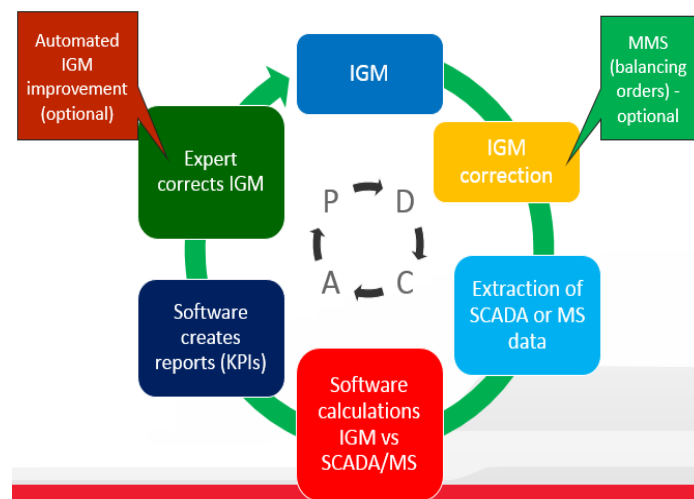
Precizna prognoza proizvodnje iz OIE je ključna za pravovremeno operativno odlučivanje u prenosnom sistemu. Tačnost ovih prognoza direktno utiče na više ključnih segmenata operativnog planiranja, uključujući:

- balansiranje proizvodnje i potrošnje,
- proračun raspoloživih kapaciteta za prenos (npr. NTC vrednosti),
- evaluaciju potreba za rezervama i redispečingom,
- procenu opterećenja elemenata sistema i sprovođenje analiza sigurnosi N-1.

Metodologije prognoze koje se primenjuju uključuju determinističke modele zasnovane na istorijskim podacima, kao i meteorološke simulacije i pristupe mašinskog učenja. EMS koristi kombinovani pristup i sarađuje sa eksternim provajderima za dobijanje prognoza proizvodnje za solarne i vetroelektrane.

Prognoze se izrađuju u različitim vremenskim rezolucijama, najčešće na satnom i 15-minutnom nivou, i obuhvataju više vremenskih horizonata – do 7 dana unapred. Tokom samog dana, one se kontinuirano ažuriraju u okviru dnevnog (DA CF) i unutar dnevnog (IDCF) vremenskog horizonata. Tipične vrednosti greške prognoza iznose od 10% do 20% u zavisnosti od tipa izvora i vremenskih uslova, izražene kroz pokazatelje kao što su MAPE (Mean Absolute Percentage Error) – srednja apsolutna procentualna greška i RMSE (Root Mean Square Error) – srednja kvadratna greška.

U okviru EU projekata Crossbow i R2D2, Elektromreža Srbije je razvila alat za proveru kvaliteta mrežnih modela – IGM QA (Individual Grid Model Quality Assessment). Na slici 3 prikazan je algoritam IGM QA aplikacije.



Slika 3: Algoritam IGM QA aplikacije

Provera kvaliteta mrežnih modela pomoću IGM QA aplikacije zahteva povezivanje sa više IT sistema i aplikacija, kako bi se obezbedili svi relevantni ulazni podaci:

- softver za izradu IGM modela,
- sistem za merenje (MS),
- SCADA sistem,
- sistem za upravljanje tržištem (MMS).

