



METODOLOGIJA ZA PROVERU KVALITETA OBJEDINJENIH MREŽNIH MODELA

ANDRIJANA ĐALOVIĆ^{*1}
ISMAR SINANOVIĆ¹
DUŠAN PREŠIĆ¹
TADEJA BABNIK²
BOJAN MAHKOVEC²

¹CENTAR ZA KOORDINACIJU SIGURNOSTI SCC D.O.O. BEOGRAD

²ELPROS elektronski in programske sistemi d.o.o. Ljubljana

BEOGRAD

REPUBLIKA SRBIJA

Kratak sadržaj — Jedna od glavnih usluga koju pružaju regionalni koordinatori sigurnosti (Regional Security Coordinators – RSCs) je validacija pojedinačnih mrežnih modela, kao i kreiranje i dostavljanje objedinjenih mrežnih modela Kontinentalne Evrope. Objedinjeni mrežni modeli predstavljaju polaznu tačku za sve ostale usluge RSC-a, s obzirom na to da su oni osnova za proračun tokova snaga, analiza sigurnosti itd.

U okviru Horizon 2020 projekta CROSSBOW razvijena je metodologija za proveru kvaliteta objedinjenih mrežnih modela, poređenjem prognoziranih vrednosti napona, aktivnih i reaktivnih snaga sa odgovarajućim izmerenim vrednostima za najrelevantnije mrežne elemente regionala Jugoistočne Evrope. Za potrebe ove metodologije kreiran je i poseban modul u okviru CROSSBOW WAMAS (Wide Area Monitoring and Awareness System) proizvoda.

Cilj ovog rada je da opiše algoritam i arhitekturu sistema koji se koristi za realizaciju metodologije za proveru kvaliteta objedinjenih mrežnih modela, zatim da opiše indikatore kvaliteta objedinjenih mrežnih modela i da prikaže rezultate date metodologije dobijene kroz razvijeni softverski alat.

Ključne reči — objedinjeni mrežni model, CGM, indikatori kvaliteta

* andrijana.djalovic@scc-rsci.com

1 UVOD

Proces validacije individualnih mrežnih modela (Individual Grid Models – IGMs) i kreiranja objedinjenih mrežnih modela (Common Grid Models – CGMs) se može opisati kroz nekoliko koraka razmene podataka između TSO-a i RSC-a. TSO-i Kontinentalne Evrope kreiraju modele njihovih sistema koristeći najbolje prognoze proizvodnje, potrošnje, razmena i topologije [1]. RSC-i proveravaju kvalitet IGM-ova sa semantičke i sintakške tačke gledišta kao i sa aspekta tokova snaga, u skladu sa odredbama ENTSO-E dokumenta koji opisuje kvalitet modela [2]. Ako se ustanovi da IGM-ovi nisu zadovoljavajućeg kvaliteta, RSC kontaktira odgovarajući TSO koji bi trebalo da dostavi korigovane modele u propisanom roku. Nakon završenog procesa validacije, RSC kreira CGM-ove i dostavlja ih TSO-ima. Kreirani CGM-ovi predstavljaju polaznu tačku odakle se dalje vrše proračuni analize sigurnosti, prenosnih kapaciteta, procesa planiranja isključenja itd. Opisani proces validacije/kreiranja IGM-ova/CGM-ova ne uključuje poređenje prognoziranih vrednosti sa odgovarajućim realizovanim vrednostima.

