

Hrvatska zaklada za znanost
Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb
Zavod za visoki napon i energetiku

FLEXIBASE

Popis uočenih nepravilnosti u modelu optimalnog nastupa na
tržištima energije i pomoćnih usluga

dr. sc. Ivan Pavić
Marija Miletić, mag. ing.
Petra Miljan, mag. ing.
prof. Željko Tomšić
Domagoj Badanjak, mag.ing.



Europska unija
Zajedno do fondova EU



04-2022

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Nastup na tržištima	2
2.1	Liberalizacija	2
2.2	Tržišta	3
2.3	Promatrana tržišta	6
3	Model	7
3.1	Matematička formulacija	7
3.2	Studija slučaja	12
4	Uočene nepravilnosti	15
4.1	Popis uočenih nepravilnosti	15
4.2	Komentar na uočene nepravilnosti	16
5	Zaključna razmatranja	20
	Literatura	21

1. Uvod

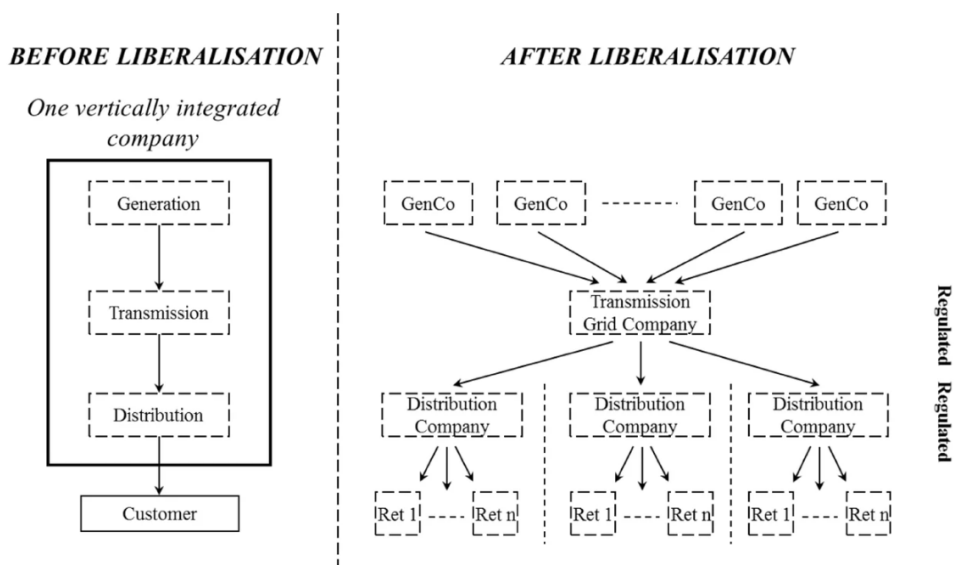
Izveštaj o opisu uočenih nepravilnosti u modelu optimalnog nastupa na tržištima energije i pomoćnih usluga ima za cilj ukratko objasniti koja se tržišta razmatraju te njihove karakteristike, obrazložiti do sad razvijenu matematičku formulaciju s detaljnim objašnjenjima svakog od ograničenja te, ono najvažnije za potrebe ovog izvještaja, navesti popis uočenih nepravilnosti i detaljno komentirati svaku od njih. Na temelju tog popisa i detaljnog obrazloženja, cilj je u budućem radu obratiti veliku pozornost na uklanjanje navedenih nepravilnosti, odnosno izbjegavanje potencijalnih. Poslije uvodnog dijela slijedi poglavlje 2 koje se dotiče tržišta te mogućnosti nastupa na njima. Potom slijedi poglavlje 3 koje je fokusirano na matematički model, odnosno formulaciju i kratki prikaz studije slučaja. Poglavlje 4 detaljno navodi i opisuje uočene nepravilnosti u modelu optimalnog nastupa na tržištima energije i pomoćnih usluga, nakon čega slijede zaključna razmatranja u poglavlju 5.

2. Nastup na tržištima

Elektroenergetski sustav 21. stoljeća je jedan od najkompleksnijih mehanizama koji su djelo ljudske kreativnosti i znanja. Iako sve počiva na izrazito jednostavnom principu u kojemu potrošnja i proizvodnja električne energije moraju biti u ravnoteži, u praksi je to izrazito složen problem koji se može razmatrati kroz niz slojeva. Uzevši u obzir isključivo problem optimalnog nastupa na tržištima električne energije i pomoćnih usluga, liberalizacija elektroenergetskog sustava te općenito trendovi energetske tranzicije i taj sloj čine veoma kompleksnim.

2.1 Liberalizacija

Iz centraliziranog i monopolističkog uređenja, današnji elektroenergetski sustav diči se tranzicijom prema liberaliziranom, decentraliziranom te otvorenom ustroju. Samim time javlja se veći broj zainteresiranih tržišnih sudionika, ali raste i broj tržišnih izvedenica na kojima je moguće nastupati. Veoma jednostavan i jasan zor o utjecaju procesa liberalizacije na ustroj elektroenergetskog sustava pruža slika 2.1.



Slika 2.1: Generalni prikaz liberalizacije tržišta [1]

Jasno je vidljivo kako je nekoć zatvoreni i reguliran sustav otvoren prema tržištu uz napomenu kako su isključivo usluge prijenosa i distribucije ostale i dalje regulirane djelatnosti zbog njihove prirode, odnosno prirodnog monopola. Među značajkama prirodnog monopola koje svakako

možemo pripisati prijenosnom i distribucijskom sustavu jesu izrazito visoka početna ulaganja te niski marginalni trošak opsluživanja svakog novog korisnika. Zainteresiranim stranama se pritom otvaraju vrata u raznim segmentima. Od razvijanja proizvodnih postrojenja, pružanja usluga opskrbe električnom energijom pa do inovativnih koncepata poput pružanja usluga fleksibilnosti. Štoviše, težnja paketa mjera Clean Energy for All Europeans Europske unije [2] jest dodatno snižavanje barijera u svim segmentima osim onih koji jesu sami po sebi prirodni monopoli. Time je cilj postepeno pružati priliku što većem broju igračima, a isto tako malim pojedincima (poput potrošača) mogućnost aktivnijeg sudjelovanja uz posredstvo posrednika poput recimo agregatora.

2.2 Tržišta

Promatrajući europski dizajn elektroenergetskog tržišta nužno je istaknuti kako u načelu mehanizam čišćenja tržišta počiva na traženju točke križanja cijena i količina sa strane ponude i potražnje, dok se ograničenja mreže te općenito karakteristike sustava ne uzimaju u obzir. Što je suprotnost američkom sustavu, uz činjenicu da je američki sustav centraliziran, a europski decentraliziran. Tako se po čišćenju tržišta provodi provjera izvedivosti te kasnije redispječ ukoliko je potrebno.

Elektroenergetsko tržište se sastoji od više sastavnica koje svojim različitim karakteristikama pružaju različite mogućnosti sudionicima na elektroenergetskom tržištu. Od špekulativnih radnji do ispravljanja grešaka u prognozi proizvodnje ili potrošnje tik pred sam trenutak predviđene isporuke električne energije. Vrijedi navesti glavne tržišne mehanizme:

- Dugoročna tržišta
- Dan-unaprijed tržište
- Tržišta pomoćnih usluga
- Unutardnevna tržišta
- Tržišta uravnoteženja

Dugoročna tržišta se, među ostalim, odnose i na trgovanje derivatima, te služe kao instrument osiguranja od mogućih fluktuacija cijena. Proizvođači električne energije se tako mogu osigurati od eventualno veoma niskih cijena na primjerice dan-unaprijed tržištu, a opskrbljivači od veoma visokih cijena. U svakom slučaju, postignuta cijena na neki dulji rok omogućava svim tržišnim sudionicima jasnije planiranje poslovnih planova, čime mogu lakše doći i do kreditiranja te investicija ukoliko im je to cilj. Osim osiguranja od promjena cijena, isto tako pojedini tržišni sudionici mogu računati upravo na volatilnost cijena te zato iz špekulativnih svrha sudjelovati na dugoročnim tržištima. Pritom treba razlikovati je li posao sklopljen bilateralno ili

putem burze električne energije. Iako je možda jednostavnije, odnosno bez treće strane, sklopiti posao bilateralno te samim time eventualno jeftinije, trgovanje preko burze pruža zaštitu za obje strane te samim time uvelike smanjuje rizik od neispunjenja obveza te povećava mogućnost pronalaska prikladnog para kupac-prodavatelj zbog veće likvidnosti. U priču dugoročnih tržišta još vrijedi uklopiti i trgovanje opcijama. One nude priliku za osiguranje od volatilnosti, ali i mogućnost špekulacije, no na principu da se kupuje/prodaje mogućnost kupnje/prodaje električne energije u nekoj daljoj točki vremena. Primjerice, opskrbljivač po nekoj cijeni može kupiti opciju da ima mogućnost kupiti određeni volumen električne energije po određenoj cijeni u nekom dogovorenom trenutku u budućnosti. Kada taj trenutak dođe, ukoliko mu prije dogovorena cijena odgovara, aktivirat će kupljenu opciju, a u suprotnom neće te će mu jedini trošak biti premija opcije, a ne cjelokupna cijene tada željenog volumena električne energije.

