

Implementacija i benefiti Imbalance netting i Imbalance Netting Optimization Module u elektroenergetskom sistemu Srbije

Vladimir Bečejac^{*,**}, Aleksandar Georgiev^{*}, Milan Trifunović^{*}, Damjan Ilić^{*}

^{*} AD Elektromreža Srbije

^{**} Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu

Rezime - Ovaj rad istražuje implementaciju mehanizma Imbalance Netting u okviru evropskog elektroenergetskog sistema sa fokusom na njegovu primenu u Srbiji. Mehanizam Imbalance Netting omogućava smanjenje aktivacije suprotnih automatskih rezervi (aFRR) putem optimizacije zahteva među operatorima prenosnih sistema (TSO). U radu su predstavljene koristi od primene ovog procesa, uključujući smanjenje troškova, povećanje efikasnosti sistema i unapređenje regionalne saradnje. Analizirani su konkretni primeri simulacija i benefiti za Srbiju. Uvođenje mehanizma ne samo da unapređuje balansiranje mreže, već i doprinosi smanjenju operativnih troškova i povećanju sigurnosti elektroenergetskog sistema Srbije u skladu sa ENTSO-E regulativom.

Ključne reči - Imbalance Netting, aFRR, optimizacija

1 UVOD

U savremenom elektroenergetskom sistemu, balansiranje proizvodnje i potrošnje električne energije predstavlja vitalni izazov za operatore prenosnih sistema (TSO). Debalans između ponude i potražnje može izazvati ozbiljne posledice u radu mreže, što dovodi do dodatnih troškova i smanjenja pouzdanosti snabdevanja električnom energijom [1]. Sa povećanjem uдела obnovljivih izvora energije, posebno vetroelektrana i solarnih elektrana, izazovi balansiranja postaju još izraženiji zbog njihove varijabilnosti i nepredvidivosti proizvodnje. To zahteva efikasnije planiranje i upravljanje balansirnim rezervama, što je potvrđeno i u domaćoj literaturi koja analizira metode za optimalno dimenzionisanje rezervi u uslovima rastućih OIE kapaciteta [2].

Da bi se optimizovao proces balansiranja, razvijeni su različiti mehanizmi, među kojima se posebno izdvaja *Imbalance Netting* (IN). IN je proces koji omogućava operatorima prenosnih sistema da smanje aktivaciju automatske frekvencijske rezerve (aFRR) tj. sekundarne regulacione rezerve putem koordinacije sa susednim operatorima. Ovaj mehanizam doprinosi smanjenju troškova balansiranja, poboljšanju efikasnosti mreže i unapređenju regionalne saradnje među TSO-ima. Evropska iskustva pokazuju da primena IN mehanizma može da dovede do smanjenja ukupne potrebe za aktivacijom rezervi, što donosi značajne finansijske uštede i veću operativnu sigurnost sistema [3].

U Evropi, ovaj proces se realizuje kroz *International Grid Control Cooperation* (IGCC), platformu koja okuplja veliki broj

evropskih operatora prenosnih sistema i omogućava automatizovanu optimizaciju aFRR zahteva u realnom vremenu [4-6]. Razvoj IGCC započeo je 2011. godine kao inicijativa za smanjenje kontraaktivacije aFRR između različitih kontrolnih oblasti.



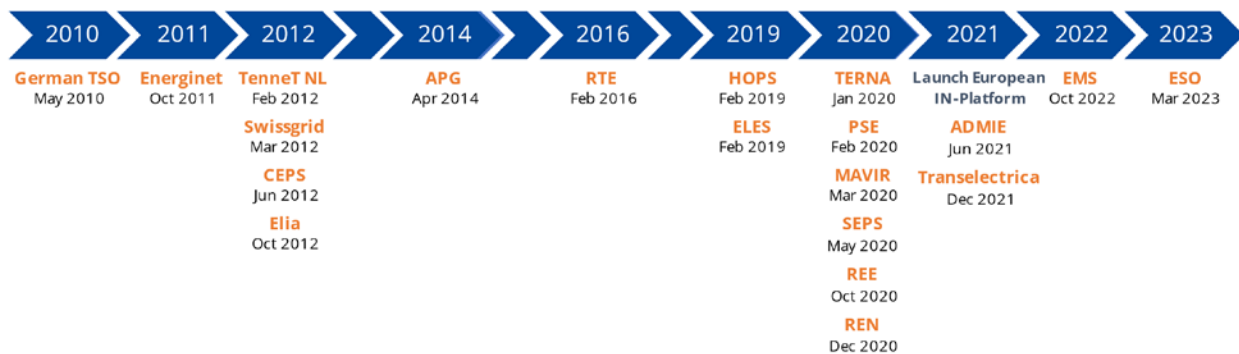
Slika 1. Učesnici IGCC procesa [4]

Prvi učesnici ovog sistema bili su nemački operatori prenosnog sistema, a za poslednjih 14 godina, broj TSO-va je značajno porastao, uključujući operatore iz cele kontinentalne Evrope (CE). Glavni cilj IGCC-a jeste smanjenje nepotrebne upotrebe rezervi i optimizacija korišćenja dostupnih resursa, čime se postiže značajna ušteda u troškovima balansiranja. Na slici 1 se mogu videti zemlje učesnice IGCC procesa.

