

# Upravljanje stacionarnim umreženim spremnikom energije u sustavu s obnovljivim izvorima

---

Šušak, Martina

Master's thesis / Diplomski rad

2019

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:149681>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-12**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**UPRAVLJANJE STACIONARNIM UMREŽENIM  
SPREMNIKOM ENERGIJE U SUSTAVU S  
OBNOVLJIVIM IZVORIMA**

**Diplomski rad**

**Martina Šušak**

**Osijek, 2019.**

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Zadatak diplomskog rada.....	1
2. TRŽIŠTE ELEKTRIČNE ENERGIJE.....	2
2.1. Ponuda i potražnja na tržištu.....	2
2.2. Tržišna ravnoteža .....	3
2.3. Tržišta i konkurencija .....	4
2.4. Određivanje penala zbog neravnoteže sustava.....	5
2.5. Trgovanje električnom energijom na burzi.....	5
2.5.1. Dan unaprijed tržište električne energije .....	6
2.5.2. Unutardnevno tržište .....	6
3. STACIONARNI UMREŽENI SPREMNICI ELEKTRIČNE ENERGIJE.....	8
3.1. Baterijski spremnici.....	8
3.1.1. Primarne baterije .....	9
3.1.2. Sekundarne baterije .....	9
3.2. Priklučenje spremnika energije na elektroenergetski sustav .....	11
3.3. Uloga spremnika energije u elektroenergetskom sustavu .....	12
3.4. Spremnici električne energije u svijetu .....	13
3.4.1. Njemačka- Huntorf.....	14
3.4.2. Sjedinjene Američke Države – MacIntosh.....	14
3.4.3. Australija - Hornsdale Power Reserve .....	14
3.4.4. Japan - Kyushu Electric Buzen .....	15
3.5. Lokacije potencijalnih spremnika energije u hrvatskom EES-U .....	16
4. MATEMATIČKI MODEL SUSTAVA .....	17
4.1. Matematički model za maksimizaciju dobiti na tržištu dan unaprijed (DA).....	17
4.2. Matematički model za minimizaciju penala zbog uzrokovanja neravnoteže .....	19
5. SIMULACIJSKI PRIMJER MATEMATIČKOG MODELA.....	22
5.1. Maksimizacija dobiti .....	24
5.2. Minimalizacija troškova .....	27
6. ZAKLJUČAK .....	34
LITERATURA.....	35
SAŽETAK .....	36
ABSTRACT .....	36
ŽIVOTOPIS .....	37

# 1. UVOD

Obnovljivi izvori energije su neiscrpni izvori energije te se njihovim korištenjem čuva okoliš. Energija vjetra, Sunčeva energija, energija biomase, geotermalna energija se sve više koriste u svijetu. Promjenjivost i predvidivost proizvodnje vjetroelektrana stvaraju potrebu za dodatnom regulacijskom energijom. Brzina puhanja vjetra može se razlikovati u svakom satu, stoga kako bi smanjili nastalu neravnotežu sustava i penale, proizvodnja iz vjetroelektrane može se kombinirati s proizvodnjom iz drugih obnovljivih izvora. U radu je predstavljen model sustava vjetroelektrane i baterijskog spremnika. Rad se sastoji od šest poglavlja. U drugom poglavlju opisano je tržište električne energije, ponuda i potražnja na tržištu te određivanje penala zbog neravnoteže sustava. Također, opisani su načini trgovanja električnom energijom, a to su dan unaprijed i unutardnevno trgovanje. Baterijski spremnici te njihova uloga i priključenje na elektroenergetski sustav prikazano je u trećem poglavlju. Također je navedeno par primjera spremnika u svijetu te mogućnost primjene baterijskih spremnika u Hrvatskoj. Četvrto poglavlje sadrži opis dva matematička modela. Prvi model koristi se za maksimizaciju dobiti, a drugi za minimizaciju penala zbog odstupanja od plana rada ugovorenog na tržištu dan unaprijed. Nadalje, definirana su ograničenja i limiti varijabli. U petom poglavlju prikazani su rezultati sustava predstavljenim simulacijskim modelom, tablice i grafikoni. Zaključak je napisan u posljednjem poglavlju.

## 1.1. Zadatak diplomskog rada

U diplomskom radu potrebno je dati pregled mogućnosti zadavanja ponuda na tržištu električne energije za sustav kojeg čine umreženi stacionarni spremnik energije i obnovljivi izvor. Nadalje, potrebno je izraditi optimizacijski model sustava spremnika energije i obnovljivog izvora s ciljem maksimizacije zarade na tržištu električne energije. Uz to, model će se koristiti za minimizaciju penala zbog odstupanja od plana rada ugovorenog na tržištu dan unaprijed.