Dan-unaprijed i unutarдневно tržište se mogu ubrojiti u tržišta energije koja se odvijaju ne puno prije samo isporuke. To su možda i najspominjanija tržišta, a organizirana su na burzama električne energije, kao što je u Hrvatskoj CROPEX [3]. Dan-unaprijed tržište je organizirano na principu aukcije jedan dan prije isporuke električne energije te ovisno o zrelosti samog tržišta trgovani produkti mogu biti isključivo na satnoj razini ili čak i okviru blok ponuda za više sati. U svakom slučaju, u 12:00 dan prije isporuke (dakle 12 sati prije prvog sata isporuke u narednom danu) se prikupljanje ponuda zaustavlja, operator tržišta putem svog algoritma čisti tržište te po dobivenim rezultatima iste objavljuje u što skorijem roku od zaključenja prikupljanja ponuda. Unutarдневно trgovanje se pak odvija na sam dan isporuke električne energije te može poslužiti sudionicima za ispravljanje pogrešaka prilikom davanja rasporeda na kronološki prethodnim tržištima. Posebice iz razloga jer se odvija prije aktivacije rezervi. Za razliku od dan-unaprijed tržišta, unutarдневно počiva na principu kontinuiranog trgovanja te svaka prihvaćena ponuda dobiva upravo željenu cijenu, dok u dan-unaprijed mehanizmu najskuplja prihvaćena ponuda predstavlja cijenu za sve sudionike. Porastom udjela obnovljivih izvora energije te nesigurnosti koje se uz njih vežu, raste i važnost unutar dnevnog tržišta, odnosno svih tržišta koja se odvijaju blizu samog trenutka isporučenja električne energije.

Rezerve i tržište uravnoteženja služe prije svega u svrhu uravnoteženja sustava, a operator prijenosnog sustava financijski kažnjava svako odstupanje tržišnog sudionika putem poravnjanja neravnoteže po realiziranim događajima. Tim sredstvima podmiruje usluge zatražene na tržištu rezervi i uravnoteženja. Operator prijenosnog sustava sustav može balansirati generalno na tri načina, koristeći: i) automatske rezerve, ii) manualne rezerve ili iii) mehanizme uravnoteženja.

Automatske rezerve, kao što im ime i govori, su predodređene za automatsku aktivaciju prilikom brzih (i nenadanih) neravnoteža, a kao potencijalni okidač vrijedi spomenuti recimo pad frekvencije. Razlikujemo primarnu rezervu te sekundarnu rezervu. Primarna se mora aktivirati u roku 30 sekundi i dužna je zadržati razinu frekvencije. Sekundarna pak mora vratiti frekvenciju na nominalnu razinu i vrijeme aktivacije je između 30 sekundi i 15 minuta.

Za manualne rezerve se pak vežu nešto sporiji slučajevi te je tu nužno direktno uplitanje operatora prijenosnog sustava kako bi se poslali signali pružatelju manualnih rezervi. Vrijeme

aktivacije je od 15 minuta nadalje i pomažu u vraćanju frekvencije na nominalnu razinu.

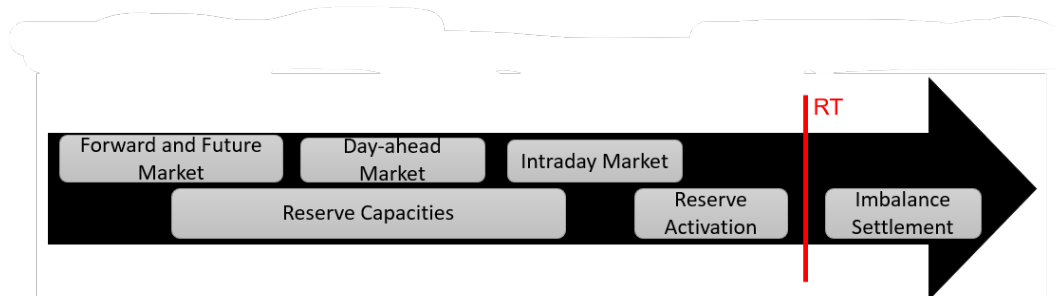
Dok se treći, potonji, mehanizam aktivira na temelju tržišnih rezultata te se može promatrati u sprezi s manualnim rezervama.

Što se tiče pružanja usluga rezervi, nekada je to po slovu zakona bilo obvezno za sve veće elektrane, dok je danas tendencija liberalizacije tržišta rezervi. Pritom isto tako treba imati na umu razliku između kapaciteta (MW) i energije (MWh). Automatske rezerve uobičajeno imaju uglavnom tržište kapaciteta (€/MW), a trošak aktivacije se računa putem u odnosu na realizirane tržišne cijene (npr. dan-unaprijed). Manualne rezerve pak uobičajeno imaju kako tržište kapaciteta, tako i aktivacije. S time da je tržište aktivacije uobičajeno zvati tržište uravnoteženja.

Ukoliko postoji tržište uravnoteženja, kao što je već i napisano, upravo tamo se trguje aktivacijskim cijenama manualnih rezervi. Osim što pruža mogućnost svim slobodnim kapacitetima generiranje dodatnog prihoda, isto tako može poslužiti kao referentna cijena korištena za financijska poravnanja neravnoteža. Sudionik na tržištu uravnoteženja može ponuditi svoje usluge u oba smjera. Tako može pružati, tj. ponuditi pružanje, usluge povećanje proizvodnje ili smanjenje potrošnje (sustavu nedostaje energije), odnosno smanjenje proizvodnje ili povećanje potrošnje (sustav ima višak energije). Ponuđači bivaju plaćeni po istom principu kao i u unutardnevnom trgovanju, dakle svatko tko je aktiviran dobije koliko je tražio.

Primjetno je kako je je tržište električnom energijom prilično razvijeno te kompleksno, uz naznake mogućeg razvoja i novih tipova tržišta. Samim time raste važnost razvoja strategija optimalnog nastupa na tržištima.