Srbija je prepoznala važnost ovog procesa i kroz svog operatora prenosnog sistema, Elektromrežu Srbije (EMS) započela proces pridruživanja IGCC-u. EMS je 20. oktobra 2022. godine započeo tehničko učešće, dok je 1. marta 2023. godine postao operativni učesnik IGCC-a. Učešće EMS-a u ovom sistemu omogućava efikasnije upravljanje rezervama i sinhronizaciju balansirnih mehanizama sa susednim državama, čime se povećava sigurnost elektroenergetskog sistema i smanjuju operativni troškovi.

Kako bi se omogućila što efikasnija implementacija ovog procesa, razvijen je *Imbalance Netting Optimization Module* (INOM) u kome učestvuju za sada samo Srbija i Crna Gora. Ovaj modul koristi napredne algoritme optimizacije kako bi izračunao korekcije potrebne za balansiranje sistema i smanjio potrebu za aktivacijom dodatnih rezervi iz Evrope. Na slici 2 je prikazana hronologija pridruživanja TSO-va IGCC procesu.

U daljem tekstu rada, analiziraće ključni aspekti rada IN sistema, njegovu tehničku implementaciju i benefite koje donosi elektroenergetskom sistemu Srbije i Evrope. Biće prikazano kroz primere kako mehanizam funkcioniše. Na kraju, biće sagledane mogućnosti daljeg razvoja i njegovog prilagođavanja budućim zahtevima ENTSO-E regulative.



Slika 2. Hronologija pridruživanja TSO-va IGCC procesu [4]

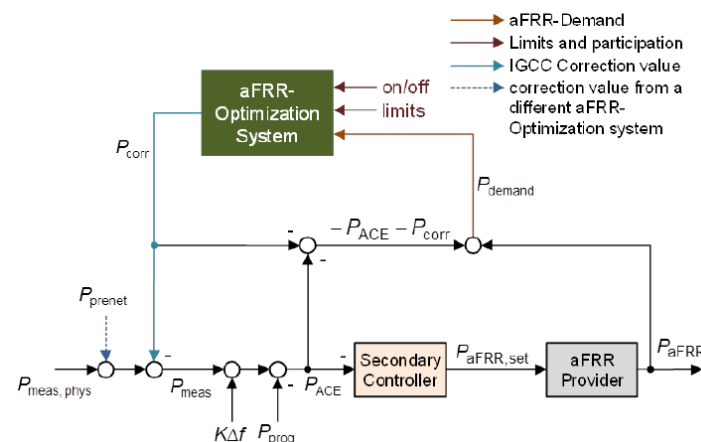
II IMBALANCE NETTING I NJGOV RAD

IGCC se bavi IN procesom. Dodela potencijala za IN među članovima IGCC-a u svakom ciklusu optimizacije u realnom vremenu zasniva se na principima proporcionalne raspodele i nediskriminacije.

Korekcija Članova IGCC-A, koju Izračunava aFRR-Optimization System, integriše se u regulacione petlje aFRR-a kontrolnih oblasti (LFC Area) kojima pripadaju članovi IGCC-a. Osnovni principi aFRR-Optimization System-a su sledeći:

- svaki član IGCC-a izračunava zahtev za aFRR u kontrolnoj oblasti kojoj pripada;
- zahtevi za aFRR i ograničenja prenosa se šalju u aFRR-Optimization System;
- aFRR-Optimization System izračunava korekcije uz poštovanje postavljenih ograničenja;
- izračunate korekcije se šalju članovima IGCC-a i koriste se kao ulazni podaci za regulacione petlje aFRR-a u njihovim kontrolnim oblastima.

Slika 3 prikazuje integraciju aFRR-Optimization System-a u sekundarnu regulacionu petlju člana IGCC-a. Tačna implementacija u SCADA sistemu pojedinačnog člana IGCC-a može se razlikovati, sve dok se poštuje kontrolna struktura prikazana na slici 3.



Slika 3. Integracija aFRR-Optimization System

Posebno, sledeće jednačine moraju biti ispunjene, jer prikazuju

ACE (Area Control Error) jednog TSO-a, smanjen za vrednost korekcije dobijene kroz IN, kao i aFRR-Demand, koji predstavlja ukupnu neravnotežu koju je potrebno pokriti aFRR aktivacijom:

$$P_{ACE} = P_{meas} - P_{prog} + K \cdot \Delta f - P_{corr}$$

$$P_{Demand} = P_{aFRR} - P_{ACE} - P_{corr}$$

gde su:

P_{ACE} - Greška u kontroli oblasti nakon korekcije kroz IN,

P_{meas} - izmerena razmena snage kontrolne oblasti,

P_{prog} - planirana razmena snage,

$K \cdot \Delta f$ - komponenta frekvencijske regulacije,

P_{corr} - korektivna snaga preneti kroz IGCC,

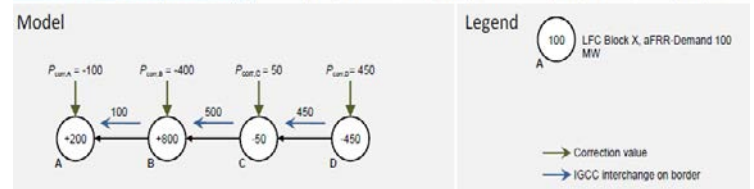
P_{Demand} - konačan zahtev za aFRR aktivacijom nakon primene korekcije,

P_{aFRR} - aktivirana automatska frekvencijska rezerva,

P_{ACE} - greška kontrole oblasti,

P_{corr} - korekcija kroz IN.