## 2. TRŽIŠTE ELEKTRIČNE ENERGIJE

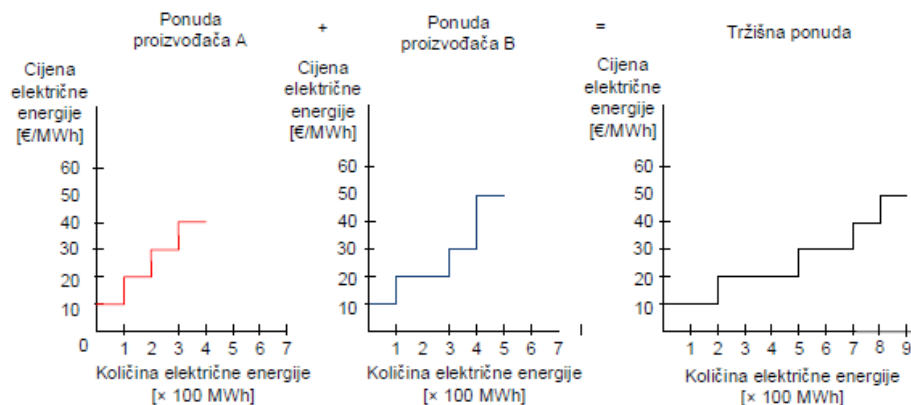
Prema [1], definicija tržišta električne energije glasi : „Tržište se definira kao stalan i organiziran oblik dovođenja u kontakt ponude i potražnje roba i usluga te predstavlja i mehanizam kojim se reguliraju odnosi prodavača i kupaca u uvjetima u kojima sudionici ostvaruju svoje ciljeve i interese. Osnovu tržišta čine ponuda i potražnja. Skupina koja određuje potražnju za nekim proizvodom su kupci, dok su proizvođači skupina koja određuje ponudu.“ [1]

Trgovanje električnom energijom drugačije je od trgovanja na klasičnim tržištima drugih dobara. Razlog tomu je što se električna energija zbog svojih specifičnih karakteristika razlikuje od ostalih proizvoda kojima se trguje, električna energija nije opipljiva. Naime, električna energija zahtjeva neprekidan tok, odnosno da se električna energija proizvodi i troši u kontinuitetu. [2]

### 2.1. Ponuda i potražnja na tržištu

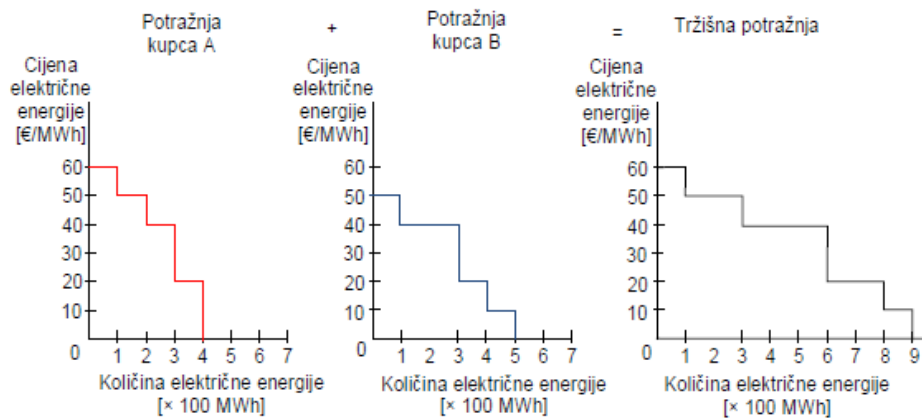
Definicija za ponudu glasi : „Ponuda je količina nekog dobra koju su proizvođači spremni i u mogućnosti prodati. Prema zakonu ponude, višoj cijeni dobra odgovara veća ponuđena količina istog dobra te obratno. Uz rast cijene dobra, ponuđena količina raste, dok uz pad cijene dobra, ponuđena količina pada. Zakon ponude vrijedi i za individualnu i tržišnu ponudu.“ [1]

Zbrajanjem svih količina električne energije s istom cijenom koje su navedene u individualnim ponudama proizvođača dobijemo ukupnu tržišnu ponudu. Slika 2.1. grafički prikazuje način dobivanja ukupne tržišne ponude.



Slika 2.1. Tržišna ponuda [1]

Potražnja je tražena količina dobara koju su kupci spremni platiti po određenoj cijeni. S porastom cijene dobara tražena količina pada, a s padom cijene količina raste te je time definiran zakon potražnje. [1] Na slici 2.2. prikazano je kako se dobije ukupna tržišna potražnja.