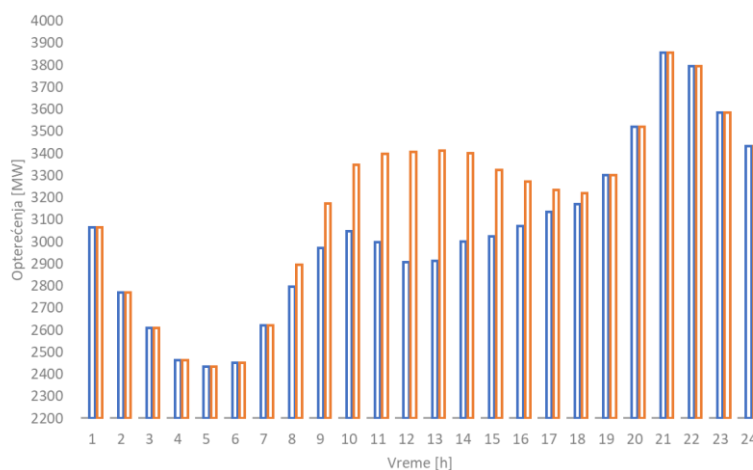
Na nivou celokupnog modela, uvedeni su ključni indikatori performansi (KPI), koji omogućavaju kontinuirano praćenje kvaliteta IGM (Individual Grid Model) kroz duži vremenski period. Korišćenjem ovog alata, primećeno je da značajna odstupanja u profilima potrošnje potiču upravo iz područja sa većim udelom proizvodnje iz OIE, što je ukazalo na potrebu za pouzdanijim prognozama na DSO nivou.

3 UTICAJ Odstupanja PROGNOZE NA PLANIRANJE PRENOSNOG SISTEMA

Odstupanja između prognozirane i stvarne proizvodnje izazvaju pogrešne procene tokova snaga i napona u mreži, preopterećenja, potrebu za neplaniranim aktiviranjima rezervi, kao i otežavanje u proračunu prekograničnih kapaciteta.

U slučajevima kada je proizvodnja iz solarnih ili vetro izvora viša od prognozirane, dolazi do potrebe za dodatnim angažovanjem balansne energije, najčešće aktiviranjem sekundarne i tercijarne rezerve koje TSO mora blagovremeno da obezbedi. Ovo povećava operativne troškove i utiče na efikasnost rada sistema.

Greške u prognozama često su uslovljene nepouzdanim ili nedovoljno preciznim meteorološkim ulaznim podacima, pre svega brzinama vetra i solarnom iradijacijom, čija tačnost značajno utiče na kvalitet procene raspoložive proizvodnje iz OIE. Na slici 4 prikazan je očekivani profil potrošnje u prenosnom sistemu u slučaju uvažavanja i neuvažavanja proizvodnje na DSO nivou u trenutku kada na distributivnom sistemu bude priključeno preko 500 MW proizvodnje iz OIE. Kada je reč o analizi sigurnosti rada sistema, neprecizne prognoze značajno utiču na rezultate N-1 analiza, jer se stvarno opterećenje elemenata može značajno razlikovati od očekivanog. Ova razlika je naročito izražena kod scenarija koji uključuju tok snage iz DSO mreže prema TSO, što nije bio slučaj do sada.



Slika 4: Kriva potrošnje sa i bez uvažavanja proizvodnje na distributivnom nivou u budućnosti

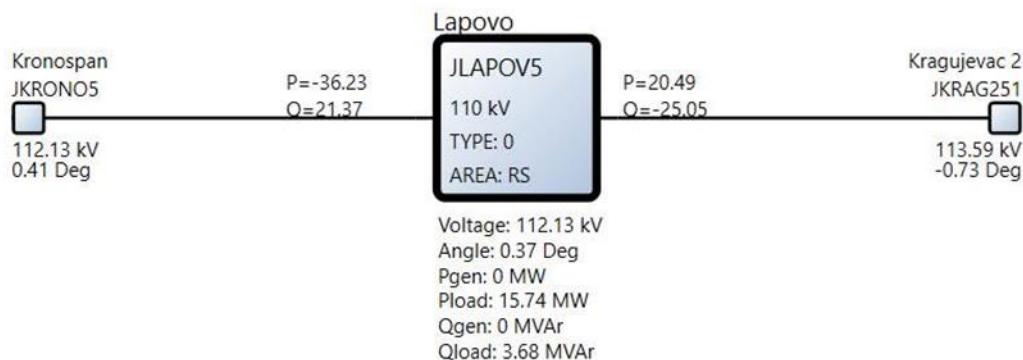
Analize koje se zasnivaju na DCF modelima pokazuju veća odstupanja u tokovima snaga ukoliko se u procesu planiranja ne uvaži prognozirana proizvodnja jedinica koje su priključene na distributivni sistem. Ono što je primetno, modeli zasnovani na IDCF (unutar dnevnim) podacima imaju znatno veću tačnost, jer koriste ažurirane prognoze i bliže su trenutku za koji se analize rade. Ova razlika je posebno izražena kod solarne proizvodnje, koja se može značajno menjati u toku dana u zavisnosti od kretanja oblačnosti i lokalnog je karaktera.