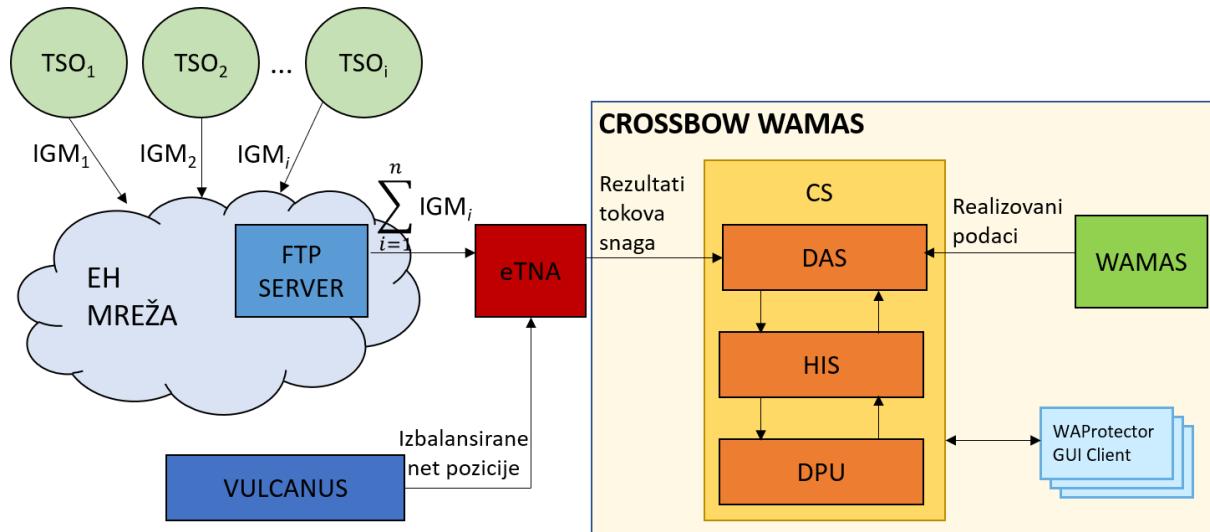
CROSSBOW (CROSS BOder management of variable renewable energies and storage units enabling a transnational Wholesale market) je inovacijski projekat Evropske komisije koji je započeo u novembru 2017. U okviru ovog projekta pokrenuto je nekoliko radnih paketa među kojima je SCC najviše angažovan u paketu *WP4 Regional Operation Centre Balancing Cockpit*, a jedan od poslova u okviru datog paketa je razvoj metodologije za proveru kvaliteta objedinjenih mrežnih modela. [3]

U saradnji sa slovenačkom kompanijom ELPROS, SCC je izvršio implementaciju WAProtector sistema u svoj IT sistem. Ovaj sistem predstavlja sistem za akviziciju, obradu podataka u realnom vremenu, skladištenje i monitoring podataka zabeleženih na mernim uređajima u elektroenergetskom sistemu, kao i prognoziranih vrednosti mernih veličina. Na osnovu sakupljenih realizovanih i prognoziranih vrednosti, WAProtector vrši proračun različitih indikatora kvaliteta modela i omogućava njihovu grafičku predstavu u realnom vremenu, ali i generisanje izveštaja sa svim sakupljenim i proračunatim vrednostima.

U poglavlju 2 ovog rada opisana je arhitektura sistema za proveru kvaliteta objedinjenih mrežnih modela, dok je u poglavlju 3 opisan algoritam metodologije za proveru kvaliteta mrežnih modela i indikatori kvaliteta koji se proračunavaju. U poglavlju 4 prikazani su rezultati merenja i indikatori kvaliteta za jedan vremenski period, dobijeni primenom date metodologije.

2 ARHITEKTURA SISTEMA ZA PROVERU KVALITETA OBJEDINJENIH MREŽNIH MODELA

Arhitektura sistema za proveru kvaliteta objedinjenih mrežnih modela i njegove veze sa sistemima u TSO i RSC okruženjima su prikazani na Slici 1.



Slika 1. Arhitektura sistema za proveru kvaliteta objedinjenih mrežnih modela

Osnovu arhitekture sistema za proveru kvaliteta objedinjenih mrežnih modela predstavlja WAProtector sistem koji se sastoji iz četiri dela:

- Sistem za akviziciju podataka (Data Acquisition System – DAS),
- Baza podataka za skladištenje ulaznih podataka i rezultata (Historical Database – HIS),
- Jedinica za obradu ulaznih podataka i generisanje indikatora (Data Processing Unit – DPU),
- Višeklijentski grafički korisnički interfejs (Graphical User Interface-GUI).

DAS komponenta je sa jedne strane povezana sa enterprise Transmission Network Analyzer (eTNA) softverom, dok je sa druge strane povezana sa SCADA sistemima instaliranim u okruženjima TSO-a. eTNA je softver koji SCC koristi za validaciju i spajanje IGM-ova, dostavljenih od strane TSO-a putem FTP servera na *Electronic Highway* (EH) mreži. Pomoću eTNA softvera se nad objedinjenim modelima mreže vrše proračuni tokova snaga, čiji rezultati se dostavljaju DAS komponenti WAProtector sistema. Na ulaz DAS komponente dolazi ukupno 839 prognoziranih satnih vrednosti za mrežne elemente i čvorove u regionu Jugoistočne Evrope (JIE).