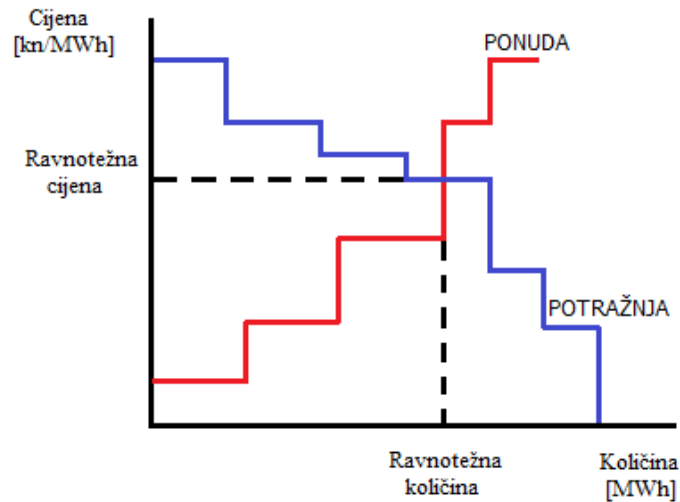
Slika 2.2. Tržišna potražnja

## 2.2. Tržišna ravnoteža

Ravnoteža između svih kupaca i proizvođača naziva se tržišna ravnoteža, odnosno dolazi do izjednačavanja tražene i ponuđene količine nekog dobra. Ako je cijena previsoka dolazi do gomilanja zaliha, a preniske cijene izazivaju veliku potražnju dobra te naposljetku njihovu nestašicu. Za ravnotežnu cijenu upotrebljava se naziv cijena koja čisti tržište (engl. *clearing price*) jer je to cijena koja odgovara i kupcima i proizvođačima. [1]

Do ravnoteže dolazi prirodno zbog koraka koje poduzimaju kupci i prodavači. Vrijednost dobara prema zakonu ponude i potražnje prilagođava se da bi se ponuđena i tražena količina istog dobra izjednačile. Na tržištu električne energije pojavljuju se privremeni viškovi i manjkovi energije. Do neravnoteže sustava može doći ako u sustavu dođe do viška potražnje zbog ograničenja najveće cijene električne energije ili ako je ponuda manja od potražnje dolazi do redukcije kako bi se tržište pomaklo prema ravnoteži. [1]

Sjecište ravnotežne količine i ravnotežne cijene, odnosno ponude i potražnje naziva se tržišna ravnoteža.



Slika 2.3. Tržišna ravnoteža

### 2.3. Tržišta i konkurencija

Tržište savršene konkurencije je ono tržište na kojem svi kupci i prodavači pojedinačno imaju zanemariv utjecaj na tržišnu cijenu. Tržišta savršene konkurencije definiraju se pomoću osnovnih karakteristika [1]:

- Proizvod koji se prodaje na tržištu mora biti homogen, odnosno isti,
- Na tržišnu cijenu ne može utjecati niti jedan kupac ili prodavač, a s obzirom da kupaca i proizvođača električne energije ima jako puno oni na tržištu savršene konkurencije prihvaćaju cijenu koju je odredilo tržište,
- Svi kupci i proizvođači moraju biti tržišno racionalni, tj. proizvođač maksimizira svoju dobit, a potrošač korisnost,
- Proizvođači i kupci električne energije moraju imati informacije o cijenama i drugim čimbenicima koji su potrebni za donošenje njihove odluke,
- Za nove proizvođače treba se omogućiti neometan ulaz na tržište,
- Troškovi prijenosa trebaju biti minimalni,

□ Transakcije se odvijaju u sustavu koji mora biti legalan, brz i učinkovit. Nužno je odrediti točna pravila trgovanja i navesti kupce i proizvođače na zaključivanje poslova posredstvom jasnih i pravovaljanih ugovora.

Prema [2], definicija tržišta nesavršene konkurencije glasi : „Tržišta nesavršene konkurencije su tržišta na kojima ne vrijede u potpunosti pretpostavke o savršenoj konkurenciji. Monopoli su tržišta na kojima postoji samo jedan prodavač i taj isti prodavač (monopolist) određuje cijenu. Prirodni monopol imaju kompanije čiji prosječni troškovi snažno padaju s povećanjem proizvodnje zbog ekonomije velikih razmjera pa takva kompanija može proizvoditi ukupnu proizvodnju grane djelotvornije nego mnoge kompanije zajedno. Tipičan primjer prirodnog monopola su prijenos i distribucija električne energije.“ [2]

## **2.4. Određivanje penala zbog neravnoteže sustava**

Kada potrošnja ili proizvodnja energije odstupaju od dogovorene količine dolazi do neravnoteže sustava. Neravnoteža sustava uzrokuje penaliziranje sustavom jedinstvenih i dvojnih cijena.