3.1 Uticaj promene proizvodnje OIE na tokove snaga u IGM modelu

Kako bi se analizirala zavisnost između priključenja proizvodnih kapaciteta iz OIE na distributivnom nivou i ponašanja čvorova u prenosnoj mreži, razmatran je slučaj TS Lapovo u tri karakteristična stanja: bez priključenih kapaciteta iz OIE, sa priključenih 10 MW, i sa priključenih 50 MW proizvodnje.

Analizirane vrednosti su očitane iz IGM modela na osnovu prikaza realnog opterećenja u čvoru. Vrednosti aktivne proizvodnje (Pgen) u samom čvoru su 0 MW u svim slučajevima jer su OIE kapaciteti priključeni na distributivnom nivou, ali se njihov efekat reflektuje kroz smanjenje ukupne aktivne snage preuzete iz prenosne mreže (Pload).

- Bez priključenih OIE kapaciteta

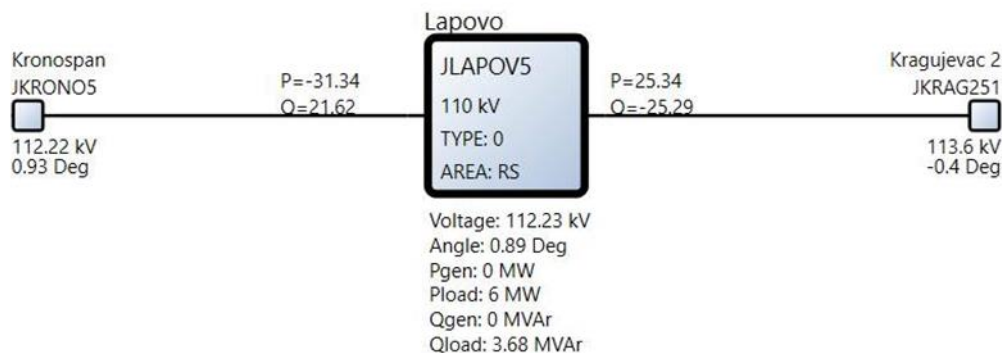


Slika 5: TS Lapovo - Bez priključenih OIE kapaciteta

U scenariju, prikazanom na slici 5, u konzumnom području TS Lapovo nije prisutna proizvodnja iz OIE.

Prikazana potrošnja u IGM modelu iznosi 15.74 MW, što predstavlja neto preuzimanje iz prenosne mreže, bez rasterećivanja sa strane distributivnog sistema.

- Priključenih 10 MW proizvodnje iz OIE (maksimalna proizvodnja trenutno instalisanih kapaciteta)



