

Ivan Pavić
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Ivan.pavic@fer.hr

Tomislav Capuder
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Tomislav.capuder@fer.hr

Hrvoje Pandžić
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Hrvoje.pandzic@fer.hr

ISTODOBNI NASTUP NA TRŽIŠTIMA ENERGIJE I REZERVU – UTJECAJ NESIGURNOSTI AKTIVACIJE REZERVE

SAŽETAK

Liberalizacijom nacionalnih tržišta rezervi i energija uravnoteženja te uparivanjem u europsko zajedničko tržište pojavila se potreba za razvojem složenih tržišnih algoritama. Za dan-unaprijed tržište energije potrebno je prognozirati cijenu kako bi se mogao stvoriti optimalni vozni red. Unutardnevno tržište donosi dodatnu nesigurnost radi kontinuiranog načina trgovanja te *pay-as-bid* određivanja cijene. Tržišta rezervi osim cjenovne nesigurnosti sadrže i nesigurnost aktivacije kroz energiju uravnoteženja. Vremenski gledano tržišta rezervi dolaze prije dan-unaprijed energije, nakon čega dolaze unutardnevna tržišta energijom te kao zadnja stepenica tržišta energijom uravnoteženja. Prilikom podnošenja naloga na tržištu rezerve tržišni igrač mora uzeti u obzir trgovanje na svim nadolazećim tržištima što znači da mora modelirati i nesigurnosti koje dolaze s njima. U ovom radu fokus je na analizi aktivacije FCR i aFRR rezervi te ovisnosti o cijeni energije uravnoteženja. Kroz rad je također dan i osvrt na trenutno stanje razvoja zajedničkog tržišta rezervi u Europi te na izazove koji se javljaju u ovom procesu.

Ključne riječi: Tržište električne energije, tržište rezervi, tržište energijom uravnoteženja

SIMULTANOUS PARTICIPATION ON ENERGY AND RESERVE MARKETS – IMPACT OF RESERVE ACTIVATION UNCERTAINTY

ABSTRACT

Liberalization of national reserve and balancing energy markets and their coupling towards integrated European market created the need to develop sophisticated bidding algorithms. For day-ahead energy market the market participant must forecast price to create optimal unit commitment. Intraday market brings additional uncertainty due to its continuous nature and pay-as-bid price forming scheme. Reserve markets, along price uncertainty, contain the uncertainty of activation through balancing energy markets. If the markets are set on a timeline, first comes reserve market before day-ahead energy market, after it's gate closure intraday energy markets are in-operation and as a last step before real-time balancing energy markets are operated. During decision making on reserve market, a market player must take into account potential trades and uncertainties on all subsequent markets as well. This paper focuses on analysis of FCR and aFRR activations and their relation to balancing energy prices. The paper also provides and insight into integrated European reserve markets development and potential challenges.

Key words: Electricity market, reserve market, balancing energy market

1. UVOD

Europski elektroenergetski sustavi kroz proteklih 20 godina obilježeni su liberalizacijom tržišta električne energije sa svrhom povećanja konkurentnosti i upliva privatnog kapitala u elektroenergetiku. Danas, sve europske države imaju neki oblik organiziranog dan-unaprijed i unutar dnevnog tržišta električne energije koja su tehnološki neutralna, transparentna i pristupačna svima. Nakon razvoja pojedinačnih tržišta, uslijedilo je i njihovo uparivanje u zajedničko europsko tržište električne energije (SDAC – engl. „*Single Day-ahead Coupling*“; SIDC – engl. „*Single Intraday Coupling*“). S određenim vremenskim odmakom nakon liberalizacije tržišta energije, krenula je i liberalizacija pomoćnih usluga, prije svega onih na razini sustava: rezervi i energije uravnoteženja. Liberalizacija tih usluga dobrim dijelom je zapečaćena i zadnjim paketom energetske mjera Europske unije (Čista energija za sve Europljane). Neke države već gotovo cijelo desetljeće imaju neki oblik tržišta rezervama i energijom uravnoteženja (primjer Njemačka) te će se slični principi pretočiti i na ostale članice. Istim paketom energetske mjera zamišljeno je i uparivanje tržišta energije uravnoteženja te rezervi, na sličnim principima kako je to teklo i kod uparivanja energetske mjere. Proces uparivanja tržišta energije uravnoteženja već je uzeo maha kroz razne europske projekte (FCR cooperation, PICSASO, MARI, TERRE) i definirane rokove do kada im se članice EU moraju pridružiti, dok je proces uparivanja rezervi značajno sporiji gdje se može izdvojiti tek nekoliko projekata: aFRR između Njemačke i Austrije, Nordijsko tržište rezervama te EU znanstveno-istraživački projekt FARCROSS [1].

Sudionicima tržišta otvaraju se nove mogućnosti gdje mogu sudjelovati na više tržišta simultano i pri tom ostvariti veće profite za sebe te veće socijalno blagostanje za čitavo društvo. Tržišta rezervi zamišljena su da se zatvaraju i čiste prije energetske mjere dan-unaprijed tržišta, dok se tržišta energijom uravnoteženja čiste nakon njega, u blizini stvarnog vremena. Takva tržišta obiluju raznim nesigurnostima za sudionike, od ostvarenja cijena, razdvajanja tržišta, prihvata ponuda, aktivacije rezervi (odnosno iznosa potrebne energije uravnoteženja itd.). Kako bi mogli ispravno podnositi naloge na svim tržištima, sudionici moraju na pravi način donositi odluke tako da uzmu u obzir sve relevantne nesigurnosti. Ovaj rad će definirati sve nesigurnosti koje se mogu pojaviti u stvarnom vremenu u odnosu na dan unaprijed donošenje odluka. Posebni fokus bit će na statističkoj analizi aktivacije rezervi te modeliranju nesigurnosti aktivacije unutar modela za natjecanje na tržištima energije, rezervi i energije uravnoteženja. Isto tako rad će pružiti i kratak osvrt na utjecaj ovih nesigurnih veličina i na dizajn zajedničkog tržišta rezervi.