Realizovane vrednosti se dostavljaju DAS komponenti sa SCADA sistema regionalnih TSO-a. Realizovane vrednosti se preuzimanju za iste mrežne elemente i čvorove, kao što je slučaj sa prognoziranim vrednostima. Prognozirane i realizovane vrednosti koje se sakupljaju su:

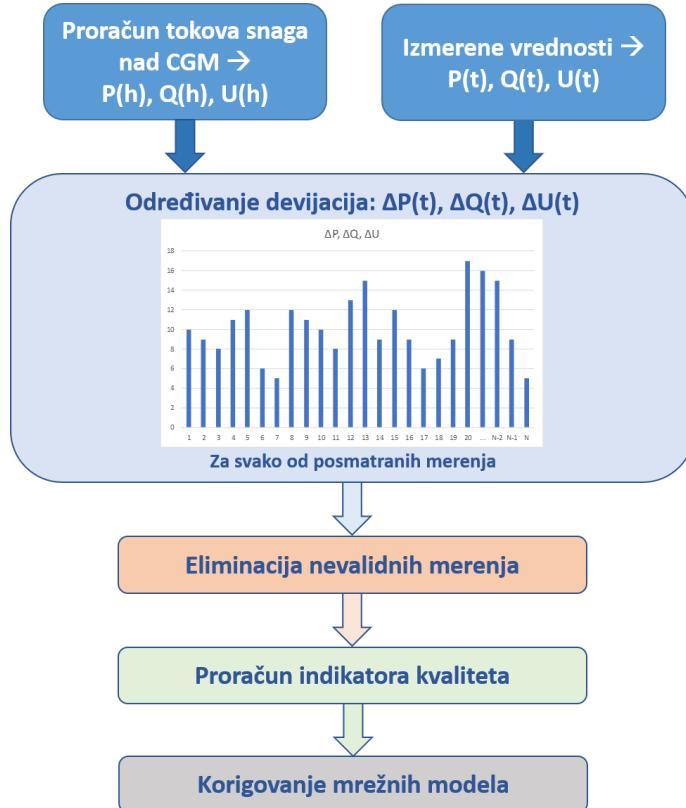
- tokovi aktivne snage na interkonektivnim i unutrašnjim dalekovodima (P),
- tokovi reaktivne snage na interkonektivnim i unutrašnjim dalekovodima (Q),
- naponi mrežnih čvorova (V).

Dalje se svi sakupljeni podaci skladište u bazi podataka WAProtector sistema koju predstavlja HIS komponenta. DPU komponenta je zadužena za:

- proračun usrednjениh satnih realizovanih vrednosti za P, Q i V,
- proračun indikatora kvaliteta mrežnih modela,
- generisanja izveštaja koji se dostavljaju SCC-u.

3 ALGORITAM ZA PROVERU KVALITETA OBJEDINJENIH MREŽNIH MODELA

Suština algoritma za proveru kvaliteta objedinjenih mrežnih modela je proračun različitih indikatora kvaliteta modela, na osnovu prognoziranih i usrednjениh satnih realizovanih vrednosti. Prognozirane satne vrednosti se dostavljaju 24 sata unapred na dnevnom nivou, u okviru procedure za prognozu zagušenja na vremenskom horizontu dan unapred (Day Ahead Congestion Forecast - DACF) dok se realizovane vrednosti skupljaju sa periodom t koja iznosi 10s. Algoritam za proveru kvaliteta objedinjenih mrežnih modela je prikazan na Slici 2.



Slika 2. Algoritam za proveru kvaliteta objedinjenih mrežnih modela

U narednim potpoglavljima biće opisani koraci algoritma koji se tiču određivanja devijacija, eliminacije nevalidnih merenja i proračuna indikatora kvaliteta. Krajnji cilj datog algoritma je da se na osnovu proračunatih indikatora kvaliteta unapredi proces prognoze stanja sistema korigovanjem objedinjenih mrežnih modela. Ovaj korak algoritma je još uvek u fazi razvoja, te neće biti predmet ovog rada.