Kada proizvođač ne uspije proizvesti onoliko energije koliko je ugovorio plaća penalizaciju koja u sustavu jedinstvene cijene znači da plaća nabavnu tržišnu cijenu energije uravnoteženja. Kod sustava dvojnih cijena operateri prijenosnih sustava određuju određene penalne cijene koje ovise o količinskom manjku energije. Na tržištu uravnoteženja imamo dvije vrste ponuda, a to su : ponuda kod koje dolazi do povećanja proizvodnje i smanjenja potrošnje te ponuda gdje je povećana potrošnja, a smanjena proizvodnja. [1]

Ponude na tržištu moraju sadržavati određenu minimalnu snagu promjene koju ponuditelj može ostvariti u određenom vremenu. Novcem sudionika koji su uzrokovali neravnotežu ponude i potražnje, operator prijenosnog sustava kupuje ponude te je na tržištu jedini kupac. Promatrani sat operator sustava označi kao sat regulacije na gore ili dolje ovisno o tome da li je u sustavu došlo do manjaka ili viškova električne energije.

## **2.5. Trgovanje električnom energijom na burzi**

Na burzi se trgovanje električne energije odvija između prodavatelja i kupaca. Dva su načina trgovanja električnom energijom, a to su dan unaprijed i unutarnevno trgovanje.



### **2.5.1. Dan unaprijed tržište električne energije**

Prema [7], definicija za tržište dan unaprijed glasi : „Dan unaprijed tržište predviđa mogućnost trgovanja dan unaprijed na temelju svih naloga koje je CROPEX zaprimio prije zatvaranja trgovanja od svih članova. Nakon zatvaranja trgovanja, cjelokupni volumen i svi primljeni nalozi se sumiraju i izračunava se tržišna ravnoteža. Prava i obveze svakog člana u odnosu na kupoprodaju električne energije za relevantne sate isporuke određuju se na temelju cijene i volumena i tržišne.“ Na tržištu dan unaprijed nalozi se upisuju u formu naloga preuzetu s CROPEX-a te se nalozi CROPEX-u se šalju elektroničkim putem prema uputama CROPEX-a ili se ručno unose u Elektronički trgovački sustav. Da bi se obrazac naloga uzeo u obzir na dražbi on mora biti popunjen kako je to i propisano, ukoliko nije popunjen ispravno takav nalog se ne uzima u obzir. Svi članovi su dužni provjeriti jesu li nalozi ispravno popunjeni i valjani. Na dan unaprijed dogovorenom tržištu razlikuju se satni nalozi i blok nalozi. [7]

Satni nalozi su izjava članova o tome koliko su spremni za trgovanje određene količine energije po definiranoj cijeni u određenom satu isporuke primjenjivog za dana isporuke. Kod satnog naloga količina energije koja se prodaje mora biti konstantna ili se prilikom povećanja cijena naloga i količina energije mora povećati. Količina energije koja se kupuje također mora biti konstantna te se ona s porastom cijena naloga mora moći smanjiti. Blok nalog mora sadržavati informacije o granici cijene blok naloga, satnoj količini, te početnom i završnom vremenu blok proizvoda. [7]

### **2.5.2. Unutardnevno tržište**

Prema [7], definicija unutardnevnog tržišta glasi : „Unutardnevno tržište je tržište za kontinuirano trgovanje proizvodima tijekom sati trgovanja u kojima se transakcije automatski uparuju kada se podudarni nalozi unesu na unutardnevnu platformu za trgovanje. Transakcije mogu biti ostvarene do 30 minuta prije isporuke, a trgovanje započinje u 15:45 dan prije isporuke. Na unutardnevnom tržištu može se trgovati sa satnim, vršnim, baznim i blok proizvodima koje članovi burze mogu samostalno definirati.“ Moguće je odabrati sljedeće vrste naloga [7]:

- a) Fill nalog se ostvaruje ukoliko je moguće ostvariti ili dio ili ukupnu količinu navedanu nalogom, a preostala količina ostaje na tržištu.
- b) All-or-nothing nalog označava nalog koji se ostvaruje samo ako je moguće ostvariti ukupnu količinu koja je naznačena na nalogu.
- c) Fill-or-Kill nalog (FoK) je nalog gdje se ostvaruje ukupna količina navedana nalogom, a ako se ne može ostvariti nalog se briše.
- d) Immediate-or-Cancel (IoC) nalog je nalog koji se ostvaruje u potpunosti ili djelomično. Ako je nalog ostvaren samo djelomično preostala količina se briše.
- e) Iceberg (IBO) nalog je nalog kod kojeg je količina jednim djelom skrivena. Maksimalna količina koja je vidljiva na tržištu se naziva vidljiva količina. Kada se ostvari vidljiva količina na tržištu, sljedećoj vidljivoj količini dodjeljuje se novi broj naloga i vremenski period u kojem se taj nalog mora ostvariti.
- f) Blok nalog je vrsta All-or-nothing naloga koji se ostvaruje samo ako je moguće ostvariti ukupnu količinu koja je naznačena na nalogu te on udružuje u nalog nekoliko pojedinačnih sati.

