

Čezmejna trgovalna platforma s sistemskimi storitvami ročne rezerve za povrnitev frekvence

Jan Jeriha¹, Edin Lakić¹, Matej Pečjak¹, Andrej F. Gubina¹

¹ – Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana
jan.jeriha@fe.uni-lj.si edin.lakic@fe.uni-lj.si matej.pecjak@fe.uni-lj.si andrej.gubina@fe.uni-lj.si

Povzetek – Nabor produktov, ki so bili zasnovani in razviti v evropskem projektu CROSSBOW, je namenjen sistemskim operaterjem prenosnega omrežja in omogoča večjo integracijo obnovljivih virov energije (OVE) v omrežje ter nižje stroške delovanja. V prispevku je predstavljena inovativna rešitev, ki predstavlja del trga s sistemskimi storitvami za zagotavljanje izravnalne energije. Potrebna je za vzdrževanje ravnotežja med proizvodnjo in porabo električne energije ter učinkovitejšo izrabo čezmejnih prenosnih zmogljivosti (ČPZ). Predstavljena rešitev je prototip trgovalne platforme, ki temelji na čezmejnem upravljanju energije iz spremenljivih OVE in hranilnikov energije in omogoča trgovanje na veleprodajnem trgu.

Trgovalna platforma CROSSBOW predstavlja programsko opremo, na kateri se izvaja trgovanje na izravnalnem trgu za produkt ročne rezerve za povrnitev frekvence. Na trgovalni platformi se vsakih 15 minut izvede avkcija na podlagi algoritma za optimizacijo aktivacij. Glavna kriterijska funkcija algoritma je optimizacija družbene blaginje, ki omogoča najnižje možne stroške izravnave. Prispevek predstavi primer delovanja optimizacijskega algoritma in izračuna družbene blaginje.

Ključne besede: izravnalni trgi, regionalni izravnalni trgi, souporaba izravnalne energije, Evropski projekt CROSSBOW, družbena blaginja

CROSS-BORDER TRADING PLATFORM FOR MANUAL FREQUENCY RESTORATION RESERVE

Abstract – CROSSBOW is a TSO driven Horizon 2020 European project in which project partners designed and developed a set of products aimed at enabling greater integration of renewable energy sources (RES) into the power grid and thus decrease operational costs. This paper presents an innovative solution for the cross-border energy balancing market that improves the procurement of the balancing energy, which is necessary to maintain the balance between the production and consumption in the system, as well as provide a more efficient allocation of cross-zonal capacities. The presented solution is a prototype of the trading platform on which trading on the balancing energy market is performed for the product of the manual frequency restoration reserve. Every 15 minutes, an auction based on the activation optimization algorithm is performed on the trading platform. The main criterion of the algorithm is the maximization of the social welfare, which enables the lowest possible balancing energy costs. This paper presents an example of the optimization algorithm operation and social welfare calculation.

Keywords: balancing energy market, regional balancing market, common usage of balancing reserve, European project CROSSBOW, social welfare

1 UVOD

1.1. Evropski projekt CROSSBOW

Evropski projekt CROSSBOW [1] (angl. *CROSS Border management of variable RES and storage units enabling transnational Wholesale market*) temelji na čezmejnem upravljanju energije iz spremenljivih obnovljivih virov energije (OVE) in hranilnikov energije, ki omogoča trgovanje na veleprodajnem trgu. Projekt je osredotočen na reševanje trenutnih in prihajajočih izzivov sistemskih operaterjev prenosnega omrežja (SOPO) iz držav jugovzhodne Evrope (JVE) – Bolgarije (BG), Bosne in Hercegovine (BA), Črne Gore (ME), Grčije (GR), Hrvaške (HR), Severne Makedonije (MK), Romunije (RO) in Srbije (RS). Za uresničitev zastavljenih ciljev v projektu, bodo partnerji razvili nabor produktov, ki omogoča večjo integracijo OVE v omrežje in s tem znižujejo stroške delovanja in vodenja elektroenergetskih sistemov. Za razvoj enega izmed devetih produktov v projektu je zadolžena združena ekipa Fakultete za elektrotehniko in Fakultete za računalništvo Univerze v Ljubljani. V sklopu produkta, *Nabor orodij za veleprodajni trg in trg sistemskih storitev* (angl. *Wholesale and Ancillary Market Toolset*), bodo razvita naslednja orodja:

- **Čezmejna trgovalna platforma za produkt ročne rezerve za povrnitev frekvence** (angl. *System market platform for mFRR*),
- **Trgovalna platforma za trg znotraj dneva** (angl. *Intraday Energy Market platform*),
- **Rešitev za merjenje izravnalne energije pri avtomatski rezervi za povrnitev frekvence** (angl. *Solution for the measurement of balancing energies within secondary regulation*).

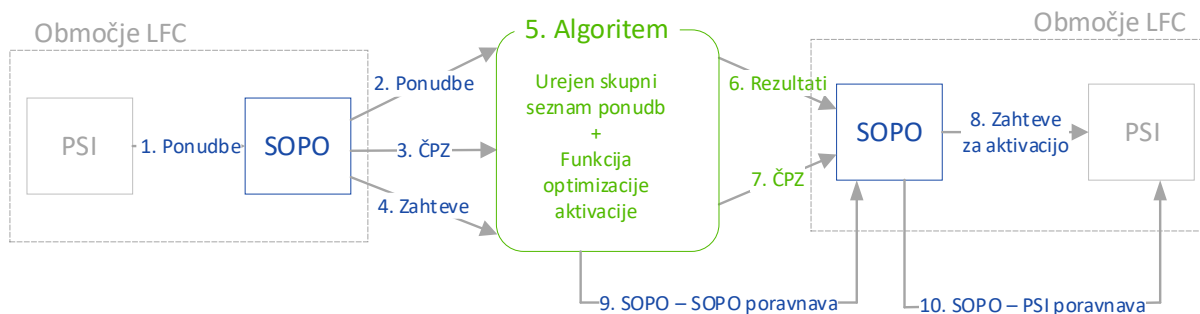
V tem prispevku bo bolj podrobno predstavljena prva rešitev, *Čezmejna trgovalna platforma za produkt ročne rezerve za povrnitev frekvence*, ki vsebuje inovativen pristop zagotavljanja sistemskih storitev na regionalnem nivoju. Namenjena je povezovanju in izmenjavi energije na izravnalnem trgu. Bolj podrobno, gre za trg s produktom ročne rezerve za povrnitev frekvence – rRPF (angl. *manual Frequency Restoration Reserve – mFRR*) in zaradi preglednosti bomo platformo razvito pri projektu CROSSBOW imenovali **mFRR platforma**. Trgovalna platforma bo razvita do stopnje demonstracije programske opreme in ne bo operativno delovala v realnem elektroenergetskem sistemu [2].

1.2. Zasnova specifikacij in delovanje mFRR platforme

Funkcionalna in tehnična specifikacija programske rešitve sta bili zasnovani skladno s smernicami in primeri dobre prakse v Evropski Uniji (EU). Na pripravo specifikacij so vplivale *Smernice za izravnavo električne energije* (angl. *Guideline on Electricity Balancing – EBGL*), ki določajo skupna pravila za izravnavo električne energije, ki vključujejo nabavo, aktivacijo in izmenjavo. Na pripravo so vplivale tudi *Smernice za delovanje sistema za prenos električne energije* (angl. *Guideline on Electricity Transmission System Operation – SOGL*), ki obravnavajo naraščajoče število povezav med državami in konkurenco na čezmejnem trgu ter pravila za upravljanje z elektroenergetskim omrežjem ob povečanem vključevanju OVE v sistem [3].