LFC Block	A	B	C	D
aFRR-Demand [MW]	200	800	-50	-450
Share of Total Positive Demand [pu]	$200/(200+800) = 0.2$	$800/(200+800) = 0.8$	n/a	n/a
Share of Total Negative Demand [pu]	n/a	n/a	$-50/(-50+(-450)) = 0.1$	$-450/(-50+(-450)) = 0.9$
Correction - Optimisation Target [MW]	$-0.2 \cdot 500 = -100$	$-0.8 \cdot 500 = -400$	$0.1 \cdot 500 = 50$	$0.9 \cdot 500 = 450$
Correction Value (Optimisation Result) [MW]	-100	-400	50	450
Remaining aFRR-Demand [MW]	$200+(-100) = 100$	$800+(-400) = 400$	$-50+50 = 0$	$-450+450 = 0$
Deviation from Target [MW]	$-100-(-100) = 0$	$-400-(-400) = 0$	$50-50 = 0$	$450-450 = 0$
Deviation/aFRR Demand (Absolute Value) [pu]	$ 0/200 = 0$	$ 0/800 = 0$	$ 0/50 = 0$	$ 0/450 = 0$



Slika 4. Izračunavanje vrednosti korekcije bez ograničenja

Slika 4 ilustruje izračunavanje vrednosti korekcije (correction values) bez ograničenja. Kontrolne oblasti LFC A i B imaju deficit snage (short) u ukupnom iznosu od 1000 MW, dok oblasti LFC C i D imaju višak snage (long) od -500 MW. Cilj optimizacije je potpuno netiranje (poništanje) aFRR zahteva oblasti C i D i proporcionalna raspodela netovanja za oblasti A i B u skladu sa njihovim udelom u ukupnom pozitivnom aFRR-Demand. Pošto ne postoje ograničenja prenosa ili drugih tehničkih limita, cilj optimizacije se u potpunosti postiže i odstupanje od optimalnog rešenja je nula. To znači da se zahtevi

za balansiranjem u kontrolnim oblastima efikasno međusobno poništavaju, smanjujući potrebu za dodatnom aktivacijom aFRR rezervi i time optimizujući rad elektroenergetskog sistema.

Razmena snage između LFC blokova se sprovodi u skladu sa definicijama ENTSO-E za virtuelne *tie-line* veze (kako je definisano u ENTSO-E RGCE *Operation Handbook*, Policy 1, B-D6.2 i u SO GL, Član 3). LFC oblast može biti deo različitih saradnji vezanih za aFRR. Konkretno, LFC oblast može biti deo Optimizacionog regiona i izvršavati pre-netiranje neravnoteža sa LFC oblastima koje nisu deo IGCC-a. U tom slučaju, odgovarajuća vrednost korekcije (P_{predit}) tretira se na isti način kao i druge *tie-line* veze koje su deo izračunavanja ACE-a.

Određivanje IGCC količina energije vrši se za svaki obračunski period (15 minuta). IGCC količine energije za svakog IGCC člana i svaki obračunski period sastoje se od dve vrednosti: IGCC uvoz i IGCC izvoz tog člana.

Sve granice između IGCC članova moraju biti deo IGCC-a. Isključenje granice je moguće u sledećim slučajevima:

- Isključenje granice može biti neophodno zbog pravila ENTSO-E ili regulatorne odluke (može biti jednostrano, bilateralno ili regionalno, u zavisnosti od konkretne granice).
- Granica između IGCC članova može biti isključena jednostranom odlukom jednog od uključenih IGCC članova u slučaju očekivanih operativnih ili tehničkih problema ili značajnih negativnih efekata u smislu troškova i koristi, pri čemu ti razlozi moraju biti transparentno predstavljeni drugim IGCC članovima.
- Granica između IGCC članova može biti isključena ili uključena na osnovu njihovog bilateralnog dogovora, a razlozi za to moraju biti transparentno predstavljeni ostalim IGCC članovima.

Principi ograničenja

Svi IGCC članovi sarađuju na implementaciji ograničenja kako bi se osigurala operativna sigurnost i transparentnost informacija vezanih za odgovarajuće operativne procedure i metodologije. Domaćin TSO implementira ograničenja u aFRR-*Optimization System*. Tri vrste ograničenja se kombinuju i koriste od strane IGCC algoritma u realnom vremenu:

- ATC ograničenja (podrazumevana ograničenja),
- profilna ograničenja,
- ograničenja zasnovana na protoku.

Ta ograničenja se uzimaju u obzir u realnom vremenu kao granični uslovi u IGCC algoritmu kako bi se osiguralo da izračunate korekcije svakog IGCC člana poštuju i istovremeno garantuju sva ta ograničenja. IGCC članovi koji dele zajedničku granicu moraju se dogovoriti o obezbeđivanju ATC ograničenja za aFRR-*Optimization System* i imenovati najmanje jednog od dva IGCC člana kao odgovornog za implementaciju neophodne razmene podataka u saradnji sa domaćinom TSO. U slučaju da oba IGCC člana dostave vrednosti za ATC ograničenja iste zajedničke granice ili ograničenja zasnovana na protoku za isti tok, aFRR-*Optimization System* će koristiti najmanju od obe vrednosti kao ulaz za izračunavanje korekcija. Primer za određivanje ograničenja je predstavljen u Tabeli 1.