### **3. STACIONARNI UMREŽENI SPREMNICI ELEKTRIČNE ENERGIJE**

U modernim elektroenergetskim sustavima s velikim udjelom obnovljivih izvora energije sve važniju ulogu preuzimaju spremnici električne energije. Spremnici električne energije su elementi elektrodistribucijske mreže koji mogu smanjiti nepovoljne učinke proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora (porast napona na dugim priključnim vodovima i/ili slabije opterećenim mrežama). Interes investitora u OIE i elektrodistribucijskih tvrtki potaknuo je ne samo daljnji tehnološki razvoj sustava za pohranu električne energije, već i rasprave s ciljem osmišljavanja i definiranja poslovnih modela koji nose prednosti za operatore, proizvođače i korisnike mreže. Povećanje udjela obnovljivih izvora energije u elektroenergetskom sustavu utječe na način njegovog vođenja. Promjenjivost i predvidivost proizvodnje vjetroelektrana i solarnih panela stvaraju potrebu za dodatnom regulacijskom energijom. Tu je energiju teško osigurati jer povećanjem proizvodnje iz obnovljivih izvora energije smanjuje se količina upravljivih agregata u pogonu što izravno narušava regulacijske sposobnosti. Kao jedno od rješenja nameće se upotreba spremnika energije velikog kapaciteta kao što je baterija. Posebno su zanimljivi baterijski spremnici zbog svoje modularnosti i brzog odziva.

#### **3.1. Baterijski spremnici**

Uređaj koji posredstvom *redox* reakcija pretvara kemijsku energiju izravno u električnu energiju naziva se baterija. Baterija može biti punjiva ili nepunjiva - ukoliko se govori o punjivim baterijama proces je povratan. Članak nam predstavlja osnovnu jedinicu u kojoj dolazi do reakcije. Baterija je uređaj koji se sastoji od članaka koji mogu biti u serijskom ili paralelnom spoju, ovisno koliki se napon i kapacitet želi dobiti.

Članak se sastoji od tri primarna dijela, a to su anoda, katoda i elektrolit. Svaki dio ima svoje karakteristike, a to su [3] :

1. Anoda predstavlja negativnu elektrodu. Električna struja kroz anodu teče prema elementu. Najčešće korišten materijal za anodu je cink.

2. Katoda predstavlja pozitivnu elektrodu koja prima elektrone iz vanjskog kruga i reducira se tijekom elektrokemijske reakcije. Katoda se najčešće izrađuje od metalnih oksida.

3. Elektrolit je medij u kojem teče električna struja između anode i katoda. Materijal koji se koristi za elektrolit je u krutom ili tekućem stanju. Najčešće se koristi voda ili neka tekućina koja sadrži otopljene soli, kiseline ili alkale.

Prema podjeli baterija, razlikujemo primarne i sekundarne baterije. Primarne baterije se ne mogu puniti te se one nakon što se isprazne mogu se baciti, a sekundarne baterije su punjive te su one spremnici električne energije.

### **3.1.1. Primarne baterije**

Prema [3], definicija primarnih baterija glasi : „Primarne baterije se ne mogu puniti nakon što se isprazne. Prednost primarnih baterija je trajnost skladištenja , relativno visoka gustoća energije , lakoća uporabe. Primarne baterije su jeftine i lagane, te se koriste za napajanje elektroničkih uređaja, u vojnoj industriji, za signalizaciju i sl.“

### **3.1.2. Sekundarne baterije**

Prema [3], definicija sekundarnih baterija glasi : „Sekundarne se baterije mogu puniti gotovo do prvobitnog stanja napunjenosti na način da struja prolazi kroz njih u obrnutom smjeru od struje pražnjenja. Sekundarne baterije su spremnici električne energije, a često ih zovemo akumulatori.“

Imamo dvije primjene sekundarnih baterija, a to su :

Sekundarna baterija je uređaj koji može spremati električnu energiju i cijelo vrijeme je priključena na izvor napajanja, te se, prema potrebi, prazni i napaja teret. Neki primjeri sekundarnih baterija su : auto i avio industrija, električna vozila i stacionarni spremnici električne energije u elektroenergetskom sustavu.

Način korištenja sekundarnih baterija isti je kao i kod primarnih. Jedina razlika je ta što se sekundarna baterija nakon pražnjenja ponovo puni. Primjeri su mobiteli, laptopi, automobili. Sekundarne baterije koriste se u svrhu uštede i na mjestima koja zahtijevaju baterije veće snage.