Kot primer dobre prakse je na pripravo specifikacij vplival tudi implementacijski projekt MARI (angl. *Manually Activated Reserves Initiative*), ki deluje pod okriljem Evropskega združenja SOPO-jev (angl. *European Network of Transmission System Operators – ENTSO-E*). MARI obravnava čezmejno izmenjavo izravnalne energije (produkta rRPF) na Evropskem nivoju in bo v primerjavi z orodjem mFRR platforme pri projektu CROSSBOW dosegel višjo stopnjo izvedbe in večje število sodelujočih SOPO-jev iz širšega področja EU. Platforma pri projektu CROSSBOW se od MARI razlikuje po decentralizirani zasnovi arhitekture orodja ter področju delovanja, ki je osredotočeno na JVE ter države, ki niso članice EU. Poleg inovacij mFRR platforme CROSSBOW, ki se nanašajo na funkcionalni del, vsebuje platforma tudi tehnične inovacije, zlasti uporabo novih informacijsko-komunikacijskih tehnologij (IKT), kot je veriga blokov (angl. *blockchain*). Uporaba novih tehnologij omogoča decentralizirano zasnovo platforme, ki vključuje tudi uporabo mikrostoritev in vmesnikov API (angl. *Application Programming Interface*) [4], [5].

Glavni namen platforme, ki predstavlja del trga s sistemskimi storitvami, je izboljšano zagotavljanje izravnalne energije in bolj učinkovita izraba čezmejnih prenosnih kapacitet (ČPZ). Platforma je osnovana na modelu SOPO – SOPO, ki je v skladu z zakonodajo EBGL in zapoveduje, da je samo SOPO neposredni udeleženec na trgu. Posredno (preko SOPO-ja v svoji državi) pa na trgu sodelujejo tudi ponudniki storitev izravnave (PSI).



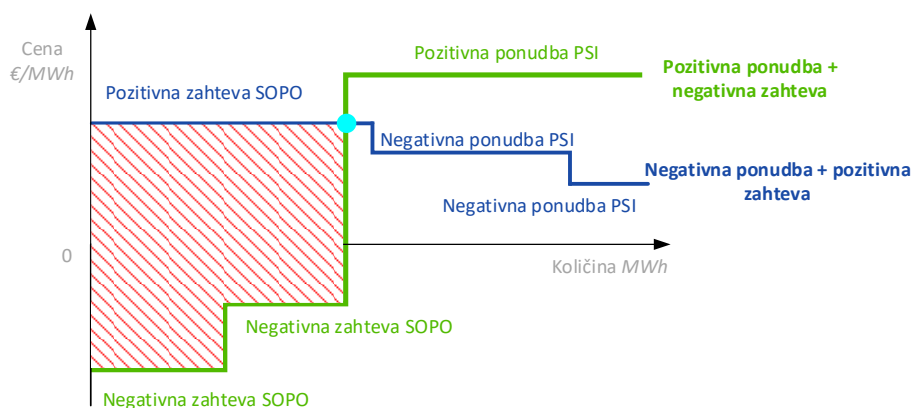
Slika 1: Proces delovanja trgovalne platforme mFRR [2]

Dolžina osnovnega produkta na mFRR platformi je 15 minut, kar pomeni, da se vsakih 15 minut na platformi zaključi en interval. Slika 1 prikazuje proces delovanja, ki je razdeljen na 10 korakov [2]:

1. PSI pošlje ponudbe svojem SOPO-ju (kombinacija količine in ponudbene cene).
2. SOPO posreduje del ponudb na platformo (del ponudb zadrži zase zaradi zagotavljanja varnosti).
3. Do določenega časovnega roka lahko SOPO posodablja podatke o ČPZ-jih, ki so na voljo.
4. SOPO posreduje zahteve po aktivaciji rRPF na platformo.
5. Po času zaprtja zbiranja ponudb se ustvari urejen seznam ponudb in izvede se optimizacija s pomočjo algoritma optimizacije aktivacij, ki primerja ponudbe za aktivacijo, zahteve po aktivaciji in ČPZ-jih.
6. Rezultati optimizacije (izbrane ponudbe, izpolnjene zahteve po aktivaciji) se posredujejo SOPO-jem.
7. Spremembe ČPZ, ki so nastale zaradi čezmejnih prenosov energije se posredujejo SOPO-jem.
8. SOPO pošlje signal za aktivacijo PSI-jem, ki so bili izbrani na avkciji.
9. Glede na rezultate avkcije pride do poravnave SOPO –SOPO.
10. Glede na rezultate avkcije pride do poravnave SOPO – PSI.