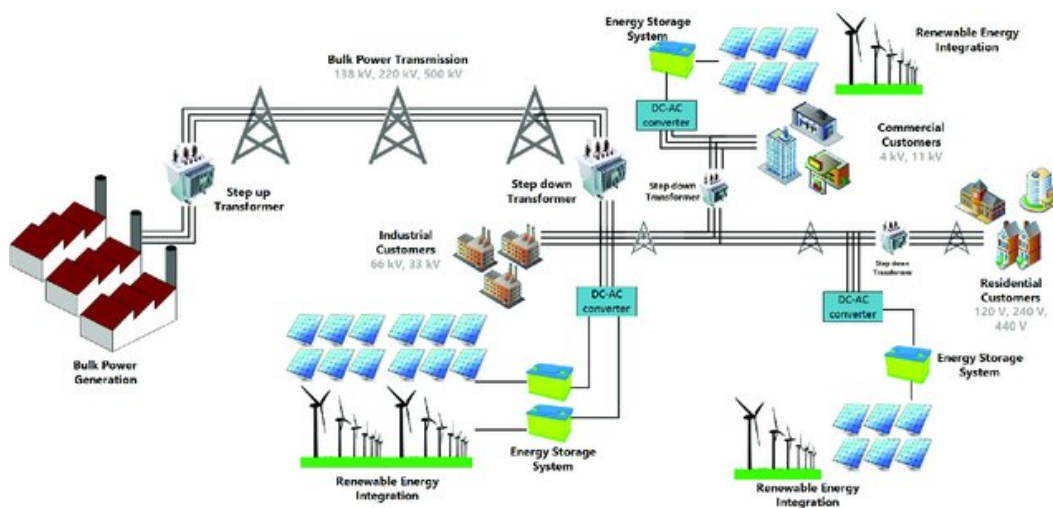
Kao kratki sažetak opisa svih gore navedenih tržišta, slika 2.2 na veoma jednostavan i zoran način prikazuje kronološki slijed pojedinih tržišta. RT označuje stvarno vrijeme (eng. *real-time*), dok su nazivi ostalih sastavnica elektroenergetskog tržišta dani na engleskom jeziku. *Forward and Future Market* označavaju dugoročna tržišta, *Day-ahead Market* je dan-unaprijed tržište, *Intraday Market* - unutardnevno tržište, a *Reserve Capacities* i *Reserve Activation* označavaju rezervaciju kapaciteta, odnosno aktivaciju. Na posljertku, *Imbalance Settlement* jest financijsko poravnanje neravnoteže.



Slika 2.2: Kronološki prikaz tržišta

2.3 Promatrana tržišta

U sklopu projekta FLEXIBASE, u fokusu interesa jest mikromreža te, među ostalim, njen optimalni nastup na tržištima energije i pomoćnih usluga. Uzevši u obzir koncept mikromreže te sve njene moguće sastavnice, logičnim se nameće odbacivanje dugoročnih tržišta te preusmeravanje pozornosti na ostatak spektra sastavnica elektroenergetskog tržišta. Prije svega su to dan-unaprijed i unutar-dnevno tržište te tržišta pomoćnih usluga, a onda i druge izvedenice. Mikromreža se može sastojati od različitih oblika potrošača i proizvođača električne energije, dapače pojedini entiteti imaju i mogućnost skladištenja električne energije. Radi bolje predodžbe, prikazana je i slika 3.2.



Slika 2.3: Primjer mikromreže prema [4]

Upravo raznovrsnost sastavnica mikromreže pruža razne mogućnosti prilikom nastupa na tržištima električne energije i pomoćnih usluga. No potrebno je razraditi optimalnu strategiju nastupa kojom će se generirati dodatan profit, ili barem smanjiti troškovi, a istovremeno imajući na umu ograničenja te nužnost osiguranja pouzdane opskrbe električnom energije i stabilnost mikromreže i prilikom nenadanih situacija poput recimo prelaska u otočni način rada. U sklopu ovog izvještaja primarno je naglasak na optimalnom nastupu na tržištima, dakle isključivo se promatra mrežni način rada mikromreže, ali neovisno o tome, razvija se takav model upravljanja mikromrežom koji će biti pouzdan u mrežnom, otočnom te prijelazima iz jednog u drugi režim rada.

3. Model

Mikromreža, smještena na distribucijskoj razini, pomoću elemenata koje se nalaze u njoj može sudjelovati na tržištima energije i pomoćnih usluga, dok je u mrežnom načinu rada. Sudjelovanje na tržištima električne energije i pomoćnih usluga predstavlja dvostruku prednost za mikromrežu. U jednu ruku se putem tržišta uvijek može pokriti potreba za električnom energijom tereta koji se nalaze u sklopu mikromreže, naravno ako tehnička ograničenja mreže to dopuštaju. U drugu ruku pak nastupom na različitim tržištima može se postići ekonomska korist, tj. profit. Trenutno su sva navedene tržišta smještena na prijenosnoj razini te stoga pritom treba imati na umu tokove snaga kako u mikromreži, tako i prema ostatku mreže, odnosno vodove koji vode prema višim (prijenosnim razinama). Osim zadovoljenja tehničkih ograničenja, bitno je odrediti optimalan nastup na tržištima energije i pomoćnih usluga, kako bi se uistinu postigao profit, a ne negativan efekt.

3.1 Matematička formulacija

Trenutna matematička formulacija modela optimalnog nastupa mikromreže na tržištu energije te pomoćnih usluga prikazana je u nastavku ovog potpoglavlja. Iako se ovaj izvještaj primarno oslanja na ekonomsku stranu projekta, odnosno optimalan nastup mikromreže na tržištu energije i pomoćnih usluga te je dolje priloženi model tako koncipiran, bitno je naglasiti kako se u sklopu cjelokupnog projekta vodi računa uvelike i o tehničkoj strani rada mikromreže. Drugim riječima, u obzir se uzimaju kako mrežni, tako i otočni način rada te prijelazna stanja. Pritom je veliki naglasak stavljen na zaštiti same mikromreže te kako osigurati stabilan i pouzdan pogon u ekstremnim situacijama. No kako o nastupu na tržištu ima, prije svega, smisla pričati u mrežnom načinu rada, to je i tema ovog izvještaja. Nadalje, baterijski spremnik te generički prikaz generator (nije definiran tip) su uzeti trenutno u obzir za nastup na tržištu. Tim pristupom je obuhvaćen veliki dio potencijalnih komponenti mikromreže, no ima prostora za dodavanje još nekih elemenata i mogućnosti u budućem radu.

Funkcija cilja (3.1) minimizira trošak sudjelovanja na raznim tržištima (tj. maksimizira profit). Promatrana tržišta su, dan-unaprijed tržište, unutarдневно i tržište uravnoteženja. Parametar λ_t^* označava satne cijene za promatrana tržišta, odnosno λ_i^{gen} trošak proizvodnje iz pojedinog generatora. Zadnja dva člana $\lambda^{\uparrow bound} \cdot x_{i,t}^{\uparrow bound} + \lambda^{\downarrow bound} \cdot x_{i,t}^{\downarrow bound}$ predstavljaju penalizaciju odstupanja od dozvoljenih granica kretanja napona po principu "*soft constraints*". Naime, u pojedinim trenucima se ovim načinom dopušta prelazanje nazivnih granica (bilo ispod ili iznad), ali uz strogu kaznu kako bi se to koristilo isključivo u trenucima prijeko potrebe za

sustav. Pripadno ograničenje zabranjuje uzastopno prekršenje nazivnih granica.

$$\min \sum_t^T \sum_i^I [DAM_{i,t}^{\text{cost}} + IDM_{i,t}^{\text{cost}} + BM_{i,t}^{\text{cost}} + p_{i,t}^{\text{gen}} \cdot \lambda_{\text{gen}_i} + \lambda^{\uparrow \text{bound}} \cdot x_{i,t}^{\uparrow \text{bound}} + \lambda^{\downarrow \text{bound}} \cdot x_{i,t}^{\downarrow \text{bound}}] \quad (3.1)$$

gdje je

$$DAM_{i,t}^{\text{cost}} = (ch_{i,t}^{\text{DA}} - dis_{i,t}^{\text{DA}} - p_{i,t}^{\text{gen,DA}}) \cdot \lambda_t^{\text{DA}}, \quad \forall i, t \quad (3.2)$$

$$IDM_{i,t}^{\text{cost}} = (ch_{i,t}^{\text{ID}} - dis_{i,t}^{\text{ID}} - p_{i,t}^{\text{gen,ID}}) \cdot \lambda_t^{\text{ID}}, \quad \forall i, t \quad (3.3)$$

$$BM_{i,t}^{\text{cost}} = dev_{i,t}^{\uparrow} \cdot \lambda^{\text{BM}\uparrow} + dev_{i,t}^{\downarrow} \cdot \lambda^{\text{BM}\downarrow}, \quad \forall i, t \quad (3.4)$$