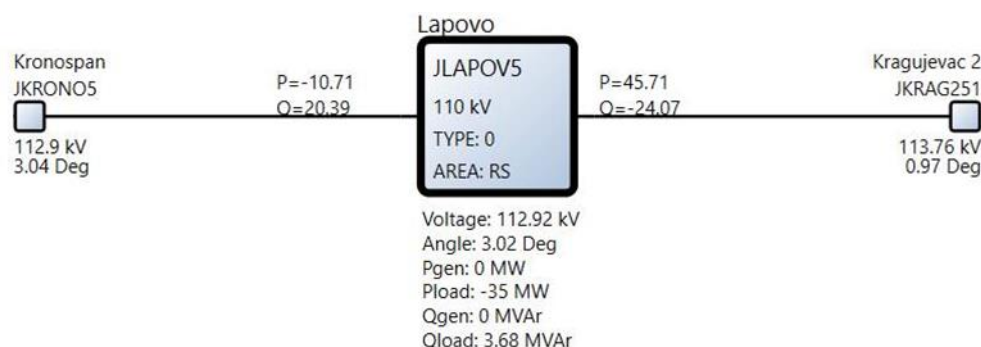
Slika 6: TS Lapovo - Priključenih 10 MW proizvodnje iz OIE

Prilikom priključenja 10 MW proizvodnje iz OIE, Pload u istom čvoru opada na svega 6 MW, što ukazuje da je znatan deo potrošnje pokriven lokalno u okviru distributivne mreže. Ovo je klasičan primer efekta netovanja proizvodnje i potrošnje u DSO mreži, koji smanjuje potrebnu snagu iz prenosne mreže. Ovaj scenario je prikazan na slici 6.

- Priključenih 50 MW proizvodnje iz OIE (potencijalni budući scenario)

U slučaju značajnog priključenja 50 MW proizvodnje iz OIE, ukupno prikazana potrošnja TS Lapovo dostiže -35 MW.

Ovaj rezultat pokazuje da je proizvodnja iz obnovljivih izvora u distributivnoj mreži na području Lapova bila dovoljna da zadovolji lokalnu potrošnju, čak je i veća od nje - dolazi do obrnutog toka snage – višak proizvedene energije se injektira iz distributivnog u prenosni sistem.



Slika 7: TS Lapovo - Priključenih 50 MW proizvodnje iz OIE

Ovi rezultati potvrđuju da promena u priključenju proizvodnje iz OIE na distributivnom nivou direktno utiče na ponašanje čvorova u IGM modelima. Iako se proizvodnja ne vidi eksplicitno u prenosnom čvoru, njen efekat je jasno vidljiv kroz promenu neto potrošnje i tokova snaga, uključujući i moguće tokove iz DSO ka TSO mreži. Ovaj scenario je prikazan na slici 7.

3.2 KPI pokazatelji za praćenje kvaliteta mrežnih modela

EMS koristi KPI (Ključni indikatori performansi) vrednosti za ocenu tačnosti IGM modela, uključujući:

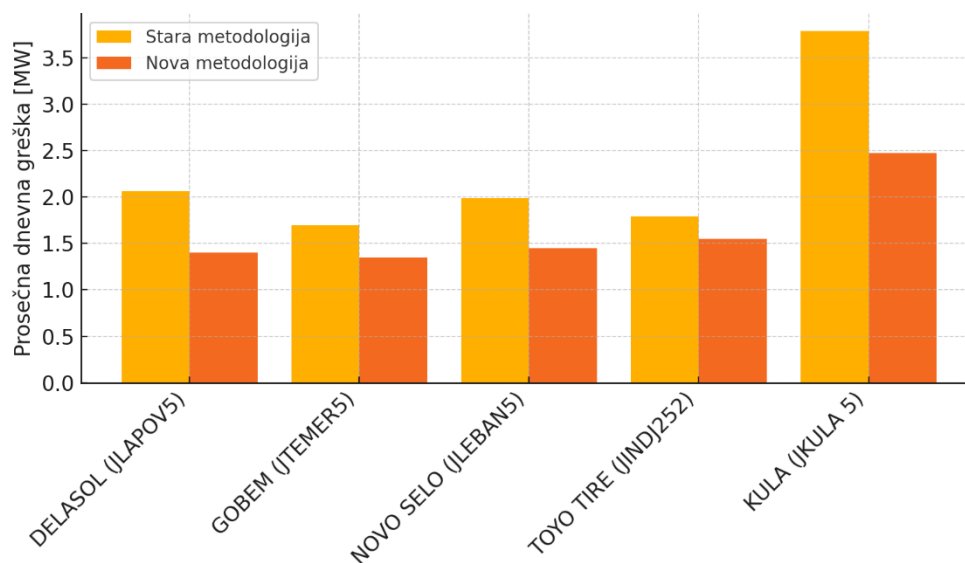
- razliku između prognozirane i izmerene aktivne snage u čvoru (sa pragom tolerancije $\pm 5\%$),
- MAPE (srednja apsolutna procentualna greška) i RMSE (srednja kvadratna greška) vrednosti za prognozu proizvodnje iz OIE,
- broj čvorova sa učestalim prekoračenjem dozvoljenog odstupanja.