3.1 Određivanje devijacija i eliminacija nevalidnih merenja

Neka su date sledeće odrednice:

t – perioda sakupljanja vremenskih odbiraka merenih veličina,

R_t – vrednost odbirka merene veličine (P/Q/V),

F_h – prognozirana satna vrednost (P/Q/V).

Devijacije prognoziranih od realizovanih vrednosti na nivou odbirka t se određuju pomoću sledeće relacije [3]:

$$\Delta_t = R_t - F_h \quad (1)$$

Da bi se na osnovu proračunatih devijacija odredili relevantni indikatori kvaliteta, neophodno je prvo eliminisati odstupajuća merenja (*eng. outlier*). Odstupajuće merenje predstavlja opservaciju koja toliko odstupa od ostalih opservacija da izaziva sumnju da je generisana nekim drugim, nestandardnim mehanizmom [4]. U datom algoritmu, za određivanje odstupajućeg merenja se koristi srednje absolutno odstupanje (Median Absolute Deviation – MAD) koje se proračunava na satnom nivou pomoću sledeće relacije [5]:

$$MAD_h = k \cdot M(|R_t - M(R_t)|), \quad k = 1.4826 \quad (2)$$

U relaciji (2) M je oznaka za medijanu čiji će proračun biti objašnjen u potpoglavlju 3.2.

Kriterijum za određivanje odstupajućeg merenja je dat sledećom relacijom [6]:

$$\left| \frac{R_t - M(R_t)}{MAD_h} \right| > 3 \quad (3)$$

Dakle, ako je apsolutno odstupanje odbirka R_t od medijane svih realizovanih vrednosti odbiraka datog sata $M(R_t)$ veće od vrednosti $3 \cdot MAD_h$, onda se dati odbirak R_t smatra odstupajućim merenjem i eliminiše se iz daljeg proračuna indikatora kvaliteta objedinjenog mrežnog modela.

3.2 Poračun indikatora kvaliteta

Indikatori kvaliteta su kvantitativna mera kvaliteta prognoze aktivne snage, reaktivne snage i napona, koji opisuju odstupanje prognoziranih vrednosti od odgovarajućih realizovanih vrednosti. Indikatori kvaliteta se proračunavaju na nivou sata za 839 merenja pomenutih parametara. Za potrebe ove metodologije, vrši se proračun sledećih indikatora kvaliteta:

- Srednja devijacija (*eng. mean deviation*) koja se proračuna prema relaciji (4) kao srednja vrednost svih odbiraka [7]:

$$\bar{\Delta}_h = \frac{\sum_{t=1}^N \Delta_t}{N}, \quad (4)$$

gde je N broj odbiraka unutar sata.

- Medijana (*eng. median deviation*) koja se proračunava prema relaciji (5) kao vrednost koja deli donju polovicu odbiraka od gornje polovine odbiraka dok su oni sortirani prema opadajućem/rastućem poretku [8]:

$$m_h = \frac{\Delta_{\lceil \frac{N+1}{2} \rceil} + \Delta_{\lfloor \frac{N+1}{2} \rfloor}}{2} \quad (5)$$

- Standardna devijacija (*eng. standard deviation*) koja se proračunava prema relaciji (6) kao mera disperzije devijacija određenih relacijom (1) od vrednosti srednje devijacije [7]:

$$s_h = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_t - \bar{\Delta}_h)^2}{N-1}} \quad (6)$$

- Standardna greška srednje vrednosti (*eng. Standard Error of Mean – SEM*) koja se proračunava prema relaciji (7) kao procena standardne devijacije [7]:

$$SEM_h = \frac{s_h}{\sqrt{N}} \quad (7)$$

- Srednja apsolutna procentualna greška (*eng. Mean Absolute Percentage Error – MAPE*) koja se proračunava prema relaciji (8) kao srednja vrednost apsolutne procentualne greške prognoze [9]:

$$MAPE_h = \frac{\sum \left| \frac{\Delta_t}{R_t} \right|}{N} \cdot 100\% \quad (8)$$

S obzirom na to da je MAPE relativno dobar indikator kada su obe vrednosti, prognozirana i realizovana, pozitivne i daleke od nule, njegova upotreba je svedena samo na naponska merenja.