Ograničenja (3.5) i (3.6) ograničavaju maksimalne snage punjenja i pražnjenja na dan-unaprijed tržištu, pritom uzimajući u obzir binarnu varijablu $x_{i,t}^{\text{DA}}$ koja određuje puni li se ili prazni baterijski spremnik u određenom vremenskom trenutku, a $dev_{i,t}^*$ predstavlja devijaciju od rasporeda nastupa na dan-unaprijed tržištu koje se onda mora rješavati na tržištu uravnoteženja.

$$dis_{i,t}^{\text{DA}} - dev_{i,t}^{\text{batt},\uparrow} \leq \bar{P}_i^{\text{dch}} \cdot x_{i,t}^{\text{DA}} \quad \forall i, t \quad (3.5)$$

$$ch_{i,t}^{\text{DA}} - dev_{i,t}^{\text{batt},\downarrow} \leq \bar{P}_i^{\text{ch}} \cdot (1 - x_{i,t}^{\text{DA}}) \quad \forall i, t \quad (3.6)$$

Isti princip je korišten i za nastup na unutardnevnom tržištu. Stoga su navedena ograničenja (3.7) i (3.8).

$$dis_{i,t}^{\text{ID}} \leq \bar{P}_i^{\text{dch}} \cdot x_{i,t}^{\text{ID}} \quad \forall i, t \quad (3.7)$$

$$ch_{i,t}^{\text{ID}} \leq \bar{P}_i^{\text{ch}} \cdot (1 - x_{i,t}^{\text{ID}}) \quad \forall i, t \quad (3.8)$$

Kako bi se objedinili nastupi baterijskog spremnika na različitim tržištima te uvela razlika između "financijskog" i "fizičkog" nastupa, ograničenje (3.9) sumira sve aktivnosti baterijskog spremnika te, posljedično, varijabla $g_{i,t}$ prikazuje neto aktivnost baterije.

$$g_{i,t} = ch_{i,t}^{\text{DA}} - dev_{i,t}^{\text{batt},\downarrow} + ch_{i,t}^{\text{ID}} - dis_{i,t}^{\text{DA}} + dev_{i,t}^{\text{batt},\uparrow} - dis_{i,t}^{\text{ID}} \quad \forall i, t \quad (3.9)$$

Ograničenje (3.10) je poveznica između neto aktivnosti baterijskog spremnika ($g_{i,t}$), te procesa fizikalnog punjenja ($c_{i,t}$) i pražnjenja ($d_{i,t}$) baterijskog spremnika.

$$g_{s,k,t} = c_{s,k,t} - d_{s,k,t} \quad \forall s, k, t \quad (3.10)$$

Ograničenje (3.11) prikazuje tok aktivne snage između dva povezana čvorišta. $P_{ij,t}$ predstavlja aktivnu snagu između čvorišta $i - j$, dok je $i_{ij,t}$ kvadrat struje, a R_{ij} otpor kabla. $p_{j,t}^{gen}$ je varijabla koja predstavlja izlaznu snagu generatora u čvorištu j u vremenskom trenutku t , dok je $P_{j,t}^{load}$ parametar koji određuje potrebe tereta u čvorištu j . Pražnjenje baterije predstavlja varijabla $d_{j,t}$, dok $c_{j,t}$ predstavlja punjenje baterije. Pritom treba imati na umu da se u jednom trenutku određena baterija može isključivo ili puniti ili prazniti, stoga u svakom od promatranih trenutaka samo jedna od dvije varijable ($d_{j,t}, c_{j,t}$) može biti različita od nule. Model je tako koncipiran da u svakom čvorištu može promatrati isključivo jednu bateriju, no uz male preinake se vrlo lako postigne opcija razlikovanja baterija unutar čvorišta j . Zadnji član ograničenja je $\sum P_{jm,t}$ te predstavlja sumu svih tokova aktivne snage između čvorišta j i ostalih susjednih čvorišta.

$$p_{ij,t} = i_{ij,t} \cdot R_{ij} - (p_{j,t}^{gen} + d_{j,t} - p_{j,t}^{load} - c_{j,t}) + \sum_{m:j \rightarrow m} P_{jm,t}, \quad \forall ij, t \quad (3.11)$$

Tokovi reaktivne snage modelirani su ograničenjem (3.12). Princip je analogan kao i u prethodnom ograničenju, uz napomenu kako su tu sada prisutne varijable vezane za reaktivnu snagu te pripadni parametri. Primjerice, reaktancija je relevantna mjera za jalovi električni otpor. (X_{ij}). Reaktivnu snagu mogu pružati generatori, ali i baterije koje koriste prikladne izmjenjivače, stoga su u matematičkoj formulaciji pretpostavljene obje opcije (uvedene obje varijable), dok je reaktivni teret parametar.

$$q_{ij,t} = i_{ij,t} \cdot X_{ij} - (q_{j,t}^{gen} - q_{j,t}^{load} + q_{j,t}^{batt}) + \sum_{m:j \rightarrow m} Q_{jm,t}, \quad \forall ij, t \quad (3.12)$$

Ograničenje (3.13) se odnosi na pad napona između čvorišta. Pritom treba naglasiti da varijabla $u_{i,t}$ predstavlja kvadrat napona.

$$u_{j,t} = u_{i,t} - 2(R_{ij,e}P_{ij,t} + X_{ij,e}Q_{ij,t}) + i_{ij,t}(R_{ij,e}^2 + X_{ij,e}^2), \quad \forall i, j, t \quad (3.13)$$

Ograničenje (3.14) bi u egzaktnoj formulaciji trebalo biti jednakost, no takva formulacija je nekonveksna što može prouzročiti velike probleme pri proračunu optimalnog rješenja, odnosno

problem može biti i neizvediv. Stoga je praksa nekonveksni problem relaksirati tako da bude konveksan, a pritom da ograničenje zadrži svoju bit. U ovom slučaju, originalno ograničenje u obliku jednakosti relaksirano je u oblik konusa drugog stupnja (SOCP)[5], odnosno nejednakost koja povezuje struju, napon te snagu.

$$i_{ij,t} \cdot u_{i,t} \geq p_{ij}^2 + q_{ij}^2, \quad \forall ij, t \quad (3.14)$$

Ograničenje (3.15) po principu analognom kao i u slučaju baterijskih spremnika razlaže proizvodnju iz generatora prema nastupima na različitim tržištima, pritom uzimajući u obzir i moguće devijacije. Štoviše, ograničenja (3.16) i (3.17) sumiraju devijacije generatora i baterijskih spremnika kako bi onda u funkciji cilja to bilo ispravno penalizirano.

$$p_{i,t}^{\text{gen}} = p_{i,t}^{\text{gen,DA}} + p_{i,t}^{\text{gen,ID}} - dev_{i,t}^{\text{gen},\uparrow} + dev_{i,t}^{\text{gen},\downarrow} \quad \forall i, t \quad (3.15)$$

$$dev_{i,t}^{\uparrow} = dev_{i,t}^{\text{gen},\uparrow} + dev_{i,t}^{\text{batt},\uparrow} \quad \forall i, t \quad (3.16)$$

$$dev_{i,t}^{\downarrow} = dev_{i,t}^{\text{gen},\downarrow} + dev_{i,t}^{\text{batt},\downarrow} \quad \forall i, t \quad (3.17)$$

Ograničenja (3.18) i (3.19) ograničavaju minimalne i maksimalne dozvoljene snage generatora, kako za aktivnu, tako i za reaktivnu snagu.

$$P_i^{\text{gen,min}} \cdot x_{i,t}^{\text{gen}} \leq p_{i,t}^{\text{gen}} \leq P_i^{\text{gen,max}} \cdot x_{i,t}^{\text{gen}}, \quad \forall i, t \quad (3.18)$$

$$Q_i^{\text{gen,min}} x_{i,t}^{\text{gen}} \leq q_{i,t}^{\text{gen}} \leq Q_i^{\text{gen,max}} x_{i,t}^{\text{gen}}, \quad \forall i, t \quad (3.19)$$