2. TRŽIŠTA

Fokus rada je na brzim automatskim rezervama FCR i aFRR, odnosno analizi njihovih podataka za Francusku i Njemačku. U ovom poglavlju ukratko je opisano funkcioniranje FCR i aFRR tržišta u središnjoj Europi. Podaci korišteni u ovom radu su javni i preuzeti su sa stranica operatora sustava [2], [3], tržišta rezervi [4] te ENTSO-e web stranica [5].

2.1. FCR

U skladu s uredbom komisije (EU) 2017/2195 [6] (EBGL, engl. „*Guideline on Electricity Balancing*“) zajedničko tržište FCR rezerve (FCR kooperacija, engl. „*FCR Cooperation*“) teži integrirati nacionalne nabavke FCR rezerve na istu platformu s istim proizvodima i njihovim značajkama. Projekt trenutno obuhvaća 11 OPS-ova iz Austrije, Belgije, Nizozemske, Francuske, Njemačke, Švicarske, Slovenije i Danske. Trenutno se trgovanje odvija jednom dnevno dan prije isporuke. Proizvodi su simetrični (iznos rezerve prema gore mora biti jednak onom prema dolje) s četverosatnom rezolucijom. Projekt koristi TSO-TSO model gdje se sva FCR nabavlja preko zajedničke liste ekonomskog prvenstva. Platforma ima definiran minimalni udio koji se mora nabaviti iz lokalnih jedinica pružatelja FCR rezerve te maksimalan iznos koji se može izvesti u druge zemlje. Ponude mogu biti djeljive i nedjeljive (ili su u potpunosti prihvaćene ili su u potpunosti odbijene). Minimalna ponuda i rezolucija jest 1 MW. Nedjeljive ponude mogu imati maksimalni iznos od 25 MW. Ukoliko niti jedno od ograničenja nije ograničavajuće cijena u svim državama je jednaka – tzv. prekogranična marginalna cijena (engl. „*Cross Border Marginal Price*“): Ako je bilo koje od ograničenja aktivno, pojedina tržišta mogu imati svoje lokalne cijene – tzv. lokalne marginalne cijene (engl. „*Local Marginal Price*“). Nakon zajedničkog tržišta FCR rezervi nema s njime povezanog tržišta energijom uravnoteženja zbog čega tržišni sudionici odmah prilikom donošenja odluke

o trgovanju rezervom moraju uzeti u obzir i troškove same aktivacije svojih jedinica. Iz navedenog slijedi da se aktivacija FCR rezerve ne obavlja po ekonomskim principima već uniformno alociranom kapacitetu.

2.2. aFRR

U skladu s EBGL uredbom komisije EU [6] razvoj tržišta aFRR rezerve može se podijeliti u tri osnovna segmenta: IGCC [7], PICASSO [8], i aFRR kooperacija Austrija/Njemačka [9].

IGCC (engl. „*International Grid Control Cooperation*“) je paneuropski projekt začet 2010 kao regionalni među četiri njemačka OPS-a da bi do danas narastao na 27 OPS-ova. Netiranje neravnoteža je proces kojim se izbjegava istovremena aktivacija aFRR rezervi u suprotnim smjerovima među dva ili više OPS-ova. Implementacija IGCC je bazirana na razmjeni podataka upravljačkih petlji svakog OPS-a te omogućuje uravnoteženje u stvarnom vremenu. Svaki OPS dostavlja potražnju za aFRR rezervom optimizacijskom sustavu koji vraća korekcijski signal svakom pojedinom OPS-u. Izbjegavanjem suprotnih aktivacija smanjuje se potreba za aFRR rezervama što dovodi do optimalnog korištenja resursa.

PICASSO (engl. „*Platform for the International Coordination of Automated Frequency Restoration and Stable System Operation*“) je paneuropski projekt u kojem sudjeluju svi OPS članovi ENTSO-e kako bi se razvilo tržište energijom uravnoteženja iz aFRR rezervi. Projekt ima za cilj razviti zajedničko tržište aFRR energijama uravnoteženja bazirano na TSO-TSO modelu. PICASSO platforma djeluje s ciljem smanjenja FRCE na nulu (razlika između poremećaja i aktivirane aFRR rezerve, engl. „*Frequency Restoration Control Error*“). Budući da se poremećaj ne poznaje unaprijed, aFRR se aktivira nakon određenog kašnjenja (puno vrijeme aktivacije jest 7.5 minuta trenutno, a bit će 5 minuta nakon 2024.), prema tome FRCE se ne može u potpunosti izbjeći. Proces funkcionira tako da svi OPS-ovi računaju svoju potražnju za aFRR te ju dojavljaju na platformu. S druge strane, svi pružatelji energije uravnoteženja podnose svoje ponude svom OPS-u koji ih prosljeđuje na platformu. Aktivirajuća optimizacijska funkcija računa aFRR razmjenu temeljenu na zajedničkoj listi prvenstva. Minimalna ponuda i rezolucija jest 1 MW. Sve aFRR ponude su djeljive i vrijede 15 minuta. Formiranje cijene je bazirano na marginalnoj cijeni te ako nema zagušenja sva područja imaju istu cijenu. Ako postoji zagušenje onda dolazi do cjenovnog razdvajanja.