1.3. Družbena blaginja

Vsaki 15 minut se na mFRR platformi izvede avkcija na podlagi algoritma optimizacije aktivacij. Glavna kriterijska funkcija je optimizacije družbene blaginje, ki nastane s povezovanjem ponudb in zahtev po aktivaciji v določenem intervalu. Drugi pogoj pa je optimizacija količin ČPZ-jev, ki ostanejo na voljo po izvedeni avkciji. V okviru trgov z izravnalno energijo, družbena blaginja predstavlja skupni presežek vseh SOPO-jev, ki je pridobljen z izpolnjevanjem njihovih zahtev in skupni presežek PSI-jev, ki izvira iz aktivacije njihovih ponudb. Slika 2 prikazuje družbeno blaginjo. Izračunana je kot razlika med ceno, ki so jo SOPO-ji pripravljali plačati in čezmejno marginalno ceno, ki je dosežena v tem intervalu na platformi. Za PSI je izračun podoben, ugotovljamo razliko med čezmejno marginalno ceno in ceno, ki jo PSI zahteva za prodajo. Družbena blaginja je prikazana z rdečo in predstavlja presežek SOPO-jev in PSI-jev. Slika prikazuje tudi primer združenega in urejenega seznama ponudb.

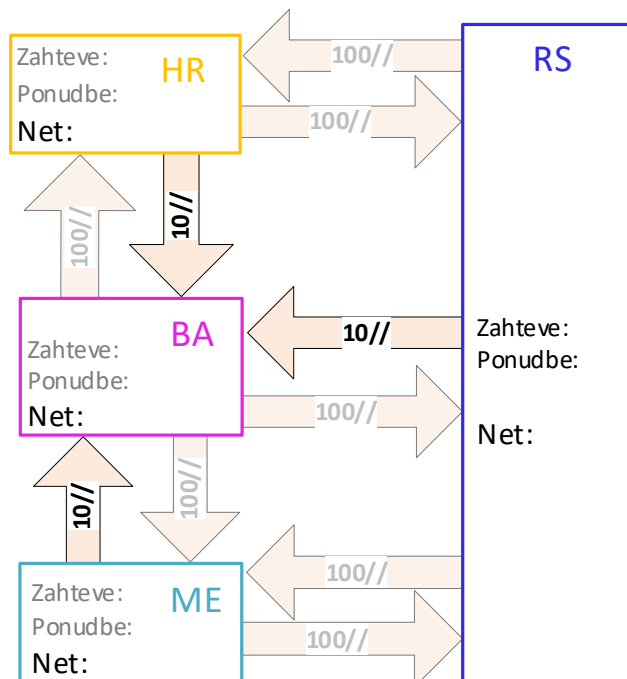


Slika 2: Preprost primer prikaza družbene blaginje [2]

2 PRIMER IZRAČUNOV UPORABE ČEZMEJNE TRGOVALNE PLATFORME

V tem poglavju bomo predstavili primer algoritma in izračuna za poljubni interval. Predstavili bomo primer premije za zamašitev in nastanka dveh cenovnih con zaradi pomanjkanja ČPZ-jev.

Slika 3 prikazuje izmišljen scenarij z državami BA, HR, ME in RS. Na mejah med državami je na voljo dovolj ČPZ, razen na mejah HR – BA, ME – BA in RS – BA. Na vsaki od teh povezav smo omejeni z 10 MWh v smeri proti BA, kar pomeni, da lahko BA uvozi največ 30 MWh. Puščice prikazujejo smer pretoka, s številkami pa so prikazane omejitve ČPZ-jev.