Ograničenje (3.20) limitira iznos kvadrata napona u svakom od čvorišta na vrijednost između U_i^{min} te U_i^{max} , s time da varijabla $BND_{i,t}^{\downarrow}$ pruža mogućnost smanjivanja te granice uz propisanu kaznu u funkciji cilja, dok varijabla $BND_{i,t}^{\uparrow}$ omogućuje pak povećanje gornje granice, također uz primjerenu penalizaciju. Štoviše, binarne varijable su prisutne iz razloga što je takvo kršenje zabranjeno uzastopno u više vremenskih trenutaka, a to je određeno ograničenjem (3.21) za donju granicu, odnosno ograničenjem (3.22) za gornju granicu.

$$U_i^{\text{min}} - BND_{i,t}^{\downarrow} \cdot x_{i,t}^{\downarrow\text{bound}} \leq u_{i,t} \leq U_i^{\text{max}} + BND_{i,t}^{\uparrow} \cdot x_{i,t}^{\uparrow\text{bound}} \quad \forall i, t \quad (3.20)$$

$$\sum_t^{t+n} x_{i,t}^{\downarrow\text{bound}} \leq 1 \quad \forall i, t \quad (3.21)$$

$$\sum_t^{t+n} x_{i,t}^{\uparrow\text{bound}} \leq 1 \quad \forall i, t \quad (3.22)$$

Stanje energije dostupnih baterijskih spremnika je modelirano ograničenjem (3.23), gdje varijabla $soe_{i,t}$ prikazuje stanje napunjenosti energijom baterijskog spremnika na čvorištu i u vremenskom trenutku t , dok parametar η predstavlja neefikasnost prisutnu tijekom punjenja i pražnjenja baterije.

$$soe_{i,t} = soe_{i,t-1} - d_{i,t} \cdot \frac{1}{\eta} + c_{i,t} \cdot \eta \quad (3.23)$$

Ograničenje (3.24) ograničava maksimalnu snagu punjenja baterijskog spremnika u čvorištu i , dok ograničenje (3.25) po istom principu ograničava maksimalnu snagu pražnjenja baterijskog spremnika u čvorištu i .

$$P_i^{\text{ch,max}} \cdot x_{i,t}^{\text{batt}} \geq c_{i,t}, \quad \forall i, t \quad (3.24)$$

$$P_i^{\text{dch,max}} \cdot (1 - x_{i,t}^{\text{batt}}) \geq d_{i,t}, \quad \forall i, t \quad (3.25)$$

Početno stanje energije baterijskog spremnika u čvorištu i određeno je ograničenjem (3.26).

$$soe_{i,0} = 0, \quad \forall i \quad (3.26)$$

Ograničenje (3.27) označava kapacitet promatrane baterije u čvorištu i . B_i^{cap} je parametar, odnosno jedna od glavnih tehničkih karakteristika svake baterije.

$$soe_{i,t} \leq B_i^{\text{cap}}, \quad \forall i, t \quad (3.27)$$

Uz prikladni izmjenjivač, baterijski spremnik može uz aktivnu snagu pružati i reaktivnu. Kako bi se ograničila ukupna snaga koju određeni baterijski spremnik može otpustiti ili primiti u određenom trenutku, uvedena su ograničenja (3.28) i (3.29). Varijabla q^{batt} može biti i negativna i pozitivna, jer reaktivna snaga može biti nuđena kako u induktivnom tako i u kapacitivnom režimu.

$$(p_i^{\text{ch}})^2 \geq (c_{i,t})^2 + (q_{i,t}^{\text{batt}})^2, \quad \forall i, t \quad (3.28)$$

$$(p_i^{\text{dch}})^2 \geq (d_{i,t})^2 + (q_{i,t}^{\text{batt}})^2, \quad \forall i, t \quad (3.29)$$

Ograničenja 3.30, 3.31, 3.32 i 3.33 se odnose na frekvenciju sustava uvrštene u model po uzoru na [6]

$$rocof_t = \left(\sum_{i=i}^N [p_{i,t}^{\text{gen}} + g_{i,t}] - Df_{t-1} - u_t \right) / 2H, \quad \forall t \quad (3.30)$$

$$rocof_t^{MIN} \leq rocof_t \leq rocof_t^{MAX}, \quad \forall t \quad (3.31)$$

$$f_t = f_{t-1} + rocof_t, \quad \forall t \quad (3.32)$$

$$f^{MIN} \leq f_t \leq f^{MAX}, \quad \forall t \quad (3.33)$$

3.2 Studija slučaja

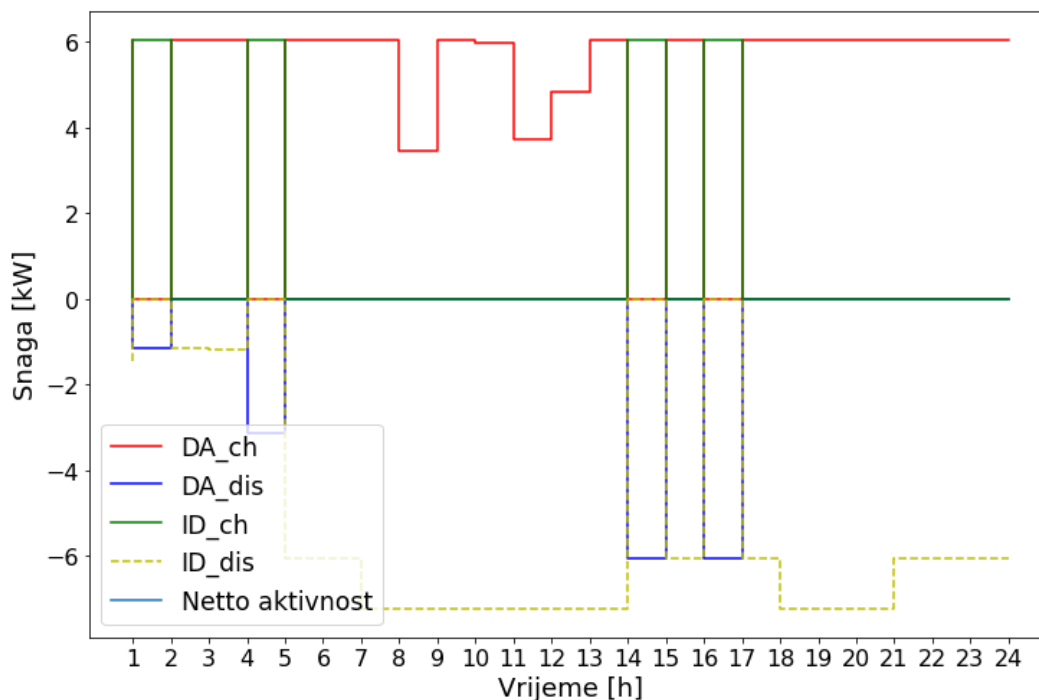
Matematička formulacija navedena u prethodnom potpoglavlju razmatra se na mikromreži čija je topologija prikazana na slici 3.2. Slika prikazuje eksplicitno generatore, a još su prisutni i baterijski spremnici čije lokacije se mijenjaju kako bi se promatrali različiti scenariji. Buduća razmatranja trebaju uzeti i druge elemente u obzir, no ovo predstavlja dobar temelj za razvoj i ispitivanje modela optimalnog nastupa na tržištima električne energije i pomoćnih usluga.

Na temelju proučavanja same trenutne matematičke formulacije te rezultata modela baziranih na prikazanoj mikromreži u sljedećem poglavlju će biti navedene uočene nepravilnosti te detaljno opisane uz popratne komentare.