aFRR kooperacija Austrija/Njemačka je projekt kojim dvije zemlje žele zajednički nabavljati kapacitet za aFRR rezervu ponovno temeljen na TSO-TSO modelu. Budući da su u obje zemlje već postojale aukcije za aFRR kapacitet, ova kooperacija samo se naslanja na lokalne aukcije i platforme gdje pružatelji usluga uravnoteženja podnose svoje ponude. Središnja optimizirajuća funkcija za kapacitet odabire ekonomski najpovoljniji skup ponuda kako bi pokrila ukupnu potražnju za aFRR uzimajući u obzir prekogranični kapacitet vodova koji je alociran specifično za ovu namjenu. Ovakva zajednička nabavka može dovesti do toga da jedna država (jedan kontrolni blok) nabavlja više nego što mu je potrebno da pokrije svoje potrebe, što znači da drugi nabavlja manje nego što mu je potrebno. Ukupna suma nabavljenog aFRR kapaciteta mora biti dovoljna da se pokrije sva potražnja. Kroz ovu suradnju austrijski pružatelji usluga su dobili veće tržište bez potrebe za dodatnim pretkvalifikacijama. Cijelo područje je profitiralo od povećane likvidnosti te manjih troškova za kapacitet. Nabavka je dnevna s četverosatnim proizvodima. Tržište se zatvara jedan dan prije isporuke u 09:00 (prije dan unaprijed energetskog tržišta). Kako bi ovakvo tržište funkcioniralo potrebno je adekvatno alocirati prekogranični kapacitet. Kroz analizu troškova i koristi austrijski i njemački OPS-ovi izračunali su vrijednost prekograničnog kapaciteta na dan-unaprijed energetskom i aFRR tržištu. Trenutno izabrana vrijednost prekograničnog kapaciteta za ovu namjenu je 80 MW u oba smjera. Analize se vrte na mjesečno i tjednoj bazi kako bi alocirani interkonekcijski kapacitet bio optimalan. Ako pak interkonekcijski kapacitet nije iskorišten za trgovanje aFRR kapacitetom onda se može njime trgovati na naknadnim tržištima. Minimalna ponuda je 5 MW, međutim moguće su i ponude od 1, 2, 3 i 4 MW ako su to jedine ponude pružatelja usluge u tom tržišnom razdoblju.

2.3. FARCROSS projekt

FARCROSS projekt [1] ima za cilj razvoj i povećanje iskoristivosti interkonekcijskih vodova u Europi. Jedan od radnih paketa zadužen je upravo za razvoj i uparivanje tržišta rezervi. Najveći izazov koji se nameće u izradi algoritma za trgovanje rezervama jest kako modelirati prekogranične tokove snaga. Naime, kod uparivanja tržišta električnom energijom snaga koja se rezervirala unaprijed i stvarna aktivirana energija su jednake (naravno uz moguće neravnoteže koje se naplaćuju po cijenama odstupanja).

U slučaju rezervi, aktivirana energija uravnoteženja može biti od nula do 100% alociranog kapaciteta. Ako algoritam za trgovanje rezervama uzima u obzir 0% aktivacije u obzir može se dogoditi da se ta energija uravnoteženja neće moći prenijeti u stvarnom vremenu, odnosno da neće moći ni biti trgovana na tržištu energijom uravnoteženja. S druge strane, ako se u obzir uzima 100% aktivacije prekogranični kapaciteti mogu izgledati visoko iskorišteni, čak i zagušeni, nakon zatvaranja tržišta rezerve. No, u stvarnosti će vrlo mali dio zaista biti iskorišten za prekogranični prijenos energije uravnoteženja. Algoritmi za trgovanje rezervama zbog navedenoga rade tako da pronalaze najgori slučaj aktivacije rezervi i za njega osiguravaju prijenos energija uravnoteženja među državama.

Ovdje se javlja dodatni izazov, sama aktivacija rezervi alociranih na dan-unaprijed tržištu rezervi ne vrši izbor koji pružatelj će biti aktiviran u stvarnosti, jer to se obavlja na tržištima energijom uravnoteženja. Zbog navedenog moguća su dva ekstremna slučaja: pronalazak najgorih parova pružatelja – korisnika energije uravnoteženja te maksimalno zadovoljenje energije uravnoteženja kroz lokalno pružanje usluga. Prvi slučaj dovodi do ekstremno velikog zakupa interkonekcijskih kapaciteta za rezervu s vrlo malim iskorištenjem tih kapaciteta u stvarnosti. Prednost ovog pristupa jest da svi alocirani kapaciteti rezervi sa dan-unaprijed tržišta se mogu natjecati za pružanje energije uravnoteženja, odnosno sigurno neće doći do zagušenja na interkonekcijskim vodovima radi aktiviranja energije uravnoteženja. Drugi slučaj zanemaruje pružanje rezervi iz drugih država i prema tome ne ostavlja dovoljno prostora za neometano trgovanje na tržištu energijom uravnoteženja. Vrlo je izvjesno da dobar dio alociranih kapaciteta rezervi neće moći pružiti energiju uravnoteženja, odnosno da će doći do zagušenja vodova radi aktiviranja energije uravnoteženja. Prednost ovog slučaja je visoka iskoristivost interkonekcijskih vodova, odnosno visok udio interkonekcijskih kapaciteta se koristi za trgovanje energijom.

Potrebno je pronaći među rješenje kako tržišta rezervama ne bi bila niti prekonzervativna niti preliberalna što se tiče zakupa interkonekcijskih kapaciteta. Kako bi se dobila stvarna slika, potrebno je izvršiti detaljne analize aktivacija rezervi i njihovih cijena po državama te modelirati zajedničko tržište tako da uzima u obzir stvarne podatke. Prema tome, analize odrađene u ovom radu osim što su potrebne tržišnim sudionicima za optimalno trgovanje potrebne su i razvojnim inženjerima koji rade na novim tržišnim algoritmima za međugranično trgovanje rezervama.