Osnovna karakteristika punjivih baterija je da procesi punjenja i pražnjenja (pretvorba električne energije u kemijsku i obrnuto) trebaju biti učinkoviti i imati minimalan utjecaj na trajanje baterije. Kemijski procesi koji uzrokuju starenje baterije, skraćenje vijeka trajanja i gubitak kapaciteta trebaju biti minimizirani. Očekuje se visoka gustoća energije, mali otpor i neosjetljivost na temperature. Navedeni zahtjevi ograničavaju potencijalne materijale koji bi se koristili u baterijama.

Primjenu u elektroenergetskom sustavu nalaze sekundarne baterije zbog mogućnosti punjenja i pražnjenja, odnosno preuzimanje uloge izvora i tereta u elektroenergetskom sustavu. Od nekoliko vrsta baterija u komercijalnoj uporabi kao što su olovne, VRLA (engl. Valve-Regulated Lead-acid Battery) i alkalne baterije bitno je istaknuti da alkalne Li-ionske baterije preuzimaju čelnu poziciju u pohrani električne energije u elektroenergetskom sustavu. Karakteristike navedenih baterija kao što su visoka učinkovitost, brzo vrijeme reakcije, dugo vrijeme života i mogućnost izgradnje baterija velike snage i kapaciteta nameću primjenu baterija kao izglednu opciju za primjenu spremnika u prijenosnoj mreži EES. Međutim, visoki investicijski troškovi zahtijevaju primjenu baterija za što više usluga u EES, kao što su upravljanje zagušenjima u mreži, frekvencijska stabilnost, naponska stabilnost i sl. Jasno je da baterije imaju nezamjenjivu ulogu u primjeni u mikromrežama zbog jednostavnosti ugradnje i mogućnosti ugradnje spremnika velikog raspona snaga i kapaciteta.

Glavna svojstva punjivih baterija su napon i kapacitet. Kapacitet predstavlja iznos energije koji se može pohraniti u bateriji, te se tipično izražava u Amper-satima (engl. Amperhours, Ah). Ah je struja pražnjenja koju baterija može isporučiti kroz vrijeme. Teoretski, baterija od 20 Ah može isporučivati struju od 20 A jedan sat, ili struju od 10 A dva sata itd. U praksi, nazivni kapacitet može se postići samo malim strujama pražnjenja. Brzina punjenja ili pražnjenja baterije određena je C-stopom. Mjera koja nam govori koliko energije je pohranjeno u bateriji naziva se stanje napunjenosti baterije (engl. state-of-charge, SOC). Stanje napunjenosti baterije korisniku daje indicaciju o tome koliko još baterija može raditi prije nego zatreba punjenje. Baterija koja je potpuno napunjena ima 100% SOC, dok potpuno prazna baterija ima 0% SOC.

Mjera za ukupno stanje baterije naziva se stanje zdravlja baterije (engl. state-of-health, SOH) . Ukoliko je SOH na 100% tada se govori o novoj, zdravoj bateriji. Stanje zdravlja nije jednoznačno povezano s mjerljivim veličinama te zato ne postoji univerzalni način za procjenu istog. Zbog toga se stanje zdravlja (SOH) može samo estimirati na temelju tri indikatora: kapacitet, unutrašnji otpor te samopražnjenje. Različite tipovi punjivih baterija imaju različite karakteristike. Tipovi punjivih baterija određeni su kemijskim materijalima koji se koriste pri izradi baterije. Najčešće tipovi punjivih baterija prema tehnologiji izrade su: olovne, nikal-kadmiske, nikal-metal-hidridne, te litij-ionske. Zajednička karakteristika svih punjivih baterija jest ta da imaju ograničen životni vijek te da se njihova svojstva (u prvom redu kapacitet) postepeno degradiraju s vremenom i korištenjem (punjenje i pražnjenje). Degradacija baterija i ukupan životni vijek su veoma ovisni o načinu pražnjenja i punjenja (brzo ili sporo, pulsno ili konstantno, itd.). Zbog toga je važno poznavati karakteristike punjivih baterija te u skladu s tim odabrati optimalan obrazac punjenja/pražnjenja.

### **3.2. Priključenje spremnika energije na elektroenergetski sustav**

Spremnici energije koji su priključeni na prijenosnu elektroenergetsku mrežu predstavljaju proizvođače ili potrošače električne energije ovisno o režimu rada na mjestu priključenja. Zahtjevi za proizvođače i potrošače na mjestu priključenja su različiti , a zahtjev za priključenje spremnika energije na prijenosnu mrežu je skup zahtjeva za proizvođače i potrošače. [6]

Spremnici električne energije prema mrežnim pravilima su potrošači električne energije zato što u određenim režimima rada tu energiju troše. Postrojenje koje je priključeno na jednom ili na više mjesta priključenja na prijenosni ili distribucijski sustav naziva se „postrojenje kupca“. Distribucijski sustav i/ili pomoćna napajanja proizvodnih modula ne smatraju se postrojenjem kupca. [6]

Postrojenje kupca koje je priključeno na prijenosnu mrežu definirano je mrežnim pravilima koja se odnose na frekvenciju, napon, struju kratkog spoja, jalovu snagu, kvalitetu električne energije, regulaciju i zaštitu.