Tabela 1. Primer za određivanje ograničenja

Ograničenje	Pravac	Vrednost
Definisano od A	od A ka B	50 MW
Definisano od A	od B ka A	110 MW
Definisano od B	od A ka B	40 MW
Definisano od B	od B ka A	20 MW
Korišćeno u aFRR-optimizaciji	od A ka B	min (50 MW, 40 MW)=40 MW
Sistem	od A ka B	min (110 MW, 200 MW)=110 MW

ATC-Ograničenja

Podrazumevana ograničenja za razmenu IN na relevantnoj granici između dva člana IGCC-a predstavljaju preostali prekogranični prenosni kapacitet određen nakon zatvaranja intraday prekograničnog tržišta i uzimaju u obzir razmenu balansne energije, npr. aFRR, mFRR, RR ili drugih rezervi na zajedničkoj granici ili profilu (npr. Srbija - Mađarska ili Mađarska - Austrija). Ovo predstavlja preostali dostupni prenosni kapacitet (ATC) za IGCC u realnom vremenu, koji se može koristiti za održavanje rezultujuće IGCC razmene i korekcija unutar domena operativne sigurnosti.

Kako bi se osigurala operativna sigurnost, IGCC razmena između LFC oblasti članova IGCC-a biće ograničena prema dogovorenim pravilima, koja mogu biti definisana dodatno u odnosu na podrazumevana ograničenja.

Profilno ograničenje (Profile-Limit)

Profilno ograničenje predstavlja ograničenje ukupne IGCC razmene jedne LFC oblasti (ukupan uvoz ili izvoz). Svaki član IGCC-a ima pravo da ograniči svoje učešće na dostupni kapacitet aFRR-a. Takvo dodatno ograničenje može biti definisano i korišćeno od strane člana IGCC-a. Članovi IGCC-a imaju mogućnost da ručno smanje takvo ograničenje u određenim situacijama (npr. u vanrednim situacijama) kako bi mogli da smanje sopstveno učešće u IGCC-u.

Ograničenje zasnovano na Flow-Based limitu

Ograničenje zasnovano na *Flow-Based* limitu [7, 8] označava ograničenje snage koju IGCC razmena može izazvati na kritičnoj grani ili prenosnom koridoru (skupu kritičnih grana) unutar LFC oblasti ili između LFC oblasti. U slučajevima kada prenosni kapacitet za IGCC razmenu nije ograničen eksplicitnim ili implicitnim postupkom dodele na relevantnoj granici, IGCC članovi treba da se dogovore o podrazumevanim vrednostima *Flow-Based Limits*, koje odražavaju razuman opseg razmene na jednom koridoru ili protoka snage na kritičnoj grani (npr. 2000 MW između nemačkih LFC oblasti). Ograničenja zasnovana na protoku koriste nemački IGCC članovi kako bi očuvali operativnu sigurnost smanjenjem fizičkih protoka nastalih usled IGCC razmene na prenosnim koridorima u Nemačkoj. Ova ograničenja mogu uticati na IGCC razmenu u skladu sa principima opisanim u ovom odeljku. Trenutno, ograničenja zasnovana na protoku nisu primenjena na prenosne koridore drugih IGCC članova, ali postoje rasprave unutar saradnje o mogućnosti proširenja njihove upotrebe na sve IGCC članove.

Matrica MPTDF [9] koristi se za predstavljanje uticaja IGCC razmene na protok opterećenja preko identifikovanih kritičnih

grana ili prenosnih koridora. Faktor raspodele prenosa snage (PTDF - *Power Transfer Distribution Factor*) kvantifikuje uticaj IGCC razmene između LFC oblasti na određeni element mreže C (kritična grana ili prenosni koridor). U ovom okviru, PTDF od 10% znači da povećanje razmene od 100 MW iz A u B izaziva povećanje od 10 MW na mrežnom elementu C.

Za Nemačku, PTDF faktori koji čine matricu MPTDF predstavljaju varijaciju fizičkog protoka na kritičnim granama izazvanu promenom korekcije svakog IGCC člana. Kao ilustracija, matrica MPTDF, koja prikazuje uticaj IGCC razmene na protok opterećenja preko kritičnih grana C1 i C2, definisana je u tabeli 2.

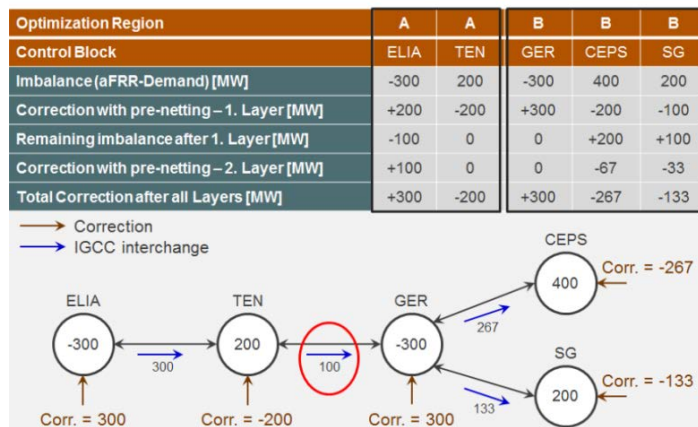
Tabela 2. Osetljivost kritičnih grana na IGCC izvoz

kritična grana	osetljivost na IGCC izvoz		
	A	B	C
C1	-0.2	0.6	0.2
C2	0	-0.4	0.4

III PRE-NETIRANJE I OPTIMIZACIONI REGIONI

Svaki član IGCC-a ima pravo da izvrši pre-netiranje (preliminary netting) svojih neravnoteža u okviru Optimizacionog regiona (*optimization region*), koji može uključivati LFC blokove unutar IGCC-a, ali i u saradnji sa LFC blokovima koji nisu deo IGCC-a.