3. ANALIZA PODATAKA I REZULTATI MODELA

Kako bi trgovali na tržištima rezerve, FCR i aFRR, tržišni sudionici moraju ispravno modelirati njezinu aktivaciju. Ovo se poglavito odnosi na energetske ograničene jedinice poput baterijskih spremnika ili odziva potrošnje. Upravo zato kao primjer modernog pružatelja rezervi uzeli smo flotu električnih vozila koja imaju mogućnost dvosmjernog punjenja, to jest pražnjenja u mrežu. Električna vozila upravljivim punjenjem djeluju kao odziv potrošnje jer mogu pomaknuti svoje punjenje u vremenu, dok pražnjenjem u mrežu djeluju kao baterija te mogu vršiti energetska arbitraža. I upravljivo punjenje i pražnjenje mogu se koristiti za pružanje rezervi [10].

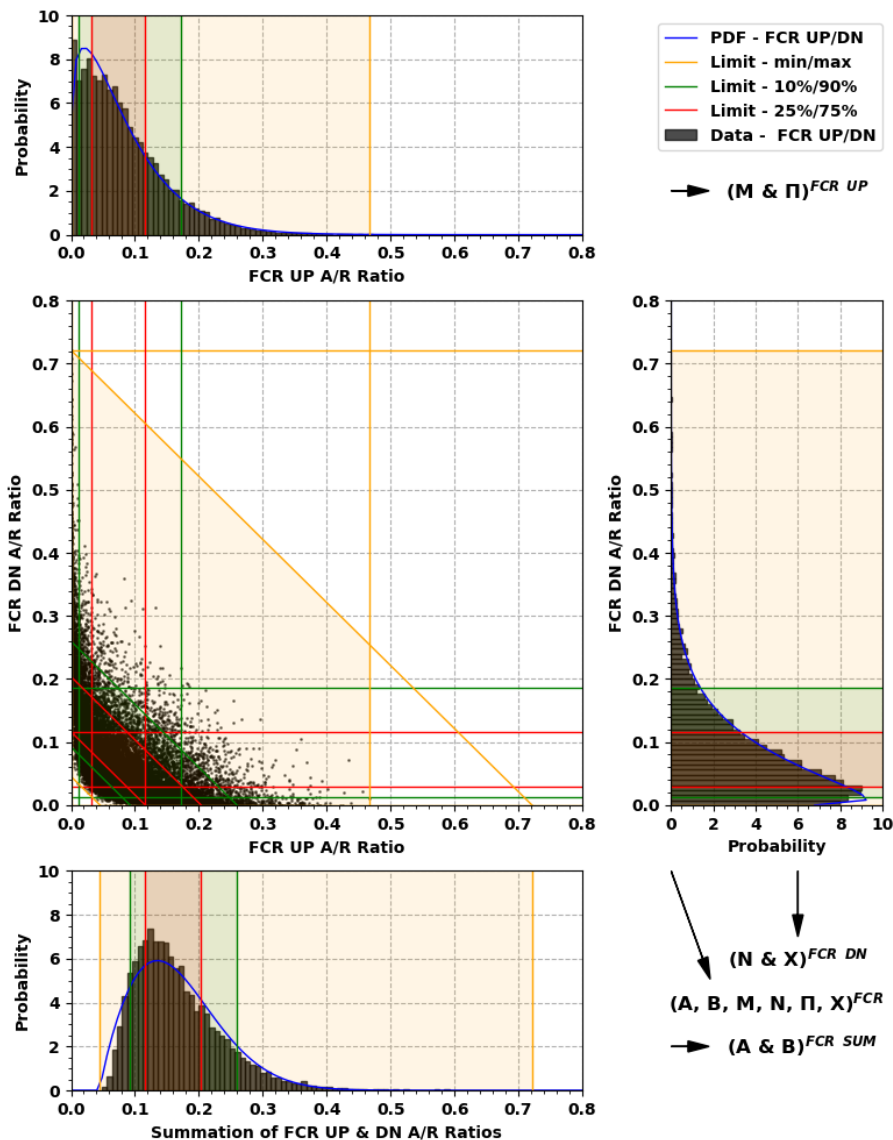
Za modeliranje rezervi korišten je robusni pristup koji minimizira ukupni trošak dok u isto vrijeme maksimizira najgori slučaj aktivacije rezervi. S ovim načinom EV koji pružaju rezervu mogu u svakom trenutku zadovoljiti svu energiju uravnoteženja koju su alocirali na tržištu kapaciteta rezervi. U sljedećem potpoglavlju dan je uvid u statističku analizu potrebnu za robusno modeliranje nesigurnosti aktivacije rezervi. Nakon toga u potpoglavlju 3.2 ukratko je opisan model te i potpoglavlju 3.3 rezultati tog modela. Poglavlje 3.4 daje pogled u nastavak na razvoj modela.

3.1. Statistička analiza

Za potrebe robusnog modeliranja nesigurnosti aktivacije rezervi, potrebno je detaljno proanalizirati ponašanje aktivacije rezervi kroz godine. Slika 1 prikazuje statističku analizu za FCR rezervu, dok slika 2 prikazuje za aFRR rezervu. Obje rezerve rađene su s podacima za Francusku te su korištene polusatne vrijednosti. Kao osnovni razmatrani parametar, za obje rezerve, uzet je omjer ukupno aktivirane energije uravnoteženja i ukupno alociranog kapaciteta. Na obje slike, gornji graf prikazuje histogram pojavljivanja omjera aktivacije kroz godinu za rezervu prema gore, dok graf desno prikazuje histogram pojavljivanja omjera aktivacije kroz godinu za rezervu prema dolje. Za obje rezerve histogrami prema dolje su vrlo slični onima prema gore. Za obje rezerve, aktivacija prema dolje ima veću srednju vrijednost (FCR – 0,0851,