### 3.3. Uloga spremnika energije u elektroenergetskom sustavu

Na velik broj mrežnih zahtjeva kao što su, npr., upravljanje zagušenjima, frekvencijska stabilnost, dnevno uravnoteženje te upravljanje potrošnjom spremnici energije su spremni odgovoriti.

Spremnici energije mogu biti u vlasništvu operatora sustava ili u vlasništvu privatnih investitora. Glavna područja primjene spremnika električne energije u elektroenergetskom sustavu su [4] :

#### 1. Upravljanje zagušenjima u mreži

Zagušenje u mreži je stanje u kojem se pogon u prijenosnom sustavu odvija na granici jednog ili više ograničenja. U takvim pogonskim stanjima operator prijenosnog sustava provodi mjere fizičkog upravljanja zagušenjima. Pri tome koristi elemente vlastite mreže koji su mu na raspolaganju (promjene uklopnog stanja elemenata mreže, promjene preklopke transformatora s mogućnošću zakreta kuta napona) ili daje naloge elektranama za promjenom proizvodnje, tzv. preraspodjela proizvodnje. Obje navedene mjere imaju za posljedicu promjenu tokova snaga u mreži, pri čemu dolazi do rasterećenja ugroženih dijelova mreže. SE mogu se koristiti na način da se u dijelu mreže u kojem je zagušenje nastalo dio energije pohrani u spremnicima, čime se rasterećuje ugroženi element ili dio mreže, a zatim se energija predaje u mrežu kada je opasnost od zagušenja smanjena.

#### 2. Dnevno uravnoteženje

Baterijski spremnici energije mogu se koristiti za dnevno uravnoteženje elektroenergetskog sustava, odnosno izravnavanje dnevnog dijagrama opterećenja: u vrijeme niskog opterećenja električna energija se pohranjuje u spremnicima, a zatim u periodu vršnog opterećenja dolazi do njihovog pražnjenja i predaje energije u mrežu. SE sudjeluju na tržištu električne energije kako bi maksimizirali svoju dobit prema funkciji cilja (3-1) :

$$\text{Maximize } \sum_{t=1}^T \alpha(t) (q^{dis}(t) - q^{ch}(t)) \quad (3-1)$$

gdje  $\alpha(t)$  je tržišna cijena, a  $q^{ch}(t)$  i  $q^{dis}(t)$  predstavljaju količine električne energije kojom se puni i prazni spremnik. Na ovaj način dolazi do smanjenja troškova pogona elektroenergetskog sustava jer se izbjegava proizvodnja električne energije iz skupih vršnih elektrana.

### 3. Frekvencijska stabilnost – primarna, sekundarna i tercijarna rezerva

Spremnici energije mogu doprinijeti frekvencijskoj stabilnosti ukoliko postoji neravnoteža između proizvodnje i potrošnje, a u sustavu postoje agregati koji imaju sporiji odziv. U sustavima u kojima postoji velik iznos instaliranog kapaciteta, ukoliko dođe do nagle promjene u njihovoj proizvodnji dolazi do pada ili rasta frekvencije sustava. Operator sustava nadzire rad elektroenergetskog sustava i daje zahtjev za aktiviranje tercijarne rezerve, dok sekundarna rezerva automatski ispravlja nepravilnosti u sustavu prema stanju na razmjeni tj. na granicama sustava sa ostalim graničnim elektroenergetskim sustavima. U tim slučajevima, spremnici energije mogu znatno pomoći zbog svog brzog odziva. Za ovu vrstu pomoćne usluge u svijetu već se dugo koriste reverzibilne hidroelektrane, te u zadnjih nekoliko godina raste njihova instalirana snaga upravo kako bi omogućile stabilnost fleksibilnijeg sustava.

### 4. Naponska stabilnost – prijenosna i distribucijska stabilnost

Naponska stabilnost sustava je stanje sustava u kojem se prilikom normalnog pogona ili poslije poremećaja napon održava u normalnim granicama. Dakle, pojava poremećaja u sustavu uvjetovana je nemogućnošću isporuke dostatne količine jalove energije u EES. Posljedica toga je propad napona odnosno u krajnjem slučaju slom napona sustava. Zbog lokacijske fleksibilnosti, baterijski SE mogu pomoći EES-u prilikom narušene naponske stabilnosti injeckiranjem snage odnosno njenom apsorpcijom. Potreban je vrlo brzi odziv spremnika.