Slika 5 ilustruje kako se vrednosti korekcije računaju bez ograničenja kada su prepoznata dva Optimizaciona regiona (A i B). U prvom koraku, neravnoteže se najpre poništavaju unutar svakog Optimizacionog regiona. Zatim, u drugom sloju netiranja, preostale neravnoteže svih članova IGCC-a se zajednički netiraju.



Slika 5. Računanje vrednosti korekcije bez ograničenja kada su prepoznata dva Optimizaciona regiona

Pravila za učestvovanje u Optimizacionom regionu IGCC-a

Kako bi član IGCC-a mogao da učestvuje u Optimizacionom regionu, mora ispuniti sledeće uslove:

- Implicitno IN (npr. zajednička merit-order lista za aFRR) između dva ili više LFC blokova koji učestvuju u IGCC-u smatra se IN procesom.
- Svaki LFC blok unutar IGCC-a može imati samo jedno IN povezivanje sa drugim LFC blokovima IGCC-a, koje

prethodi sveukupnom netiranju među svim LFC blokovima IGCC-a.

- Svaki LFC blok u IGCC-u može učestvovati u jednoj dodatnoj IN saradnji van IGCC-a.

Članovi IGCC-a mogu menjati svoju participaciju u Optimizacionom regionu. Njihovo učešće je dobrovoljno, ali sistem za optimizaciju aFRR-a (*aFRR-Optimization System*) mora biti prilagođen u skladu sa definisanim Optimizacionim regionima.

Tehnički i ekonomski aspekti pre-netiranja

IGCC operatori su analizirali kako pre-netiranje može uticati na tehničke i ekonomske aspekte IN procesa u Evropi.

Tehnički aspekti su:

- optimizacioni regionu su uvedeni da bi omogućili učestvovanje različitih inicijativa u IGCC procesu,
- pre-netiranje može dovesti do neproporcionalne raspodele netirajućeg potencijala, iako je ukupna količina netiranih neravnoteža ista, bez obzira na pre-netiranje,
- u pogledu operativne sigurnosti, pre-netiranje može smanjiti fizičke tokove, ali to ne važi uvek, pa nije u svim slučajevima najefikasnije rešenje,
- kada operatori sistema rade zajedničko dimenzionisanje (LFC Block), pre-netiranje je neophodno kako bi se obezbedio pristup prenosnim kapacitetima za aFRR aktivaciju,
- ako TSO-ovi sprovedu prekograničnu zajedničku aktivaciju aFRR (aFRR CoBA), pre-netiranje može omogućiti prioritetan pristup prenosnim kapacitetima, pri čemu bi se formirao Optimizacioni region.

Ekonomski aspekti su:

- proporcionalna raspodela netirajuće energije (pro-rata alokacija) ne uzima u obzir troškove balansiranja i zbog toga ne dovodi nužno do optimalnog društvenog benefita za celokupan IN proces,
- implicitno pre-netiranje u okviru aFRR-CoBA može dovesti do neproporcionalne raspodele netiranja u korist aFRR-CoBA,
- međutim, unutar aFRR-CoBA, netovana energija se raspoređuje na osnovu troškova balansne energije (socijalno optimalno rešenje), što znači da bi proporcionalna alokacija smanjila ukupni benefit aFRR-CoBA.

IV OPERATIVNI PROCESI U IGCC SISTEMU

Prava članova IGCC-a na obustavu ili ograničenje učešća

Svaki član IGCC-a ima pravo da privremeno obustavi ili ograniči svoje učešće u IGCC procesu. Takođe, može ograničiti razmenu snage sa jednim ili više susednih članova IGCC-a ili ograničiti protok snage kroz svoju mrežu u sledećim slučajevima:

- radi operativne sigurnosti, ako se proceni da bi dalja razmena ugrozila stabilnost mreže,
- zbog tehničkih problema, kao što su:
 - o veliki problemi unutar LFC oblasti (npr. lokalni priklidi struje ili podela mreže).
 - o održavanje ili kvar IT sistema koji su povezani sa

IGCC-om,

- o problemi sa određivanjem operativnih vrednosti, kao što su aFRR zahtevi ili ograničenja,
- o problemi sa sigurnošću sistema, uključujući visoke fizičke protoke u LFC oblasti ili na granicama između članova IGCC-a,
- usklađivanje sa zahtevima regulatornih tela ili drugim nacionalnim obavezama koje mogu ograničiti učešće u IGCC-u.

Ekonomska optimizaciju nije moguće koristiti kao razlog za obustavu ili ograničenje učešća u IGCC procesu.

Ako član IGCC-a odluči da obustavi ili ograniči svoje učešće, dužan je da objasni razloge u roku od 14 dana po zahtevu drugih članova IGCC-a. Ako se takva obustava ponavlja, ostali IGCC članovi imaju pravo da predlože prilagođavanje sistema kako bi se izbegle dalje neregularnosti.

Odgovornost za operativno upravljanje IGCC sistemom

Svaki član IGCC-a je potpuno odgovoran za:

- operativno upravljanje i sigurnost snabdevanja u svojoj LFC oblasti,
- tačnost i kvalitet podataka koji se šalju u aFRR-Optimization System.