Za veće proizvodne jedinice na distributivnom nivou, EMS je 2024. godine počeo da sprovodi analize preciznosti prognoza iz OIE kroz praćenje potrošnje u svojim TS, u kojima su te proizvodne jedinice priključene. U nastavku (tabela 1 i slika 8) su prikazane prosečne dnevne greške pre i nakon promene metodologije planiranja potrošnje u procesu kreiranja modela prenosnog sistema u nekoliko tačaka u kojima je priključena proizvodnja na distributivnoj mreži, odnosno nakon uvažavanja prognoze proizvodnje na DSO nivou:

Tabela 1: Uporedna tačnost prognoze (stara/nova metod.) za 5 velikih OIE elektrana – septembar 2024.

Elektrana	Instalisana snaga [MW]	Srednja greška staro [MW]	Srednja greška novo [MW]	Poboljšanje [%]
DELASOL (JLAPOV5)	9.9	2.06	1.4	32.1

Elektrana	Instalisana snaga [MW]	Srednja greška staro [MW]	Srednja greška novo [MW]	Poboljšanje [%]
GOBEM (JTEMER5)	9.32	1.7	1.35	20.5
NOVO SELO (JLEBAN5)	8	1.99	1.45	26.9
TOYO TIRE (JINDJ252)	7.5	1.79	1.55	13
KULA (JKULA 5)	9.9	3.79	2.47	35



Slika 8: Uporedne vrednosti prosečnih dnevnih grešaka za odabrane elektrane

4 KOORDINACIJA DSO I TSO

U skladu sa odlukom ACER-a o zajedničkim specifikacijama za razmenu mrežnih modela (CSAM), predviđena je obaveza saradnje između TSO i DSO u cilju obezbeđivanja sveobuhvatnih i tačnih mrežnih modela. U dokumentu se posebno naglašava značaj uključivanja DSO-ova u proces dostavljanja podataka o aktivnim resursima, uključujući proizvodne jedinice, skladišta energije i fleksibilnih potrošača.

U skladu sa tim, DSO je u obavezi da dostavlja:

- agregirane ili po jedinici specificirane podatke o proizvodnji iz OIE,
- informacije o topologiji i parametrima mreže na granici sa TSO,
- ažurirane podatke u rokovima predviđenim za IGM/CGM razmenu.

TSO, s druge strane, mora obezbediti tehničke specifikacije i alate koji omogućavaju standardizovanu razmenu podataka, kao i mogućnost povratne informacije ka DSO o kvalitetu podataka i njihovom uticaju na model celokupnog sistema.

Razmena podataka TSO – DSO se još uvek izvršava preko elektronske pošte. Međutim, cilj je da se uspostavi razmena podataka preko platforme „Let’s coordinate“ koja omogućava da DSO-ovi na strukturisan način dostavljaju neophodne informacije. Cilj je da ova platforma bude u svakodnevnoj upotrebi između EMS i ODS operatora, pri čemu bi se razmenjivali agregirani profili, topološki podaci i ažurirani planovi proizvodnje. Ova praksa je usklađena sa CSAM (Methodology for coordinating operational security analysis) zahtevima i predstavlja osnovu za kvalitetno modelovanje IGM i CGM mrežnih modela.