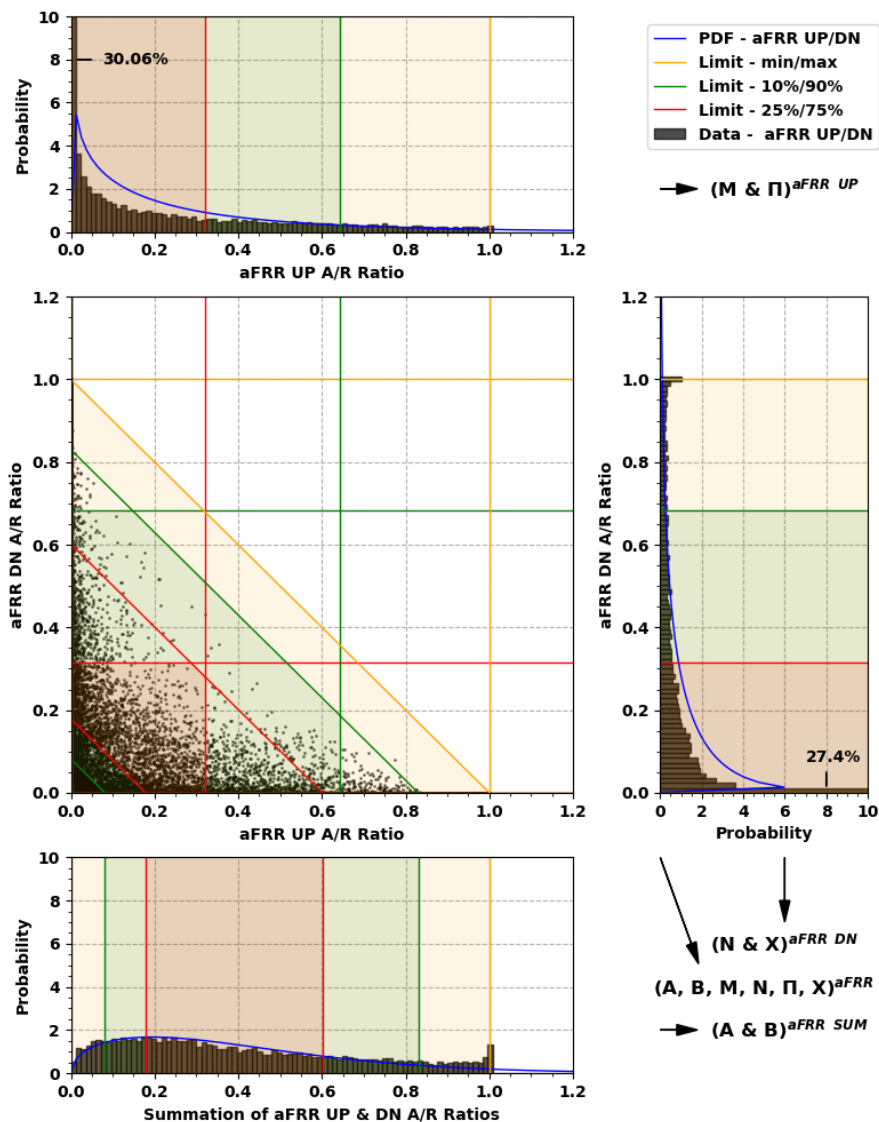
aFRR – 0,2069), nego za gore (FCR – 0,0820, aFRR – 0,1974). Isto tako, srednja je vrijednost FCR aktivacije puno manja nego kod aFRR. Navedeno se jasno da uočiti kada se pogledaju histogrami. Kod FCR većina distribucije zbijena je u niskim vrijednostima aktivacije, npr. , 75% distribucije pada do cca 0.11 (crvena linija). S druge strane aktivacija aFRR je skoro pa trećinu vremena nula, ali je ostatak distribucije razvučen skroz do 1 (potpune aktivacije).

Srednji graf, na obje slike, prikazuje međuodnos rezerve prema gore i dolje, dok naniži graf prikazuje sumu aktivacije prema gore i dolje u svakom trenutku. Zanimljivo je da FCR rezerva može biti nula za jedan ili drugi smjer, ali da nikada nije nula za oba smjera u istom trenutku. U pravilu, veća aktivacija u jednom smjeru označava manju aktivaciju u drugom u razmatranom polusatnom periodu. Kod aFRR rezerve, moguće je da i jedan i drugi smjer bude nula. Ali isto tako veća je vjerojatnost da će aktivacija u jednom smjeru biti značajno veća nego u drugom, i obratno, u razmatranom polusatnom periodu. Kada se razmotri najdonji graf još se bolje vidi koliko je distribucija aktivacije aFRR rezerve razvučenija od FCR rezerve.



Sl. 1.: Statistička obrada aktivacije FCR rezerve

Boje na slikama 1 i 2 prikazuju percentile za svaku pojedinu razmatranu veličinu na svim grafovima. Žute linije pokazuju minimalne i maksimalne vrijednosti, zelene linije prikazuju 10/90% vrijednosti, dok crvene linije prikazuju 25/75% vrijednosti. Na primjer ako razmotrimo gornji graf na slici 1, lijeva crvena linija pokazuje omjer aktivacije ispod kojeg se nalazi 25% najmanjih vrijednosti aktivacije, dok desna prikazuje omjer aktivacije iznad kojeg se nalazi 25% najvećih vrijednosti aktivacije. Zacrvenjeno područje između prikazuje omjere aktivacije koji su veći od 25% najmanjih i manji od 25% najvećih. Granice sa vanjskih histograma se preslikavaju na središnji graf tako da su vertikalne linije granice od rezerve prema gore, horizontalne linije su granice od rezerve prema dolje, dok su kose linije granice od sume rezerve prema gore i dolje. Spomenute granice su korištene za robusno modeliranje aktivacije rezerve s različitom dozom konzervativnosti. Ako koristimo žute granice za modeliranje nesigurnosti, to znači da obuhvaćamo full raspon mogućih aktivacija rezervi (vrlo konzervativno). Ako pak koristimo zelene granice, to znači da smo liberalniji te da ne uzimamo u obzir 10% najgorih slučajeva (10% najvećih i najmanjih aktivacija). A ako koristimo crvene granice, to znači da smo vrlo liberalni, skloni riziku, te da smo odbacili 25% najgorih slučajeva.