IGCC razmena snage između LFC oblasti ne garantuje isporuku balansne energije, već funkcioniše kao optimizovana koordinacija među članovima. Pri tome, svaki IGCC član mora uzeti u obzir:

- promenljivost IGCC razmene - fluktuacije u korekcijama mogu uticati na balansiranje,
- mogućnost iznenadne obustave učešća - npr. zbog problema u vezi,
- uticaj netačnih aFRR zahteva ili pogrešno definisanih ograničenja.

Ručno menjanje korekcija u IGCC sistemu nije dozvoljeno, jer bi to moglo dovesti do nesklada u ukupnim korekcijama među članovima. Pravilo je da zbir svih korekcija između IGCC članova u svakom trenutku mora biti nula 20161020_IGCC_Stakehold....

Automatska redukcija ili suspenzija učešća zbog problema u aFRR-Optimization System-u

IGCC član može biti automatski isključen iz IGCC-a ako:

- aFRR-Demand signal nije isporučen ili je označen kao nevalidan,
- aFRR-Demand signal ostaje nepromenjen duže od dogovorenog perioda, čak i ako je validan,
- ATC ograničenja nisu dostavljena ili su neispravna, što može dovesti do toga da sistem automatski primeni poslednju dostupnu vrednost ili postavi ograničenje na nulu.

U slučaju problema sa ograničenjima prenosa (ATC Limits), postupak rešavanja zavisi od scenarija:

- ako dva IGCC člana pružaju različite vrednosti za istu granicu, koristi se poslednja ispravna vrednost,
- ako nijedan član ne dostavi ispravne vrednosti, ograničenje se automatski postavlja na nulu kako bi se sprečili rizici po mrežu.

Domaćin TSO (*Host TSO*) može ručno isključiti člana IGCC-a na njegov zahtev, a zatim je dužan da telefonski obavesti isključenog IGCC člana.

V PRINCIPI PORAVNANJA (SETTLEMENT PRINCIPLES) U IGCC PROCESU

Cilj poravnanja

Osnovna ideja IGCC poravnanja je fer raspodela koristi među članovima IGCC-a. Svaki član IGCC-a doprinosi procesu IN-a, smanjujući potrebu za aktivacijom aFRR (*Automatic Frequency Restoration Reserve*), čime ostvaruje finansijske i operativne koristi.

Poravnanje se sprovodi za svaki obračunski period od 15 minuta, gde se za svakog člana IGCC-a izračunavaju dve ključne vrednosti:

- IGCC uvoz (IGCC import),
- IGCC izvoz (IGCC export).

Na osnovu ovih vrednosti, IGCC koristi algoritam za izračunavanje cena poravnanja, što omogućava fer raspodelu benefita među učesnicima.

Računanje cena poravnanja

Cena poravnanja u IGCC-u zasniva se na *Opportunity Price* metodologiji, pri čemu svaki IGCC član prijavljuje svoje cene izbegnutih aFRR troškova. Ove cene odražavaju vrednost energije koja nije morala biti aktivirana zahvaljujući IN procesu.

Metodologija izračunavanja *Opportunity Prices* varira među članovima IGCC-a, ali se generalno harmonizuje kako bi se osiguralo pošteno i ujednačeno poravnanje. Cene se obično baziraju na tržišnim troškovima aFRR energije, uz moguće regulatorna prilagođenja.

Primer finansijskih koristi IGCC-a

Konkretni primer koristi od učestvovanja u IGCC procesu:

- bez IGCC-a: Član mora da aktivira 100 MWh aFRR po ceni 50 €/MWh, što rezultira ukupnim troškom od 5000 €,
- sa IGCC-om: Zahvaljujući optimizaciji, potreba za aFRR aktivacijom se smanjuje na 60 MWh, a prosečna cena opada na 45 €/MWh, smanjujući ukupan trošak na 2700 €.
- ukupna ušteda iznosi 2300 €, podeljena na dva efekta:
 1. komponenta energije (smanjenje aktivacije aFRR) → 2000 €
 2. komponenta cene (smanjenje prosečne cene aFRR) → 300 € 20161020_IGCC_Stakehold....

Ova ušteda pokazuje da IGCC ne samo da smanjuje potrebu za rezervama, već i omogućava niže tržišne cene balansiranja.

Izračunavanje konačnog iznosa poravnanja

IGCC sistem koristi sledeću formulu za računanje cene poravnanja:

$$P_{IGCC}(t) = \frac{\sum_{m=1}^M E_{Imp}(t,m) \cdot C_{Imp}(t,m) + \sum_{m=1}^M E_{Exp}(t,m) \cdot C_{Exp}(t,m)}{\sum_{m=1}^M E_{Imp}(t,m) + \sum_{m=1}^M E_{Exp}(t,m)}$$

gde su:

$E_{Imp}(t, m)$ - IGCC uvoz za člana m u vremenskom periodu t (izražen u MWh),

$E_{Exp}(t, m)$ - IGCC izvoz za člana m u periodu t (izražen u MWh),

$C_{Imp}(t, m)$ - Opportunity Price za uvoz člana m u periodu t (€/MWh).

$C_{Exp}(t, m)$ - Opportunity Price za izvoz člana m u periodu t (€/MWh).

Ova formula osigurava da svi IGCC članovi dobijaju pravednu nadoknadu na osnovu njihovog učešća u procesu balansiranja.