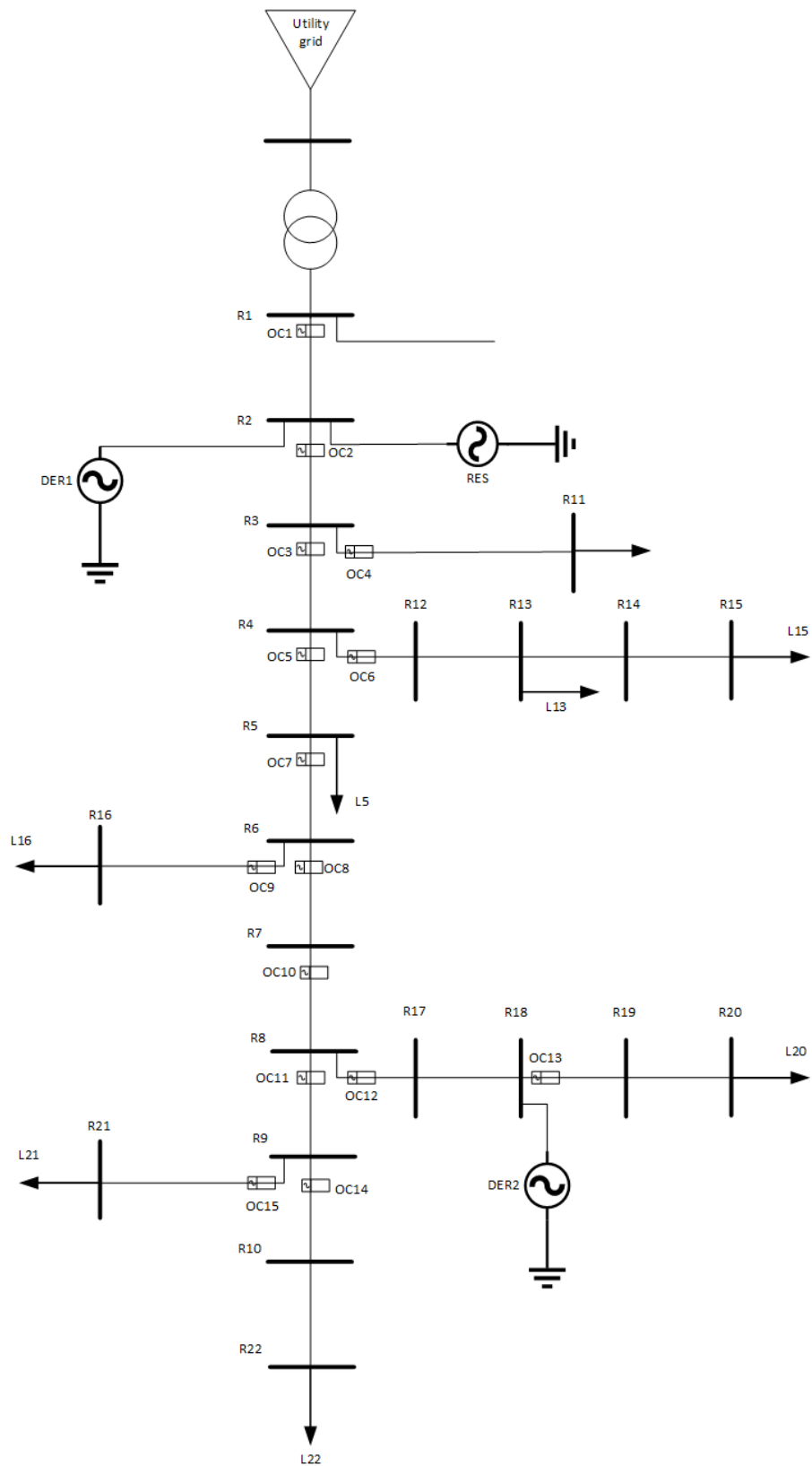
Zanimljivo je primijetiti na primjeru baterije mnogostruke prednosti nastupa na različitim tržištima. Tako se na slici 3.1 promatra aktivnost jednog baterijskog spremnika na dan-unaprijed i unutar dnevnog tržištu. Pritom je za potrebe ovog primjera uzeta u obzir jedna velika pretpostavka - savršena prognoza cijena na promatranim tržištima. Osim drugačijeg uređenja dvaju promatranih tržišta, odlikuju ih i drugačije realizirane cijene za pojedine vremenske trenutke. Upravo tu činjenicu operator promatranog baterijskog spremnika iskorištava uvelike kako bi povećao profit. Naime, ukoliko bi se promatrao nastup baterijskog spremnika na samo jednom tržištu (nebitno je li to dan-unaprijed ili unutar dnevnog) - baterijski spremnik bi se punio u trenucima niskih cijena električne energije, dok bi se prazio (tj. prodavao) u trenucima visokih cijena. Eventualna velika frekventnost ciklusa punjenja i pražnjenja baterijskog spremnika bi mogla negativno utjecati na životni vijek baterijskog spremnika, tj. degradirati njegova svojstva. Dok u slučaju mogućnosti nastupa na više tržišta, operatoru baterijskog spremnika se nudi mogućnost arbitraže te čak i smanjenje degradacije baterije po trgovanoj jedinici električne energije. Naime, obrativši pozornost na sliku 3.1, lako se daje uočiti kako se u pojedinim trenucima baterija nominalno puni na dan-unaprijed tržištu, a prazni na unutar dnevnog za isti promatrani vremenski trenutak. Naravno, fizikalno je nemoguće istovremeno punjenje i pražnjenje baterijskog spremnika, stoga je priložena i netto aktivnost baterije, odnosno realni prikaz načina rada baterijskog spremnika u određenom trenutku. Vrijedi spomenuti odmah jedan nedostatak ovog prikaza, a to je vremenska rezolucija. Naime, teoretski bi bilo moguće da baterijski spremnik unutar jednog promatranog sata određeno vrijeme prodaje električnu energiju, tj. prazni se, a drugi dio sata se puni. Bilo kako bilo, obvezujući se na suprotne smjerove

trgovanja na različitim tržištima, operator baterijskog spremnika energija može zarađivati uz smanjenu ili čak u potpunosti bez fizikalne aktivnosti baterijskog spremnika. Time se smanjuje negativan utjecaj cikličkog punjenja i pražnjenja te se generira profit isključivo na temelju potencijala (snagom i kapacitetom) konkretnog baterijskog spremnika. Daljnja analiza treba uključiti i generatore kao drugi tip elemenata prisutnih u mikromreži, ali isto tako i rezerve kapaciteta kao usluga koja se može nuditi. Osim toga, elementi mikromreže mogu pružati razne usluge fleksibilnosti koje su poticane i od strane Europske unije u svrhu što uspješnije i brže tranzicije prema visokom udjelu obnovljivih izvora energije te decentraliziranoj strukturi. Stoga je ovdje bio prikazan samo jedna od (ali veoma slikovit) od mnogih mogućih opcija primjene, u ovom slučaju, baterijskog spremnika kao dijela mikromreže.

Aktivnost baterijskog spremnika



Slika 3.1: Primjer tržišne arbitraže baterijskog spremnika



14
Slika 3.2: Primjer mikromreže za laboratorijska ispitivanja

4. Uočene nepravilnosti

Prilikom razvoja matematičke formulacije modela optimalnog nastupa na tržištima energije i pomoćnih usluga, cilj je bio uklopiti te, ekonomske, ciljeve, ali i tehničke. Drugim riječima, puna pozornost se obraćala na oba dva upravljačka sloja. Stoga se model uvelike oslanja na AC OPF. Za razliku od DC OPF-a koji je nešto manje računski zahtjevan, AC OPF je u svojoj prirodi nekonveksan problem koji obuhvaća aktivnu i reaktivnu snagu. Uz potrebne relaksacije osigurano je da problem bude linearan i konveksan, te samim time izvediv na većini danas dostupnih komercijalnih solvera. U poglavlju 3 već je dan naglasak na ograničenje (3.14) koje je u svojoj egzaktnoj formi jednakost te time čini model nekonveksnim. Relaksacijom prelazi u konusni oblik drugog reda koji nije konveksan, te se time postigla konveksnost samog problema. Problemi uočeni prilikom razvoja modela su dijelom vezani za AC OPF, a dijelom neovisni o optimizaciji tokova snaga. U nastavku je dana tablica uočenih nepravilnosti, a potom će svaka od njih biti opisana.