Sl. 2.: Statistička obrada aktivacije aFRR rezerve

3.2. Matematički model

U ovom potpoglavlju ćemo kratko objasniti kakav model smo koristili za modeliranje tržišnog nastupa i zašto nam je bitno ispravno modelirati ponašanje aktivacije rezervi bez ulaženja u matematičke formulacije. Za više informacija i detaljan matematički model zainteresirani čitatelj može pogledati prijašnji rad autora [11].

Funkcija cilja razvijenog modela jest minimizacija ukupnih troškova nabavke električne energije za flotu električnih vozila, a sastoji se od:

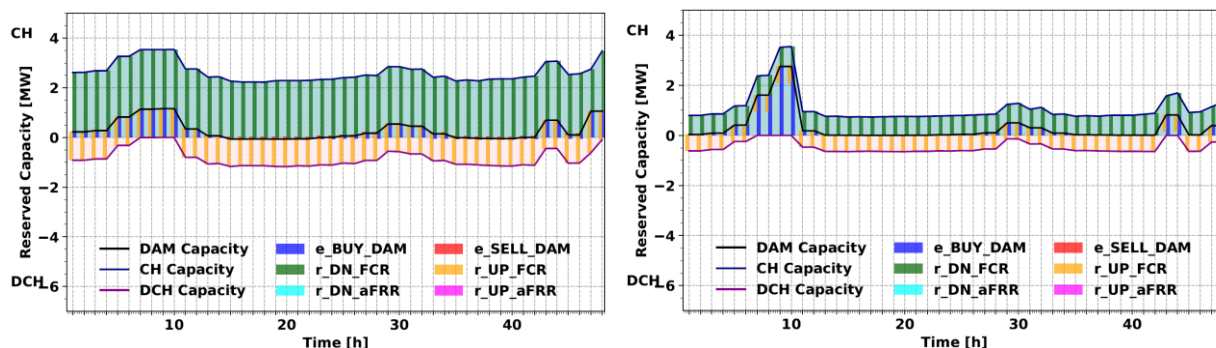
- nastupa na energetskom dan-unaprijed tržištu (kupnja i prodaja energije);
- nastupa na FCR i aFRR tržištima kapaciteta (prodaja kapaciteta u oba smjera);
- nastupa na tržištima energije uravnoteženja (kupnja i prodaja energije, ovisno o smjeru aktivacije);
- troškova degradacije baterije radi pražnjenja električnog vozila;
- potencijalnih potreba za brzim punjenjem EV (ovo je radi izvodljivosti modela da se nikada ne dogodi da vozilo ne ostane bez energije).

Svako električno vozilo posjeduje ograničenje stanja napunjenosti svoje baterije koje glasi: energija akumulirana u sadašnjem trenutku t jednaka je onoj iz prošlog trenutka $t-1$ plus sva energija koja se injektira (sporo i brzo punjenje EV) ili ekstrahira (vožnja EV, pražnjenje EV u mrežu) iz baterije u trenutku t . Osim energetskog ograničenja svako EV ima ograničenje na snagu punjenja/pražnjenja iz mreže koje je ograničeno vanjskom punionicom i unutarnjim (engl. „On-board-charger“) punjačem. Podaci o kretanju vozila, tipovima vozila te tipovima punionica preuzeti su iz [13].

3.3. Rezultati modela

Slika 3 prikazuje rezultate modela za tržišno natjecanje flote EV na dan unaprijed tržištima: energetsko, FCR i aFRR rezervi. Na x-osi se nalaze 30-min periodi kroz jedan dan, dok se y-osi nalaze snage punjenja i pražnjenja alocirane na različitim tržištima. Cijene po kojima su pokretane simulacije su uzete iz francuskog sustava (energija – 48,86 Eur/MWh; FCR – 4,83 Eur/MW/0,5h; aFRR – 4,48 Eur/MW/0,5h). S lijeve strane nalaze se rezultati simulacije s liberalnim postavkama gdje je tržišni sudionik odlučio riskirati i modelirati aktivaciju rezerve ignorirajući 5% najgorih slučajeva aktivacije. Ove postavke prikazane su crvenim granicama/linijama i crvenim područjem na slikama 1 i 2. S desne strane, nalaze se pak rezultati simulacije s konzervativnim postavkama gdje tržišni sudionik ne riskira te modelira rezervu uzimajući u obzir i najgore slučajeve aktivacije. Ove postavke prikazane su žutim granicama/linijama na slikama 1 i 2.