4.1 Pogled u budućnost – izazovi sa većim udelom OIE na distributivnom nivou

U narednim godinama očekuje se značajan porast kapaciteta OIE, naročito u oblasti decentralizovane solarne proizvodnje i kroz povećanje broja prozjumeru. Ovaj rast je u skladu sa politikama energetske tranzicije i ciljevima dekarbonizacije.

Iskustva iz zemalja koje imaju veći udeo OIE na nižim naponskim nivoima, poput Grčke, pokazuju da lokalna proizvodnja može znatno uticati na bilans snaga i stabilnost rada elektroenergetskog sistema.

Na primer, tokom određenih dana, proizvodnja iz OIE priključenih na distributivni nivo u Grčkoj činila je više od 40% ukupne proizvodnje u zemlji. U takvim situacijama dolazi do tokova snaga iz DSO ka TSO mreži, čime se narušava predvidljivost sistema i otežava planiranje raspoloživih prenosnih kapaciteta.

U ekstremnim slučajevima, ovakvi uslovi dovode do pojave da rezerve snage postanu nedovoljne ili da se sistem nalazi na granici sigurnog rada, što zahteva trenutno angažovanje fleksibilnih resursa poput skladišta energije, agregatora i potrošača sa mogućnošću prilagođavanja potrošnje (fleksibilni potrošači).

Za Srbiju je od presudnog značaja da se sistemski pripremi za ovakav razvoj kroz:

- unapređenje metodologija prognoze, naročito za proizvodnju iz solarnih elektrana,
- uspostavljanje i primenu naprednih mehanizama razmene podataka između DSO i TSO,
- uključivanje fleksibilnih potrošača i razvoj tržišta pomoćnih usluga na nižim naponskim nivoima,
- izgradnju lokalnih mrežnih modela na DSO nivou.

U suprotnom, moglo bi doći do sve češćih problema sa naponskim profilima, netransparentnim injektiranjem snage između distributivnog i prenosnog nivoa, i ograničavanjem planiranih tokova prema susednim sistemima, što bi negativno uticalo na pouzdanost i ekonomičnost rada elektroenergetskog sistema Srbije.

5 ZAKLJUČAK

Kako raste broj proizvodnih kapaciteta priključenih na distributivnu mrežu, prognoze njihove proizvodnje postaju sve važnije za stabilan i efikasan rad prenosnog sistema. Unapređenje metodologije prognoza, standardizacija i digitalizacija razmene podataka, kao i jačanje koordinacije između DSO i TSO predstavljaju osnovu za uspešnu integraciju OIE na svim nivoima mreže.

Elektromreža Srbije je kroz implementaciju alata kao što su IGM QA i platforma „Let’s coordinate“ uspešno postavila temelje za integraciju proizvodnje sa distributivnog nivoa u operativno planiranje prenosnog sistema.

Na osnovu dosadašnjeg iskustva, preporučuju se sledeći pravci daljeg razvoja:

- proširenje sistema prognoze na nove tehnologije (npr. skladišta energije, fleksibilne potrošače),
- automatizacija ažuriranja mrežnih modela kroz API (Application Programming Interface) pristupe,
- dosledna primena CSAM i SOGL obaveza u pogledu kvaliteta i rokova isporuke podataka.

Kombinacija preciznijih prognoza i kvalitetnije koordinacije između operatora omogućiće sigurniji rad sistema, posebno u uslovima ubrzane energetske tranzicije.

6 LITERATURA

- [1] Methodology for coordinating operational security analysis (CSAM) in accordance with Article 75 of Commission Regulation (EU) 2017/1485 of 2 August 2017 establishing a guideline on electricity transmission system operation
- [2] Capacity Allocation and Congestion Management (CACM) regulation
- [3] R2D2 Project & CROSSBOW Project
- [4] SmartNet Project (H2020). Coordination schemes between TSO and DSO for the integration of distributed resources.