4.1 Popis uočenih nepravilnosti

Tablica 4.1: Popis uočenih nepravilnosti u modelu optimalnog nastupa na tržištima energije i pomoćnih usluga

N	Uočena nepravilnost
1	Poteškoće prilikom izvođenja nekonveksnog problema
2	Broj varijabli za opis nastupa svakog elementa mreže na različitim tržištima
3	Odnos elemenata mikromreže prema teretu
4	Opseg promatranih tržišta
5	Broj binarnih varijabli
6	Slijed čišćenja tržišta
7	Prognoze kretanja cijena na tržištima
8	Regulatorna ograničenja
9	Osjetljivost prijelaza na otočni način rada
10	Ograničenje na radijalne probleme
11	Utjecaj <i>soft constraintsa</i>
12	Modeliranje elemenata mikromreže

4.2 Komentar na uočene nepravilnosti

U tablici 4.1 dan je popis uočenih nepravilnosti modela optimalnog nastupa mikromreže na tržištima energije i pomoćnih usluga. Rađen je prema trenutnoj matematičkoj formulaciji modela te poteškoćama i nepravilnostima koje su uočene prilikom isprobavanja na primjeru mikromreže dane u poglavlju 3.2.

Krenuvši s prvo spomenutom nepravilnošću - poteškoće izvođenja nekonveksnog problema, vrijedi spomenuti kako danas postoje komercijalno dostupni solveri koji se mogu nositi i s nekonveksnim problemima. U egzaktnoj formulaciji i ovaj problem je nekonveksan te je isprobana računaska zahtjevnost takvog modela. U načelu, manji modeli mikromreža se pomoću pojedinih solvera mogu riješiti, no vrijeme izračuna nije zanemarivo, a s porastom broja čvorišta, odnosno općenito kompleksnosti mikromreže (različiti elementi, usluge,...) vrlo lako problem postaje nerješiv. Stoga je u biti već i u ovdje priloženoj matematičkoj formulaciji dan relaksiran problem kojeg većina solvera može bez poteškoća riješiti.

Drugi problem ili nepravilnost može prouzročiti velik broj varijabli potreban za opis nastupa svakog elementa mreže na različitim tržištima. Naime, već se na primjeru baterijskog spremnika i ograničenog broja tržišta jasno vidi kako su za svako od tržišta namijenjene pripadne varijable za punjenje i pražnjenje konkretnog baterijskog spremnika energije. Time se veoma brzo povećava ukupan broj varijabli ovisno o broju promatranih tržišta te vrsti i broju promatranih elemenata mikromreže. To bez pogovora povećava kompleksnost rješivosti optimizacijskog problema, a u najgorem slučaju može uzrokovati i neizvedivost. Ili bolje rečeno, ukoliko se ne vodi računa o minimalnom potrebnom broju varijabli kako bi se uspješno modelirali i prikazali nastupi na različitim tržištima može smanjiti moć optimizacijskog modela u vidu sposobnosti hvatanja u koštac s kompleksnijim mikromrežama (broj čvorišta, tipovi elemenata i sl.).

Treća nepravilnost se tiče interpretacije kako definicije same mikromreže, tako i općenito načina funkcioniranja elektroenergetskog sustava, ali i perspektive iz koje se pristupa problemu. Naime, potrebno je pobliže definirati kakvi su odnosi između svih elemenata u mreži, posebice s jedne strane baterijskih spremnika i generatora, a s druge raznih tereta. Tu se misli na naplatu opskrbe tereta te odnos energije koju je nužno isporučiti teretima te ostatka namijenjenog za stvaranje dodatnog profita na tržištima električne energije i pomoćnih usluga. Načelno svi elementi mikromreže nastupaju kao jedna cjelina te je upravo njihova komplementarnost jedna od prednosti prilikom pružanja usluga sustavu, ali i prilikom osiguranja pouzdanosti rada mikromreže kako u mrežnom, tako i u otočnom načinu rada. U daljnjem proširenju mogućnosti ovog modela, biti će potrebno obratiti iznimnu pozornost na ispravno modeliranje odnosa elemenata u mikromreži.

Četvrta točka promatra opseg promatranih tržišta. Naime, u ovdje priloženom modelu pozornost je primarno obraćena na dan-unaprijed tržište, unutarдневно te tržište uravnoteženja. U poglavlju 2.2 dan je kratak rezime postojećih tržišnih mehanizama današnjeg elektroenergetskog sustava, uz bitnu napomenu kako je to sustav koji se konstantno razvija, a samim time se može i mijenjati. Jedan izvjesnijih primjera je moguća pojava lokalnih tržišta na distribuci-

jskoj razini. Jasno je kako stoga priloženi model ima još mnogo prostora za uvrštenje i ostalih prikladnih tržišta. Pritom se primarno cilja na rezerve, odnosno pomoćne usluge. Nadogradnja modela će vrlo vjerojatno iziskivati i pomno razmišljanje kako sve karakteristike opisati sa što manje binarnih varijabli kako bi se smanjila računaska kompleksnost u najvećoj mogućoj mjeri. Time će model biti primjeren i za veoma kompleksne mikromreže.

Peta nepravilnost se odnosi na već spomenute binarne varijable. Naime, ovisno o tipu elementa koji se promatra i njegovim karakteristikama, različita ograničenja su potrebna za njegovo realno modeliranje. Mnoga ograničenja iziskuju i uvođenje binarnih varijabli. Primjerice binarna varijabla za onemogućavanje istovremenog punjenja i pražnjenja baterijskog spremnika. Uzevši u obzir i različita tržišta te raznolikost, ali i količinu elemenata mikromreže koji se moraju modelirati pomoću binarnih varijabli, ubrzo može uvelike porasti broj varijabli tog tipa. Općenito, binarne varijable zbog svojih karakteristika usporavaju izvođenje optimizacijskog problema, a u ekstremnim slučajevima mogu prouzročiti i neizvedivost. Stoga je od iznimne važnosti koristiti minimalan broj binarnih varijabli, a da i dalje svi elementi budu vjerno prikazani. Prilikom budućih preinaka, ali i nadogradnje trenutnog modela, nužno je obratiti pozornost na minimizaciju broj binarnih varijabli.

Šesta uočena nepravilnost se odnosi na redosljed čišćenja promatranih tržišta, a za dobar zor o kakvoj se vrsti problema radi može poslužiti i slika 2.2 koja ukazuje na redosljed tržišta. Naime, trenutno se iz modela ne može jasno razaznati koje tržište prethodi kojemu te samim time se ne gradi uzročno-posljedična veza nastupa na različitim tržištima i povezanih akcija mikromreže. Za potrebe razvoja modela optimalnog nastupa, isti mora pomnije uzimati u obzir kronološki redosljed tržišta te probleme, odnosno izazove koji se moraju savladati poštujući uređenje elektroenergetskog tržišta. Tu se kao jedna od opcija nameće višerazinski model koji bi u obzir uzimao i nesigurnosti o kojima će biti riječ u kasnijim točkama. U svakom slučaju, potrebno je jasnije prikazati međusobne odnose različitih tržišta, pogotovo s uvođenjem novih u doručeni model.

Sedma točka se upravo tiče problema prognoza kretanja cijena na tržištima, odnosno nedostatka istih. Problemi slijeda čišćenja različitih tržišta te predviđanja cijena na njima su usko povezani. Naime, trenutni model pretpostavlja savršene prognoze te na temelju njih planira optimalan nastup na modeliranim tržištima. Lišeni svake neizvjesnosti i koristeći povijesne podatke, rezultati će biti idealni, imajući pritom u istom trenu rezultate cijena svih tržišta. Na takav način je vrlo jednostavno postići profit i idealnu strategiju nastupa na tržištu, no za realnu primjenu nužno je uvesti nesigurnost u cijelu priču. Pritom nesigurnost ne utječe samo na ekonomski dio priče, već i na tehnički. Naime, od realizacije proizvodnje iz obnovljivih izvora energije, fluktuacija tereta do cijena i likvidnosti tržišta utječe na sve slojeve modela razvijanog u sklopu projekta FLEXIBASE. Jedna od razumnih opcija je korištenje stohastičke optimizacije i pripadnih scenarija, tu potencijalni problem predstavlja broj promatranih razina i broj scenarija. Takozvano prokletstvo dimenzija (odnosno broja razina) može dovesti do neizvedivosti samog problema. U tu svrhu je potrebno pomno birati scenarije te koristiti tehnike reduciranja broja scenarija. Naravno, može se krenuti i u nekom drugom smjeru, ali

svakako je potrebno obratiti iznimnu pozornost na utjecaj nesigurnosti na model, odnosno ponašanje mikromreže.