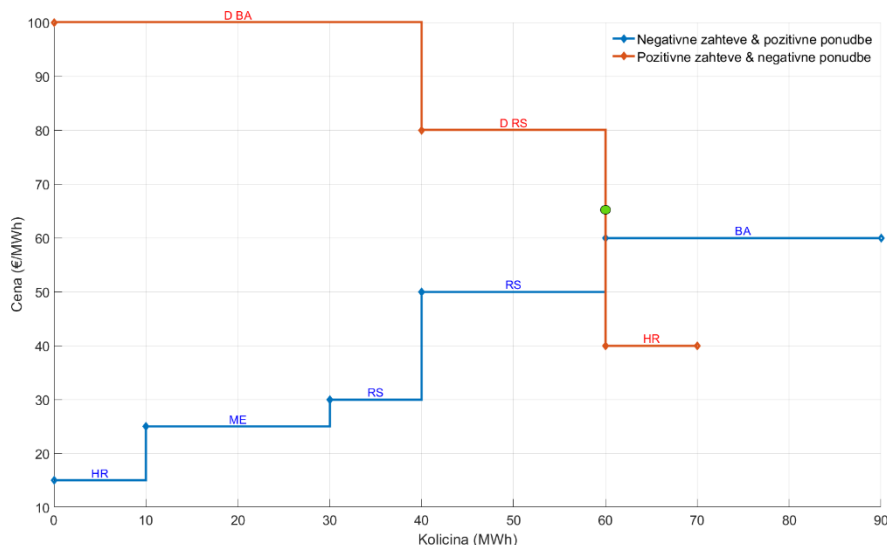
Slika 3: Scenarij in omejitve ČPZ

Tabela 1 prikazuje ponudbe PSI in zahteve po aktivaciji SOPO-jev, ki so poslani na platformo. Vsaka ponudba ima definirano vsaj ceno, smer, količino in državo iz katere izvira. Vsaka zahteva po aktivaciji ima podano še elastičnost, ki predstavlja cenovno omejitev zahteve. Pri neelastičnih zahtevah je SOPO pripravljen plačati kakršenkoli znesek, da zadosti potrebam po energiji, zaradi implementacije pa se uporabi zgornja tehnična meja, ki je na platformi CROSSBOW +/- 9999,99 EUR/MWh. Srednja stolpca prikazujeta ponudbe, ki so izbrane v prvi in drugi iteraciji avkcije, kar je podrobno opisano v nadaljevanju.

Tabela 1: Ponudbe PSI in zahteve SOPO-jev za prikazan scenarij

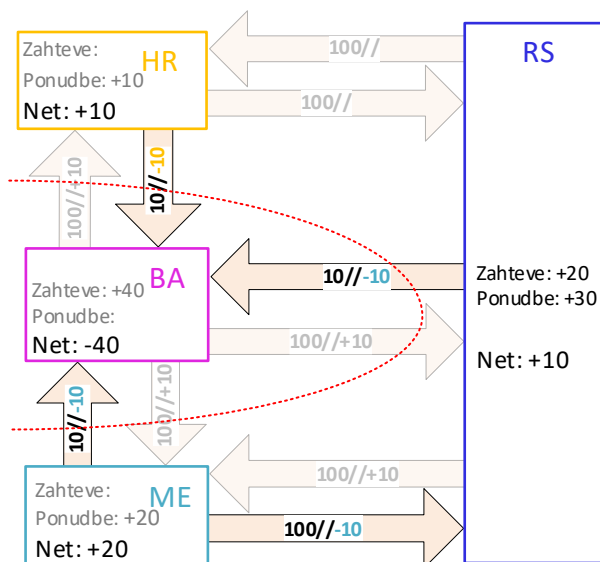
Ponudbe				Izbrane ponudbe		Zahteve			
Cena (€/MWh)	Smer	Količina (MWh)	Država	Prva	Druga	Elastičnost (€/MWh)	Smer	Količina (MWh)	Država
15	+	10	HR			100	+	40	BA
25	+	20	ME			80	+	20	RS
30	+	20	RS						
50	+	10	RS						
60	+	30	BA						
40	-	10	HR						

Slika 4 prikazuje prvo iteracijo algoritma za določanje čezmejne marginalne cene. V prvi iteraciji se najprej ustvari urejen seznam ponudb, ki združuje negativne zahteve in pozitivne ponudbe v modri krivulji ter pozitivne zahteve in negativne ponudbe v rdeči krivulji. Pri presečišču krivulj se določi cena, ker pa v tem primeru do presečišča krivulj ne pride, se cena določi kot središčnica zadnje izbrane cene rdeče in modre krivulje ter znaša 65 €/MWh.