- Realizovana prosečna satna vrednost koja se proračunava prema sledećoj relaciji [3]:

$$\bar{R}_h = F_h + \bar{\Delta}_h \quad (9)$$

- Realizovana vrednost srednjeg odbirka u satu koja se proračunava prema relaciji (10) [3]:

$$RS_h = R_t \left(\frac{N}{2} \right) \quad (10)$$

Pored navedenih indikatora kvaliteta, vrši se proračun nekoliko parametara koji se odnose na kvalitet realizovanih podataka:

- Broj odstupajućih merenja unutar sata N_0 koji se proračunava posebnim mehanizmima unutar centralnog sistema;

- Broj snimljenih odbiraka unutar sata koji se koriste za proračun indikatora kvaliteta N , koji se dobija prema relaciji (11) kada se od ukupnog broja odbiraka unutar sata N_A oduzme broj odbiraka koji su označeni kao odstupajuća merenja i broj odbiraka bez zabeleženih vrednosti N_U (zbog problema sa mernim mestom, konekcijom, itd.);

$$N = N_A - N_0 - N_U \quad (11)$$

- Raspoloživost podataka A koja se proračunava prema relaciji (12) kao procentualni ideo snimljenih odbiraka N u ukupnom broju odbiraka N_A .

$$A = \frac{N}{N_A} \cdot 100\% \quad (12)$$

4 REZULTATI PRIMENE ALGORITMA ZA PROVERU KVALITETA OBJEDINJENIH MREŽNIH MODELA

U nastavku teksta biće prikazani rezultati primene gore opisanog algoritma kroz proračun indikatora kvaliteta aktivne snage za period od dve nedelje, 14.09.2020 – 27.09.2020, koji će u daljem tekstu biti označen kao period L. Odstupanja će biti prikazana za pet 400 kV interkonektivnih dalekovoda:

- Đerdap - Portile de Fier,
- Niš 2 – Sofija Zapad,
- Sremska Mitrovica – Ugljevik,
- Subotica – Sandorfalva,
- Štip – Vranje.

Svi grafici u nastavku su dobijeni direktno iz WAProtector sistema ili su kreirani na osnovu izveštaja o indikatorima dobijenim iz WAProtector sistema.

Na Slici 3 prikazana su relativna odstupanja prognoziranih vrednosti aktivne snage od realizovanih vrednosti. Grafik je kreiran na osnovu vrednosti za period L za sve sate, gde su posmatrani podaci za pojedinačne dalekovode. Odstupanja prikazana na grafiku su dobijena prema sledećoj relaciji:

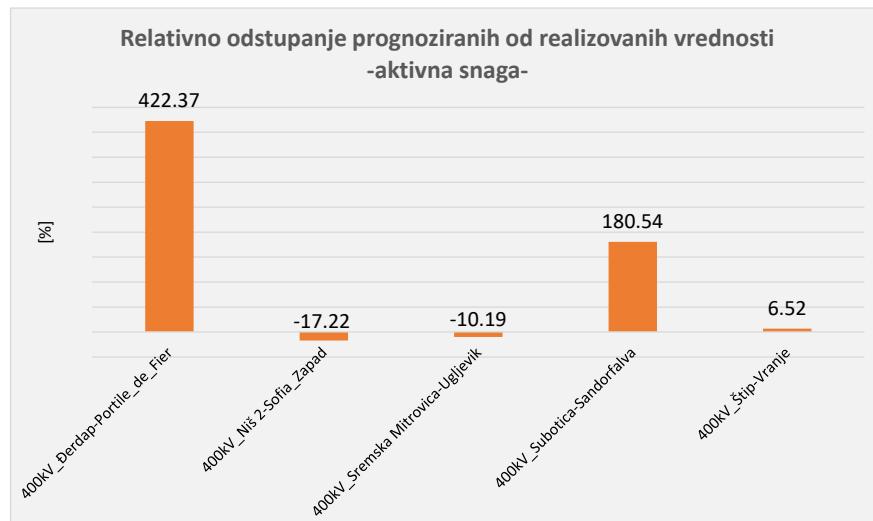
$$RD = \frac{\sum_{h=1}^H F_h - \sum_{h=1}^H R_h}{\sum_{h=1}^H R_h} \cdot 100\%, \quad (13)$$

gde je:

H – ukupan broj sati unutar perioda L,

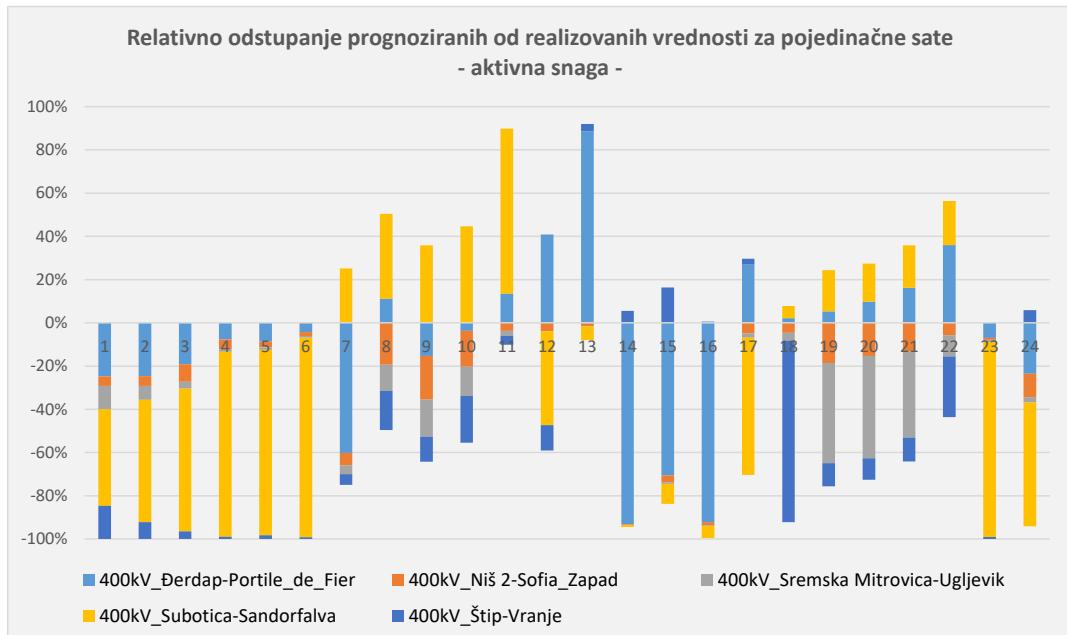
R_h – prosečna satna realizovana vrednost odbiraka,

F_h – satna prognozirana vrednost.



Slika 3. Relativna odstupanja prognoziranih od realizovanih vrednosti aktive snage za pojedinačne dalekovode za period 14.09.2020. – 27.09.2020.

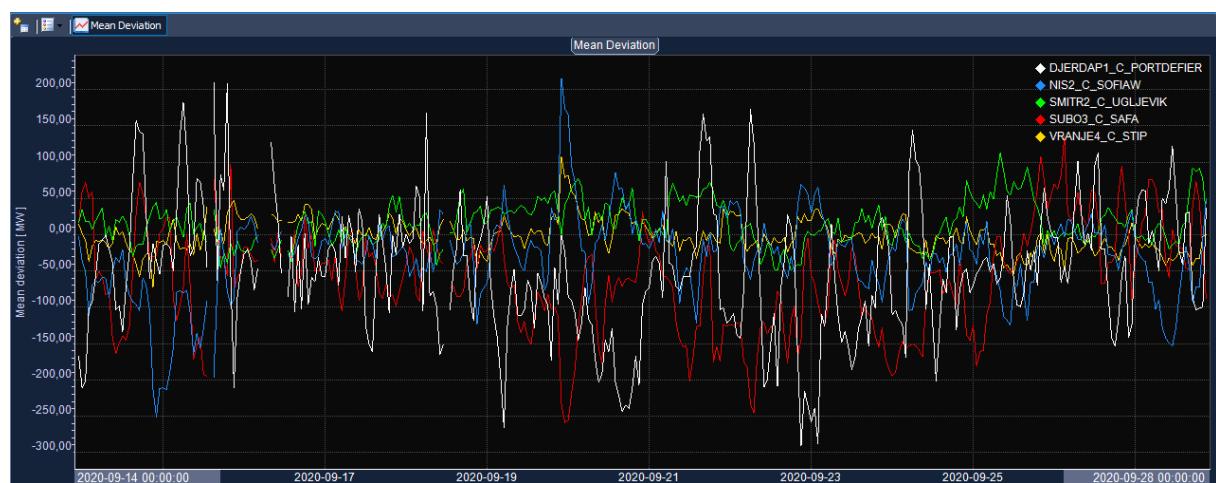
Na osnovu Slike 3, najveća relativna odstupanja na nivou celog perioda L (14 dana) se javljuju za dalekovode 400kV Đerdap – Portile de Fier i 400kV Subotica – Sandorfalva. Ako se iste vrednosti posmatraju za svaki pojedinačni dalekovod na nivou sata, dobija se grafik prikazan na Slici 4. Ovaj grafik predstavlja procentualni ideo relativnih odstupanja za pojedinačne dalekovode po satu, gde je suma svih procentualnih udela po satu jednaka 100%.