Osma nepravilnost se temelji na regulatornom okviru ustroja elektroenergetskog tržišta. Krenuvši od najočitijeg, a to je činjenica da se ustroj i regulatorni okvir može razlikovati od države do države, bitno je istaknuti da se za referencu uzimaju direktive Europske unije čije je tendencija imati usklađen ustroj elektroenergetskog tržišta i sustava općenito na području svih država članica. Tomu je razlog i težnja za jednim, povezanim tržištem na području cijele Europske unije. No, odabравši referentni regulatorni okvir i dalje je problem strategije optimalnog nastupa na tržištu prisutan. Naime, primjerice arbitraža među tržištima je veoma sklizak teren, posebice iz perspektive korištenja tržišne moći. Teoretski je moguće takvo ponašanje na jednom tržištu koje će izazvati recimo zagušenja i umjetno napumpati cijene na drugom tržištu, a ukoliko to regulatorna agencija prepozna ima pravo lišiti konkretnu pravnu osobu nastupa na tržištima električne energije i pomoćnih usluga i eventualno izdati i neku dodatnu kaznu. Dakle, bitno je uskladiti matematički model optimalnog nastupa s regulatornim okvirima i ograničenjima koja se moraju poštivati. Pritom bi bilo mudro i razlikovati tržišta po likvidnosti, naime u nekima mikromreža može biti čak i "*price-maker*", dok je u ostalima "*price-taker*".

Deveti problem je jedna od spona ekonomskog i tehničkog sloja. U svakom trenutku mikromreža mora biti spremna na nenadane poteškoće te sigurnu i pouzdanu opskrbu tereta čak i uvjetima prijelaza s mrežnog na otočni način rada, te naravno prilikom rada u jednom od ta dva režima. Recimo ublažavanje uvjeta o dopuštenim gornjim i donjim granicama napona na čvorištima mora biti tako krojeno da ni u kojem trenutku ne predstavlja ugrozu za rad mikromreže, već pomoć u pojedinim kritičnim trenucima. Kritični trenutci ne moraju biti nužno tehničke prirode, mogu biti vezani i za ekonomsku situaciju, ali svakako se mora voditi računa o duljini trajanja i frekventnosti odlazaka u takve "ekstremne" načine rada na pojedinim čvorištima. Drugim riječima, iako se u sklopu ovog izvještaja pozornost primarno obraća na optimalni nastup na tržištima električne energije i pomoćnih usluga, nužno je voditi računa i o tehničkoj strani, odnosno mogućoj ugrozi sustava prilikom prelaska na otočni način rada.

Deseta točka se tiče načina na koji je uklopljen AC OPF u promatrani problem optimalnog nastupa na tržištima električne energije i pomoćnih usluga. Već je naglašena nužnost uzimanja u obzir aktivne i reaktivne snage kako bi se obuhvatili svi čimbenici bitni za plan rada i nastupa mikromreže uzimajući u obzir sve njene elemente. AC OPF u svojoj egzaktnoj formulaciji unosi mnoge probleme i izazove prilikom izvođenja problema putem komercijalno dostupnih solvera i tipičnih računala, stoga se koriste metode poput recimo *branchflow* metode, što je lijepo opisano u [7]. Model korišten u sklopu ovog projekta je prikladan za radijalne mreže i niz akademskih članka te istraživanja potvrđuje tu tezu. Problem dolazi ukoliko promatrana mreža nije radijalna, što je manje vjerojatan slučaj no svakako ga treba imati na pameti prilikom navođenja prikladnosti modela u raznim situacijama. Štoviše, neka ograničenja mogu eventualno utjecati i na egzaktnost korištenog modela u radijalnim mrežama, no to su specijalni slučajevi koji će se obraditi ukoliko se kasnije ukaže potreba za njima. Primarno je imati na umu tip mreže koji se promatra te na temelju toga procijeniti je li konkretan model prikladan,

odnosno egzaktni za navedeni problem.

Jedanaesta nepravilnost naglasak stavlja na već prije spominjan utjecaj *soft constraintsa*. Naime, u ovom modelu su relaksirane gornje i donje granice napona na takav način da mikromreža može u pojedinim kritičnim trenucima prelaziti nazivne granice te tako, bilo iz tehničkih ili ekonomskih razloga, privremeno raditi u donekle ekstremnom načinu rada. Odnosno, napon na pojedinim čvorištima u pojedinim trenucima može biti ispod ili iznad nominalnih granica. Takva događanja moraju biti strogo ograničena kako duljinom trajanja, tako i učestalosti pojave. Pritom vremenska rezolucija promatranog problema može stvoriti velike probleme. Naime, dozvoljeno trajanje prekoračenja naponskih ograničenja vrlo moguće može biti znatno kraće od jednog sata, a cijeli problem se razmatra i modelira na satnoj razini. Time se u realnosti povećava mogućnost ugroze sigurnog i pouzdanog rada mikromreže, odnosno neprikladnost uopće uvođenja mogućnosti povremenog prekoračenja nominalnih ograničenja. Veoma je bitno detaljnije razraditi način uvrštavanja mogućnosti privremenih prekoračenja ograničenja kako bi i dalje bilo osigurano sigurno i pouzdano funkcioniranje cijelog sustava, kako u mrežnom, tako i otočnom te prijelazu između dva načina rada.

Dvanaesta, odnosno zadnja navedena nepravilnost dotiče se načina modeliranja elemenata mikromreže. Bitno je odrediti do koje mjere preciznosti je nužno ići kako bi model bio vjerodostojan prikaz realnosti, a opet da se ne ide jako nauštrb računalne izvedivosti. Tu se uzima u obzir kako općenito broj varijabli i ograničenja, ali i recimo tipovi varijabli (npr. binarne su nepovoljne) te vrste ograničenja (težimo linearnosti i konveksnosti).

5. Zaključna razmatranja

Na temelju do sad razvijenog modela te provedenih ispitivanja na testnom primjeru mikromreže, provedena je analiza i napravljen detaljan izvještaj uočenih nepravilnosti. Sve uočene nepravilnosti optimalnog modela nastupa na tržištima električne energije i pomoćnih usluga su izlistane u tablici te kasnije detaljno objašnjenje i komentirane. Budući rad će se fokusirati na daljnji razvoj modela pritom uzimajući u obzir navedene nepravilnosti te će se tražiti rješenja kako svaku od njih ispraviti i u kasnijim fazama projekta dostaviti model koji je u potpunosti funkcionalan bez ikakvih nepravilnosti vezanih za njegovu primarnu svrhu. Osim samog razvoja matematičke formulacije, model će se testirati kako na ovdje priloženij testnoj mikromreži, ali i na drugim dostupnim modelima uz dostupne podatke s različitih tržišta.

Mišljenja, nalazi i zaključci ili preporuke navedene u ovom materijalu isključiva su odgovornost autora i ne odražavaju nužno stajališta Hrvatske zaklade za znanost, Ministarstva znanosti i obrazovanja i Europske komisije.

Literatura

- [1] G. Pepermans, "European energy market liberalization: experiences and challenges", *International Journal of Economic Policy Studies*, vol. 13, 2019
- [2] The Clean Energy Package, European Commission, Brussels, Belgium Available online: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans_en (accessed on 03 April 2022)
- [3] *Croatian Power Exchange*, Zagreb, Croatia [Online] Available: www.cropex.hr/en (accessed on 7 April 2022)
- [4] F. Mumtaz, I. S. Bayram, "Planning, Operation, and Protection of Microgrids: An Overview", *Energy Procedia*, vol. 107, February 2017
- [5] D. K. Molzahn, I. A. Hiskens, "A Survey of Relaxations and Approximations of the Power Flow Equations", *Foundations and Trends in Electric Energy Systems*, vol. 4, February 2019
- [6] Y. Wen, C. Y. Chung, X. Liu, C. Che, "Microgrid Dispatch with Frequency-Aware Islanding Constraints", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 3 2019
- [7] S. H. Low, "Convex Relaxation of Optimal power Flow - Part I: Formulations and Equivalence", *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, vol. 1, March 2014