Problemi i prilagođavanja u sistemu poravnanja

Kako se broj IGCC učesnika povećava, dolazi do većih razlika u cenama Opportunity Prices između članova. To je dovelo do diskusija o tome kako raspodeliti koristi i da li je potrebno redistribuirati benefite kako bi se osigurala ravnopravnost.

Jedan od problema koji se javlja je mogućnost da pojedini članovi imaju negativne benefite, dok je ukupni benefit IGCC-a pozitivan. Ovo se dešava kada član mora da plati IGCC cenu poravnanja koja premašuje njegovu lokalnu Opportunity Price.

Trenutni sistem poravnanja

Kako bi se izbegli negativni benefiti, uveden je Ex-Post sistem prilagođavanja, gde se vrši redistribucija poravnatih iznosa:

- članovi sa negativnim benefitima redistribuiraju svoje gubitke članovima sa pozitivnim benefitima,
- članovi sa pozitivnim benefitima umanjuju svoje zarade proporcionalno,
- članovi sa nultim energetske bilansom (uvoz = izvoz) isključeni su iz ovog procesa

Ovo osigurava da nijedan član IGCC-a ne trpi direktne gubitke, dok celokupni sistem ostaje ekonomski isplativ.

Budući koraci u razvoju IGCC sistema poravnanja

U okviru IGCC-a razmatrane su nove metode poravnanja, uključujući:

1. jednak benefit za sve članove - proporcionalna raspodela ukupnih ušteda među svim članovima,
2. referentnu cenu - vezivanje IGCC cena za spot tržište ili fiksne cene svake države,
3. decoupling od aFRR tržišta - razvoj zasebnog IGCC tržišta koje ne zavisi od cena lokalnih aFRR tržišta.

IGCC članovi su zaključili da je potrebno dalje istražiti ekonomski i regulatorni uticaj ovih opcija, dok će trenutni sistem ostati na snazi do daljih analiza.

VI IMBALANCE NETTING OPTIMIZATION MODULE (INOM)

Imbalance Netting Optimization Module (INOM) je optimizacioni modul dizajniran za automatsku raspodelu debalansa između operatora prenosnih sistema (TSO-ova), kako bi se smanjila potreba za aktivacijom balansnih rezervi u suprotnim smerovima. Ovaj proces omogućava optimizovanu koordinaciju između EMS (Elektromreže Srbije) i CGES (Crnogorskog elektroprenosnog sistema), čime se postiže efikasnija upotreba sekundarne regulacije i smanjenje operativnih troškova.

INOM je deo SCADA/EMS sistema u nacionalnim dispečerskim centrima i koristi automatizovane algoritme za optimizaciju aktivacije sekundarnih rezervi u realnom vremenu. Ključna prednost ovog modula je u tome što omogućava dinamičko netiranje odstupanja, čime se smanjuje ukupna potreba za rezervama i optimizuje stabilnost mreže.

Suštinska razlika u INOM i IGCC procesu je ta što se u prvoj iteraciji posmatraju samo TSO-vi Srbije (EMS) i Crne Gore (CGES), a nakon toga dolazi IGCC proces u drugoj iteraciji gde učestvuju svi TSO-vi (lista učesnika je data na slici 1).

Sistem funkcioniše kroz razmenu podataka između EMS i CGES-a, pri čemu svaka regulaciona oblast u realnom vremenu prenosi sledeće ključne parametre:

- ACE - regulaciona greška oblasti pre korekcije.
- P_{corr} - korektivni signal koji modul optimizacije izračunava kako bi se ACE smanjio.
- P_{DEM} - zahtev za sekundarnom regulacijom.
- ATC (*Available Transfer Capacity*) - preostali raspoloživi kapacitet prenosa između EMS-a i CGES-a.

Proces rada INOM-a se odvija u nekoliko koraka:

1. Prikupljanje ACE vrednosti iz EMS i CGES sistema - svaka regulaciona oblast dostavlja svoje podatke o trenutnom stanju regulacije.
2. Izračunavanje korekcija P_{corr} - na osnovu prijavljenih ACE vrednosti i dostupnih kapaciteta prenosa (ATC), INOM modul određuje optimalne korekzione vrednosti koje minimizuju potrebu za dodatnom aktivacijom sekundarne regulacije.
3. Primena korekcija na kontrolne sisteme EMS-a i CGES-a - korektivne vrednosti se vraćaju u SCADA/EMS sistem i primenjuju se na regulacione elektrane kako bi se ispravila greška u balansiranju.
4. Kontinuirana optimizacija u realnom vremenu - sistem neprekidno ažurira ACE i P_{corr} kako bi obezbedio optimalne korekcije u svakom trenutku.

Optimizacija i prilagođavanje prenosa snage

Jedan od ključnih izazova u INOM procesu je ograničenost prenosa snage između Srbije i Crne Gore, što znači da optimizacija mora uzeti u obzir dostupne ATC limite. Ako je dostupni kapacitet nedovoljan, algoritam prilagođava korekcije tako da ne dođe do preopterećenja interkonektivnih dalekovoda.

Matematički model za korekciju ACE vrednosti definisan je sledećom jednačinom:

$$ACE_{k,i} = ACE_i - P_{corr,i}$$

gde su:

$ACE_{k,i}$ - korekcija regulacione greške nakon optimizacije,
 ACE_i - početna vrednost regulacione greške pre optimizacije,
 $P_{corr,i}$ - korektivni signal izračunat optimizacijom netiranja debalansa.