Slika 4. Udeo relativnih odstupanja prognoziranih od realizovanih vrednosti aktivne snage za pojedinačne dalekovode na nivou sata za period 14.09.2020. – 27.09.2020.

Na osnovu Slike 4 se vidi da procentualni ideo odstupanja za pojedinačne dalekovode varira u zavisnosti od sata. Tako je ideo relativnog odstupanja za dalekovod 400kV Đerdap – Portile de Fier za prvih šest sati relativno mali, a najzapaženiji je u satima 7, 12-16. ideo relativnog odstupanja za dalekovod 400kV Subotica – Sandorfalva je najveći za sate 1-6, 8-12, 17, 23-24, dok je za sate 13-16 relativno mali. Za dalekovod 400kV Štip – Vranje ideo relativnog odstupanja je najzapaženiji u 18. satu.

Slika 5 predstavlja grafik indikatora srednje devijacije za istih pet dalekovoda, koji je kreiran direktno u WAProtector sistemu. Na grafiku se može videti promena srednje devijacije tokom perioda L. Najveća srednja devijacija je detektovana za dalekovod 400kV Đerdap – Portile de Fier (bela kriva), za neke sate njena vrednost je blizu 300MW.



Slika 5. Promena srednje devijacije aktivne snage za pojedinačne dalekovode za period 14.09.2020. – 27.09.2020.

Slika 6 prikazuje 3 grafika koji se odnose na dalekovod 400kV Đerdap – Portile de Fier. Na prvom su prikazane prognozirane (crvena kriva), izmerene (bela kriva) i srednje satne izmerene vrednosti aktivne

snage (plava kriva). Na drugom grafiku su prikazane promene 4 indikatora kvaliteta (srednja devijacija – žuta kriva, medijana – zelena kriva, standardna greška srednje vrednosti – plava kriva, standardna devijacija – bela kriva). Na trećem grafiku su prikazani podaci o raspoloživosti mernih podataka (raspoloživost podataka – bela kriva, broj odstupajućih merenja – zelena kriva, broj snimljenih odbiraka koji se koriste za proračun indikatora – plava kriva).



Slika 6. Indikatori kvaliteta za dalekovod 400kV Đerdap – Portile de Fier za period 14.09.2020. – 27.09.2020.

Na osnovu trećeg grafika prikazanog na Slici 6, može se zaključiti da je raspoloživost podataka vrlo blizu maksimalnoj vrednosti tokom celog perioda L. Na osnovu prvog grafika prikazanog na Slici 6, vidi se da i pored devijacije prognoze aktivne snage od realizovane vrednosti, krive prognoze i realizovane vrednosti aktivne snage za dalekovod 400kV Portile de Fier – Đerdap imaju približno sličan oblik tokom perioda L.

5 ZAKLJUČAK

Za sada proces validacije IGM-ova/kreiranja CGM-ova koji obavljaju RSC-ovi ne uključuje proveru ostvarenosti prognoziranog stanja sa realizovanim. Ako se uzme o obzir činjenica da su rezultati koji se baziraju na proračunu tokova snaga nad kreiranim CGM-ovima namenjeni između ostalog i dispečerima u nacionalnim dispečerskim centrima, kako bi na osnovu njih imali uvid u potencijalna predstojeća preopterećenja i blagovremeno pripremili korektivne mere, nameće se zaključak da je bitno da kreirani modeli budu što je moguće vernija slika budućeg stanja sistema. Ono što je izvesno jeste da sam proces prognoziranja proizvodnje, potrošnje, razmena nosi dozu neizvesnosti. Pored toga, u realnom vremenu dolazi do promena proizvodnje i razmena kontrolne oblasti u cilju održavanja mrežne učestanosti. Imajući ovo na umu, opravdano je i logično očekivanje da se prognozirano stanje ne podudara u potpunosti sa realizovanim.