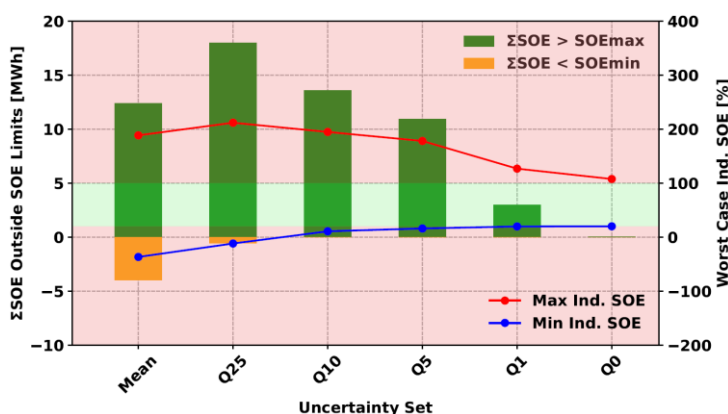
Zbog nešto više cijene, ali i manjeg raspona nesigurnosti, u oba slučaja algoritam izabire FCR rezervu te kupnju na energetskom tržištu u nekoliko sati s povoljnijom cijenom energije. U oba slučaja je nešto više zastupljena rezerva prema dolje što znači da se pri aktivaciji EV puni. Radi konzervativnijih postavki, algoritam je u desnom slučaju oprezniji te alocira manje rezerve, a više energije, nego li je to slučaj kod lijevog algoritma. Ovo je u skladu s očekivanim radom algoritma.



Sl. 3.: Rezultati robusnog modela za natjecanje. Lijevo – liberalan model, desno – konzervativan model

Na slici 4 prikazani su potencijalna prekoračenja ograničenja baterija EV. Na x osi su prikazani razmatrani slučajevi. Prvi (Mean) odgovara determinističkom slučaju koji ne vidi nesigurnost aktivacije

rezervi, nakon toga slijedi robusni slučaj koji zanemaruje 25% najgorih slučajeva aktivacije (Q25), pa onaj koji zanemaruje 10% (Q10), pa 5% (Q5 – slučaj sa slike 3 lijevo), pa 1% (Q1) te naposljetku onaj koji uzima u obzir sve moguće aktivacije (Q0 – slučaj sa slike 3 desno). Na lijevoj y osi nalaze se prikaz ukupne energije koja se ne može spremirati/izvući iz EV baterija. Jasno se može vidjeti da su te energije (stupci) vrlo visoke za liberalne slučajeve, dok su tek za Q1 slučaj zadovoljavajuće. Q0, budući da uzima u obzir najgoru moguću aktivaciju, neće biti u situaciji da se energija ne može iz spremnika izvući ili ubaciti za potrebe alociranih usluga. Usporedbom slike 3 i 4, možemo vidjeti da konzervativna rješenja malo kapaciteta alociraju za rezerve, ali da nemaju problema s obavljanjem alociranih usluga. Na desnoj y-osi slike 4, prikazano je stanje napunjenosti najgore baterije u EV floti. Odnosno crvena i plava krivulja prikazuju koliko bi bilo stanje napunjenosti da se izvrše sve dan-unaprijed alocirane usluge u najgorem slučaju aktivacije. Ponovno se može vidjeti da slučaj Q nema prekoračenja stanja napunjenosti svojih baterija, dok se kod ostalih slučajeva to prekoračenje povećava kako se povećava liberalnost postavki.

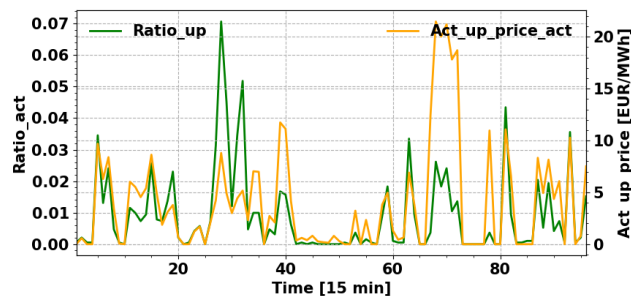
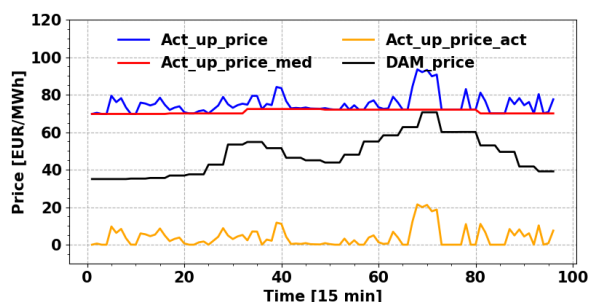


Sl. 4.: Usporedni prikaz rezultata za više scenarija (indikator izvodljivosti svih alociranih usluga)

3.4. Nastavak razvoja modela

Prikazani model nije uzimao u obzir nesigurnost cijene energije uravnoteženja, već je cijenu gledao kao fiksni parametar. Isto tako, algoritam nije uzimao u obzir tržište energijom uravnoteženja koje se može odigrati tako da korisnik ne proda/kupi energiju koju je isplanirao (čak i ako mu je kapacitet za određenu rezervu alociran za tu svrhu). Kod FCR rezerve takav model je dobar i adekvatan, međutim kod aFRR rezerve potrebno je dodatno integrirati tržište energije uravnoteženja. Svi parametri i ograničenja ostaju ista kao i u dosadašnjem modelu jedino što, uz aktivaciju rezerve, i cijena aktivirane energije uravnoteženja postaje nesigurni parametar.