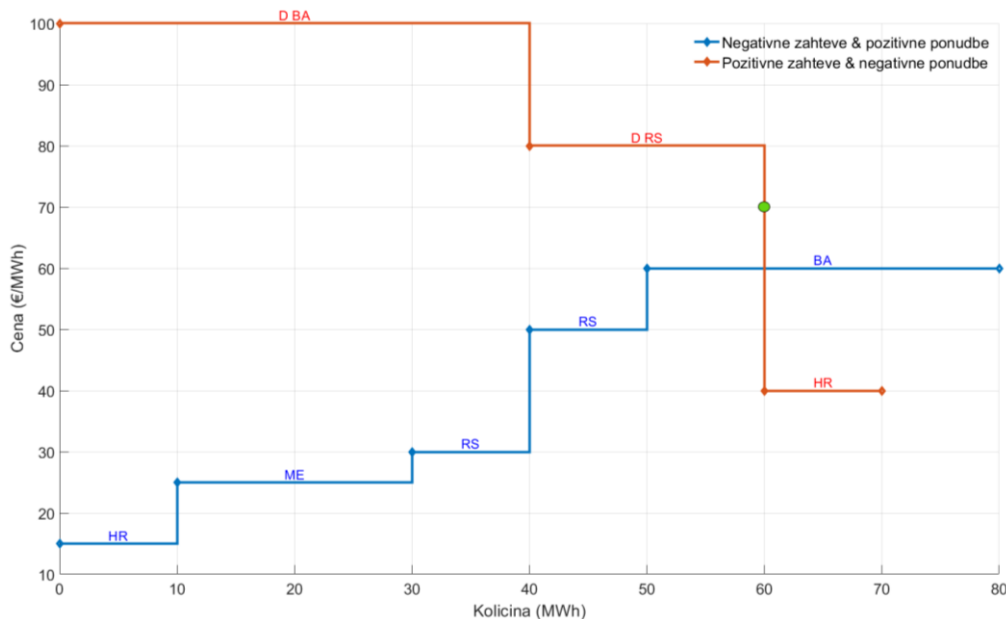
Slika 4: Prikaz prve iteracije algoritma za določanje čezmejne marginalne cene

Slika 5 prikazuje naslednji korak, ki preveri, če optimalna izbira cene glede na ponudbe in zahteve ustreza razmeram v omrežju. Preverijo se pretoki energije glede na omejitve ČPZ-jev. Zahteve in ponudbe iz tabele 1 smo pripisali državam in za vsako državo določili želeni neto uvoz/izvoz energije v danem intervalu. Pozitivna številka pomeni, da je država izvoznik, negativna pa predstavlja uvoz energije. Vidimo lahko, da želimo glede na izbrane ponudbe v prvi iteraciji v BA uvoziti 40 MWh energije, čeprav je na voljo samo 30 MWh. Algoritem rešitve ne najde in omrežje v tem optimizacijskem problemu razpade na dve coni, kot je prikazano na sliki z rdečo črtkano črto. Z barvnimi puščicami smo označili pretok energije. Iz HR in ME gre lahko iz vsake države po 10 MWh neposredno v BA. Preostalih 10 MWh iz ME gre v BA preko RS. Ponudba iz RS se obravnava nazadnje, saj ima najvišjo ceno (50 €/MWh), glavni kriterij optimizacije pa je družbena blaginja. Na voljo ostane še 10 MWh iz RS, vendar so vse ČPZ že zasedene. Za vse države, ki so v coni brez zamašitve v omrežju (HR, ME, RS), se določi cena 65 €/MWh.