Krajnji cilj ove metodologije je da se na osnovu proračunatih indikatora kvaliteta pronađe odgovarajući trend promene, koji bi se koristio u procesu unapređenja prognoze stanja sistema adekvatnim korigovanjem objedinjenih mrežnih modela. S obzirom na to da je period na koji se odnose grafici prikazani u radu relativno kratak, nezahvalno je na osnovu njih praviti bilo kakve zaključke o trendu promene određenih indikatora kvaliteta. Međutim, ono što je namera autora u sledećem periodu, jeste da koristeći do sada proračunate indikatore kvaliteta pronađe i predloži metodu za unapređenje procesa prognoze, fokusirajući se pre svega na prognozu aktivne snage interkonektivnih dalekovoda.

6 ZAHVALNICA

Rad je deo Horizon 2020 projekta CROSSBOW – *CROSS Border management of variable renewable energies and storage units enabling a transnational Wholesale market* (Grant No. 773430). Ovaj dokument je urađen uz finansijsku pomoć Evropske Unije. Sadržaj ovog dokumenta je isključivo odgovornost autora i ni pod kojim okolnostima se ne može smatrati da odražava stav Evropske Unije.

7 LITERATURA

- [1] “Commission regulation (EU) 2017/1485 of 2 August 2017 establishing a guideline on electricity transmission system operation (SO GL)”, OJ L 220, 25.8.2017, Official Journal of the European Union, Articles 64-71
- [2] Operational Data quality Task Force/SG Network Models and Forecast Tools 2015, “Quality of Datasets and Calculations for System Operation”, 3rd edition, ENTSO-E
- [3] CROSSBOW Project, “D4.2 CROSSBOW Regional Operation Centre Balancing Cockpit (ROC-BC)”, 6/2020
- [4] Hawkins D, “Identification of Outliers”, Chapman and Hall, 1980, London
- [5] Huber P. J. and Ronchetti M. R, “Robust statistics”, 2nd edition, Wiley, 2009, New York
- [6] Leys C. et al, “Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median”, Journal of Experimental Social Psychology, 2013.
- [7] Kyu Lee D. et al, “Standard deviation and standard error of the mean”, Korean Journal of Anesthesiology, 2015.
- [8] Hogg R.V. and Craig A, “Introduction to Mathematical Statistics”, 5th edition, Prentice Hall, 1994, New York.
- [9] Swamidass P.M, “Mean Absolute Percentage Error (MAPE)”, Springer, 2000, Boston.

METHODOLOGY FOR QUALITY CHECK OF COMMON GRID MODELS

ANDRIJANA ĐALOVIĆ^{*1}

ISMAR SINANOVIĆ¹

DUŠAN PREŠIĆ¹

TADEJA BABNIK²

BOJAN MAHKOVEC²

¹Security Coordination Centre SCC Ltd. Belgrade

²ELPROS Electronic and Programming Systems Ltd. Ljubljana

BELGRADE

REPUBLIC OF SERBIA

Abstract— One of the main services delivered by Regional Security Coordinators – RSCs is validation of individual grid models, as well as delivery of common grid models of Continental Europe. Common grid models present starting point for all rest RSC services, given that they are the basis for power flow calculation, security analyses etc.

In the frame of Horizon 2020 project CROSSBOW methodology for quality check of common grid models is developed, basing on the comparisons of forecasted values of voltages, active and reactive power flow with corresponding measured values for the most relevant network elements in the region of South east Europe. For the purpose of this methodology, the dedicated module within CROSSBOW WAMAS product is created.

The aim of this paper is to describe algorithm and architecture of the system that is used for realization of the methodology for quality check of common grid models, to describe quality indicators of common grid models and to show results of the given methodology obtained through developed software tool.

Key words — Common Grid Model, CGM, quality indicators.

* andrijana.djalovic@scc-rsci.com