Pored toga, dodatna razmena snage između Srbije i Crne Gore mora zadovoljiti ATC ograničenja:

$$-ATC_{j,i} \leq P_{i,j} \leq ATC_{i,j}$$

što znači da razmena energije između dve oblasti ne može preći dozvoljeni limit prenosa.

VII ZAKLJUČAK

Implementacija *Imbalance Netting* (IN) mehanizma i Imbalance Netting Optimization Module (INOM) u elektroenergetskom sistemu Srbije predstavlja značajan korak ka unapređenju efikasnosti balansiranja i pouzdanosti rada prenosne mreže. Analizirani principi i primeri pokazuju da uvođenje IN procesa omogućava smanjenje ukupne potrebe za aktivacijom automatskih frekvencijskih rezervi (aFRR), čime se postižu direktne finansijske uštede i povećava operativna sigurnost sistema.

Prikazani su konkretni benefiti, poput optimizacije korišćenja rezervi kroz koordinisanu razmenu sa susednim operatorima i integraciju u panevropsku IGCC platformu. Posebno je značajna uloga INOM-a, koji kroz napredne algoritme omogućava dinamičku raspodelu debalansa i još efikasnije upravljanje rezervama na regionalnom nivou, uzimajući u obzir stvarne prenosne kapacitete i operativna ograničenja.

Očekuje se da će dalji razvoj i proširenje ovih mehanizama, uz kontinuirano praćenje evropskih standarda i saradnju sa susednim TSO-ima, doprineti još većoj stabilnosti, smanjenju troškova i boljoj integraciji obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sistem Srbije. Time se potvrđuje strateški značaj modernizacije balansnih procesa i implementacije inovativnih rešenja u skladu sa savremenim zahtevima tržišta i regulative.

LITERATURA

- [1] Bakker, W., Lampropoulos, I. The Cost Reduction Potential of Demand Response in Balancing Markets from a System Perspective, *Energies*, Vol. 17, No. 12, pp. 2817, 2024. <https://doi.org/10.3390/en17122817>
- [2] Radovanović, M., Đurišić, Ž. Optimalno planiranje balansne rezerve za pokrivanje debalansa u proizvodnji vetroelektrana u Južnom

Banatu, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 4, pp. 38-46, 2022.

<https://doi.org/10.46793/EEE22-4.38R>

- [3] Lorenz, C., Gerbaulet, C. New cross-border electricity balancing arrangements in Europe, DIW Discussion Papers No. 1400, 2014. <https://www.econstor.eu/handle/10419/103359> [pristupljeno 08.02.2025]
- [4] Imbalance Netting, https://www.entsoe.eu/network_codes/eb/imbalance-netting/ [pristupljeno 08.02.2025]
- [5] ENTSO-E RGCE Operation Handbook
- [6] Stakeholder document for the principles of IGCC https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/clean-documents/Network%20codes%20documents/Implementation/IGCC/20161020_IGCC_Stakeholder_document.pdf [pristupljeno 08.02.2025]
- [7] Bjorndal, E., Bjorndal, M.H., Cai, H. Flow-based market coupling in the european electricity market-a comparison of efficiency and feasibility, NHH Dept. of Business and Management Science Discussion Paper, No. 2018/14, 2018. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3272188 [pristupljeno 08.02.2025]
- [8] Schönheit, D. et al. Toward a fundamental understanding of flow-based market coupling for cross-border electricity trading, *Advances in Applied Energy*, Vol. 2, 100027, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100027>
- [9] Ogawa, T., Shuichi, K., Iwamoto, S. Transmission line loss allocation using power flow tracing with distribution factors, in *Proc. 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Tampa, FL, USA, 24-28, June 2007. <https://doi.org/10.1109/PES.2007.385930>

AUTORI

dr Vladimir Bečejac - doktor elektrotehnike i računarstva, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu i EMS AD, vladimir.becejac@ems.rs, ORCID [0000-0002-2679-9354](https://orcid.org/0000-0002-2679-9354)

Aleksandar Georgiev - diplomirani inženjer elektrotehnike i računarstva, EMS AD, aleksandar.georgiev@ems.rs, ORCID [0009-0007-6372-9615](https://orcid.org/0009-0007-6372-9615)

msr Milan Trifunović, master inženjer elektrotehnike i računarstva, EMS AD, milan.trifunovic@ems.rs, ORCID [0009-0009-5734-1627](https://orcid.org/0009-0009-5734-1627)

Damjan Ilić - diplomirani inženjer elektrotehnike i računarstva, EMS AD, damjan.ilic@ems.rs, ORCID [0009-0001-6477-4115](https://orcid.org/0009-0001-6477-4115)

Implementation and Benefits of Imbalance Netting and the Imbalance Netting Optimization Module in the Power System of Serbia

Abstract – This paper explores the implementation of the Imbalance Netting mechanism within the European power system, with a focus on its application in Serbia. The Imbalance Netting mechanism enables the reduction of opposing automatic Frequency Restoration Reserves (aFRR) activation by optimizing requests among Transmission System Operators (TSOs). The paper presents the benefits of applying this process, including cost reduction, increased system efficiency, and improved regional cooperation. Specific simulation examples and benefits for Serbia are analyzed. The introduction of this mechanism not only enhances grid balancing but also contributes to reducing operational costs and improving the security of Serbia's power system in compliance with ENTSO-E regulations.

Index terms – Imbalance Netting, aFRR, optimization