Slika 5: Scenarij, ki prikazuje zamašitev v omrežju

Slika 6 prikazuje drugo iteracijo, kjer se ponudba za 20 MWh po ceni 50 €/MWh iz RS zmanjša na 10 MWh (v primerjavi s prvo iteracijo). Algoritem se ponovno zažene in tokrat se manjkajočih 10 MWh nadomesti z dražjo ponudbo iz BA. Določi se čezmejna marginalna cena, ki znaša 70 €/MWh, ki je upoštevana samo v BA. Ker gre za ponudbo iz BA, ne pride do zamašitev v omrežju in ponudba je sprejeta. Algoritem najde optimalno rešitev glede na omejitve in zaključi z iteracijo.



Slika 6: Prikaz druge iteracije algoritma za določanje čezmejne marginalne cene

2.1. Komentar rezultatov

Zaradi zamašitve omrežja in dejstva, da je po izvedbi algoritma v BA ostalo povpraševanje po uvozu večje od tistega, ki ga ČPZ in princip pretoka energije od cenejših do dražjih proizvodnih virov lahko ponudita, se regija razdeli. Nastaneta dve coni, ki imata različno čezmejno marginalno ceno. V eni coni je samo BA v drugi coni pa preostale države. Marginalna cena v BA je glede na algoritem 70 €/MWh, kar pomeni, da imajo vse zahteve SOPO-jev po aktivaciji in ponudbe PSI-jev v tej državi isto ceno. Marginalna cena v vseh ostalih državah in njihovih zahtevah/ponudbah pa doseže 65 €/MWh.

Tabela 2 prikazuje stroške, ki bi nastali v tem intervalu na mFRR platformi. Iz vsote zadnjega stolpca, ki prikazuje SOPO – SOPO poravnava lahko opazimo, da mora SOPO v BA plačati več, kot bosta SOPO-ja v HR in ME prejela. RS ne izvozi nič energije, zato bo tam potekala samo poravnava na nivoju SOPO – PSI. Razlika nastane, ker se v BA 40 MWh aktivira po ceni 70 €/MWh. Od teh 40 MWh pa je 30 MWh uvoženih iz držav v drugi coni s čezmejno marginalno ceno 65 €/MWh. Nastane razlika v višini 150 €, ki se imenuje premija za zamašitev. Izračunana je kot razlika med čezmejnima marginalnima cenama in uvozu/izvozu med dvema conama. Ker morajo SOPO-ji pri procesu izravnave ostati finančno nevtralni, to pomeni, da se premija za zamašitev razdeliti med SOPO-je, ki so v primeru decentralizirane arhitekture tudi lastniki trgovalne platforme.

Tabela 2: Prikaz izračunanih stroškov (negativen zaslužek pomeni, da SOPO plača za aktivacije, pozitiven zaslužek pa, da bo SOPO prejel plačilo za aktivacije)

Država	Pozitivne zahteve (MWh)	Zaslužek pozitivnih zahtev (€)	Pozitivne ponudbe (MWh)	Zaslužek pozitivnih aktivacij (€)	SOPO – SOPO poravnava (€)
HR	0	0	10	650	650
ME	0	0	20	1.300	1.300
RS	20	-1.300	20	1.300	0
BA	40	-2.800	10	700	-2.100
Vsota	60	-4.100	60	3.950	-150

2.2. Izračun družbene blaginje

Tabela 3 prikazuje urejene podatke, ki bodo uporabljeni za izračun družbene blaginje. Potrebni so podatki aktiviranih pozitivnih ponudb/zahtev, dosežena cena ponudb/zahtev in zelena cena ponudb/zahtev.