Ono što je također vrlo bitno jest povezati ova dva nesigurna parametra. Kao osnovna hipotezu postavili smo da veća aktivacija rezerve, to jest veća energija uravnoteženja, znači i veću cijenu za energiju uravnoteženja. Kao što je spomenuto u opisu PICASSO projekta (poglavlje 2.2), tržište energijom uravnoteženja bazirano je na marginalnom formiranju cijena. Svi ponuđači podnose ponude te se njihove ponude slažu po cijeni od najniže do najviše (ovo je za pozitivnu energiju uravnoteženja, za negativnu je suprotno). Što znači da volumen aktivirane rezerve/energije uravnoteženja izravno postavlja cijenu. Na slici 5 lijevo prikazani su odnosi cijene uravnoteženja (plava linija) s cijenom energije (crna linija), dok je na slici 5 desno prikazan odnos varijabilne komponente cijene energije uravnoteženja s iznosom aktivirane energije uravnoteženja (ponovno kao omjer aktivirane energije i alociranog kapaciteta). Podaci su uzeti s Njemačkog tržišta aFRR energijom uravnoteženja s 15-minutnom rezolucijom. Cijenu aktivacije podijelili smo na varijabilni dio (ovisan o iznosu aktivacije, žuta linija) i fiksni dio (neovisan o iznosu aktivacije, crvena linija). Fiksni dio gotovo je konstantan tokom dana, čak više nego dan-unaprijed cijena energije. Varijabilni dio je dosta promjenjiv i kao što se vidi na slici 5 desno može se uočiti povezanost između cijene i volumena. Međutim ta povezanost nije linearna što nam govori da se pri modeliranju cijene energije uravnoteženja ne može uzeti samo ostvarena marginalna cijena energije uravnoteženja već se mora modelirati krivulja ponude i potražnje sa svaki trenutak. I upravo ovo nam je sljedeći korak kod razvoja modela.



Sl. 5.: Cijena en. uravnoteženja vs cijena energije (lijevo), cijena varijabilne en. uravnoteženja vs volumen aktivirane en. uravnoteženja (desno)

ZAKLJUČAK

Razvoj tržišta rezervi i energija uravnoteženja je uzeo maha i kroz nekoliko godina svi europski elektroenergetski sustavi će morati biti priključeni na zajedničke platforme za trgovanje. Dobra stvar je harmonizacija pravila, proizvoda i njihovih značajki pa će tako pružatelji usluga iz jedne države moći jednostavno trgovati uslugama u drugim državama. Navedeno potiče konkurenciju, smanjuje cijenu te povećava iskorištenost prekograničnih kapaciteta. Pružatelji usluga će morati koristiti složene algoritme za trgovanje kako im se ne bi dogodilo da u stvarnom vremenu ne mogu isporučiti unaprijed zakupljenu uslugu ili da su im troškovi uravnoteženja veliki. Dobra stvar robusnih modela jest da korisnik modela, tržišni igrač, može odlučiti da li će trgovati sigurnije (predvidiva, ali niža zarada) ili riskantnije (nepredvidiva, ali možda viša zarada). Osim već dizajniranog algoritma koji uzima u obzir nesigurnost aktivacije rezerve, sljedeći korak je modelirati i nesigurnost cijena i to uključujući: cijenu za energiju, cijenu za kapacitet i cijenu za energiju uravnoteženja. Kod cijene energije uravnoteženja mora se voditi računa kako ju spojiti s nesigurnom aktivacijom. Zbog uparivanja tržišta također će biti bitno uzimati u obzir i moguća zagušenja na interkonekcijskim vodovima, ali njihovo modeliranje je moguće tek kad sve platforme budu pokrenute te se budu znali rezultati.

ZAHVALA

Rad je dijelom sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost i Europska unija unutar Europskog socijalnog fonda kroz projekt Fleksibilnost mikromreža s visokim udjelom pretvarača – FLEXIBASE (PZS-2019-02-7747) te dijelom Europska unija unutar Horizon 2020 razvojnog i inovacijskog programa kroz projekt FARCROSS (grant agreement No 864274).

LITERATURA

- [1] FARCROSS, “HOME - FARCROSS,” 2021. [Online]. Dostupno: <https://farcross.eu/>. [Pristupljeno: 24-Svibanj-2021].
- [2] RTE, “RTE Customer’s area - Volumes and prices.” [Online]. Dostupno: https://clients.rte-france.com/lang/an/visiteurs/vie/mecanisme/volumes_prix/equilibrage.jsp. [Pristupljeno: 22-Siječanj-2019].
- [3] SMARD, “SMARD | SMARD - Market data,” 2021. [Online]. Dostupno: <https://www.smard.de/en>. [Pristupljeno: 24-Svibanj-2021].
- [4] regelleistung.net, “regelleistung.net,” 2021. [Online]. Dostupno: <https://www.regelleistung.net>. [Pristupljeno: 05-Ožujak-2021].
- [5] Entso-e, “ENTSO-E Transparency Platform,” 2021. [Online]. Dostupno: <https://transparency.entsoe.eu/>. [Pristupljeno: 24-Svibanj-2021].
- [6] EUROPEAN COMMISSION, “COMMISSION REGULATION (EU) 2017/2195 of 23 November 2017 establishing a guideline on electricity balancing,” Off. J. Eur. Union, 2017.

- [7] ENTSO-e, "Imbalance Netting," 2021. [Online]. Dostupno: https://www.entsoe.eu/network_codes/eb/imbalance-netting/. [Pristupljeno: 24-Svibanj-2021].
- [8] ENTSO-e, "PICASSO," 2021. [Online]. Dostupno: https://www.entsoe.eu/network_codes/eb/picasso/. [Pristupljeno: 24-Svibanj-2021].
- [9] APG, "AFRR-Cooperation Austria/Germany," 2021. [Online]. Dostupno: <https://www.apg.at/en/markt/netzregelung/sekundaerregelung/Kooperation>. [Pristupljeno: 24-Svibanj-2021].
- [10] I. Pavić, T. Capuder, i I. Kuzle, "Low carbon technologies as providers of operational flexibility in future power systems," *Appl. Energy*, vol. 168, str. 724–738, 2016.
- [11] I. Pavić, H. Pandžić, i T. Capuder, "Tight Robust Formulation for Uncertain Reserve Activation of an Electric Vehicle Aggregator," u *2021 IEEE PowerTech*, 2021, str. 1–6.
- [12] G. Pasaoglu i ostali., "Driving and parking patterns of European car drivers - a mobility survey," 2012.