Tabela 3: Urejeni podatki za izračun družbene blaginje

Pozitivne zahteve (MWh)	Želena cena zahtev (€/MWh)	Dosežena cena zahtev (€/MWh)	Pozitivne ponudbe (MWh)	Dosežena cena ponudb (€/MWh)	Želena cena ponudb (€/MWh)
20 MWh (RS)	80	65	10 MWh (HR)	65	15
40 MWh (BA)	100	70	20 MWh (ME)	65	25
			20 MWh (RS)	65	30
			10 MWh (BA)	70	60

Družbeno blaginjo izračunamo kot razliko želene in dosežene čezmejne marginalne cene v coni pomnoženo z aktivirano energijo. Zaradi preglednosti lahko izračunamo družbeno blaginjo posebej za SOPO in PSI.

$$DB_{SOPO} = \left(80 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} - 65 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}\right) * 20 \text{ MWh} + \left(100 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} - 65 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}\right) * 40 \text{ MWh} = 1.500 \text{ €}$$

$$DB_{PSI} = 50 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} * 10 \text{ MWh} + 40 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} * 20 \text{ MWh} + 35 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} * 20 \text{ MWh} + 10 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} * 10 \text{ MWh} = 2.350 \text{ €}$$

Skupna družbeno blaginja v tem scenariju znaša 1.500 €+2.350€=3.850 € in predstavlja optimalno rešitev glede na omejitve. Algoritem zagotovi, da je zahtevam po aktivaciji zadoščeno in da je izraba ČPZ-jev čim učinkovitejša.

3 ZAKLJUČKI IN NASLEDNJI KORAKI

Čezmejno povezan izravnalni trg z električno energijo je eden od ciljev, ki jih je v zakonodaji leta 2017 določila Evropska komisija in zagotavlja varno ter ekonomsko učinkovito oskrbo z energijo za prihodnost. Čezmejne rešitve spodbujajo harmonizacijo pravil za udeležbo na trgu, ki lahko vključujejo standardne produkte, sinhronizirane čase zaprtja zbiranja ponudb, pogoje za sodelovanje na trgu in spajanje sosednjih trgov. Harmonizirana pravila omogočajo enake pogoje za vse udeležence na trgu in blagodejno vplivajo na povečanje likvidnosti in posledično zmanjšanje stroškov izravnave v regiji.

Projekt CROSSBOW je v zadnji fazi izvedbe in trenutno se izvajajo končna testiranja produktov ter skupna evalvacija rezultatov projekta. Naslednji velik korak v projektu je simulacija delovanja mFRR platforme za dve leti, ki bo temeljila na zgodovinskih podatkih, ki so jih priskrbeli partnerji projekta CROSSBOW za leti 2018 in 2019. Glavni del izračunov bo primerjava stroškov izravnave brez uporabe skupne čezmejne platforme in z uporabo CROSSBOW mFRR platforme v državah članicah projekta CROSSBOW. S tem bomo pokazali kakšni bi bili možni prihranki ob uporabi mFRR platforme za izmenjavo izravnalne energije.

4 ZAHVALA

Predstavljene rešitve so del raziskovalnih aktivnosti v projektu CROSSBOW, ki se financira iz Okvirnega programa Evropske unije za raziskave in inovacije HORIZON 2020 v okviru sporazuma o dodelitvi sredstev št. 773430.

REFERENCE

- [1] CROSSBOW project consortium, „CROSS BOrder management of variable renewable energies and storage units enabling a transnational Wholesale market“. [Na spletu]. Dostopno: <http://crossbowproject.eu/>. [Dostopano: 20-apr-2021].
- [2] CROSSBOW project consortium, „D10.2: Novel balancing and wholesale electricity market design“, 2019.
- [3] J. Jeriha, E. Lakić, T. Medved, in A. F. Gubina, „Nove rešitve povezovanja trgov s sistemskimi storitvami ročne rezerve za povrnitev frekvence“, 14. *Konf. Slov. Elektroenerg. - Laško 2019*, 2019.
- [4] J. Jeriha, E. Lakić, in A. F. Gubina, „Innovative solutions for integrating the energy balancing market (mFRR)“, 16th *Int. Conf. Eur. Energy Mark.*, 2019.
- [5] ENTSO-E, „MARI - First Consultation“, 2017.