## 3.4. Spremnici električne energije u svijetu

Najveći realizirani projekti spremnika električne energije priključeni na elektroenergetski sustav Njemačke, Sjedinjenih Američkih Država, Australije i Japana u nastavku su ukratko opisani [5]:



### **3.4.1. Njemačka- Huntorf**

Godine 1987. u Njemačkoj je u pogon pušten projekt Huntorf. To je najsnažniji realizirani mehanički spremnik energije koji je priključen na prijenosnu mrežu. Maksimalna instalirana snaga je 321 MW ,a maksimalna raspoloživa energija od 640 MWh. Huntorf spremnik energije temelji se tehnologiji komprimiranog zraka.



Slika 3.1. Projekt Huntorf

### **3.4.2. Sjedinjene Američke Države – MacIntosh**

Projekt Macintosh je po snazi drugi mehanički spremnik energije koji se također temelji na tehnologiji komprimiranog zraka, spojen na prijenosnu elektroenergetsku mrežu. Maksimalna instalirana snaga spremnika je 110 MW, dok je njegova energija 2860 MWh.

### **3.4.3. Australija - Hornsdale Power Reserve**

U Južnoj Australiji instalirana je najveća litij-ionska baterija te je ona trenutno najsnažniji realizirani spremnik energije priključen na prijenosnu mrežu Australije. Baterija je instalirana na temelju sporazuma između francuske tvrtke za obnovljivu energiju Neoen, američke tvrtke

održive energije Tesla i vlade Južne Australije. Maksimalna instalirana snaga baterije iznosi 100 MW, a njegova energija iznosi 129 MWh.



Slika 3.2. Australija - Hornsdale Power Reserve

Baterija se nalazi u blizini vjetroparka snage 309 MW, a njezinu najveću prednost predstavlja povećanje fleksibilnost proizvodnje vjetroparka kojem pripada spomenuta baterija odnosno povećava se fleksibilnost dijela EES-a u na kojem je priključena spomenuta baterija. Litij ionska baterija predstavlja najbržu rastuću tehnologiju elektrokemijskih spremnika energije, zato što su glavne prednosti ove tehnologije: visoka gustoća energije, visoka specifična snaga, milisekundno vrijeme odziva, nizak stupanj samopražnjenja i visoka efikasnost (85 - 97%). Ipak treba napomenuti da navedena tehnologija ima i svoje nedostatke kao što su: temperaturno ovisne karakteristike životnog vijeka, kompleksnost sustava upravljanja, sigurnosni aspekt i faktor utjecaja na okoliš.

#### **3.4.4. Japan - Kyushu Electric Buzen**

Kyushu Electric Buzen predstavlja pilot projekt za uravnoteženje proizvodnje i potrošnje dijela EES-a preko visokoučinkovitih sustava za pohranu energije. Energija se pohranjuje u NaS baterijama instaliranim na stanici u Buzenu Fukuoka. Snaga instaliranih baterija iznosi 50 MW, dok njihova energija iznosi 300 MWh. Za razliku od ranije spomenutih Li-ionskih baterija, NaS

baterije spadaju u skupinu visokotemperaturnih baterija koje se baziraju na rastopljenom sumporu i natriju (pozitivna i negativna elektroda) i elektrolitu kojeg sačinjava čvrsta beta aluminij keramika. Najveća prednosti spomenute tehnologije u odnosu na druge tehnologije je mogućnost isporuke pulsne snage u kratkom periodu kada ona može dati do 500 % nazivne snage u periodu od 30 sekundi, dok je najveća mana ove tehnologije potreba za održavanjem visoke temperature u njihovoj unutrašnjosti (da bi sumpor i natrij bili tekući) pa dolazi do samopražnjenja koje iznosi do 20% kapaciteta na dan.

### **3.5. Lokacije potencijalnih spremnika energije u hrvatskom EES-U**

Potencijal primjene spremnika energije u Republici Hrvatskoj može se gledati prvenstveno kao ispomoc distribucijskoj mreži na područjima gdje se područje napaja radijalno iz prijenosne mreže, npr. otok Cres i Lošinj te područje grada Gline. Na tim geografski izoliranim područjima uslijed ograničenja distribucijske mreže i nemogućnosti pokrivanja vršne vrijednosti konzuma uslijed nerasploživosti 110 kV veze, primjenom spremnika moguće je zadržati sigurnost napajanja za određene vremenske periode. Druga moguća primjena predstavlja upravljanje zagušenjima proizvedene energije iz OIE, prvenstveno iz vjetroelektrana i solarnih elektrana, gdje zbog visokog faktora istovremenosti proizvodnje po pojedinom izvoru nastaju nagle promjene u proizvodnji električne energije. U slučaju nemogućnosti plasmana ukupne količine električne energije, može se razmotriti ugradnja spremnika kako bi se pohranili viškovi i isporučili sustavu u povoljnom trenutku ukoliko se dokaže financijska isplativost pojedinog projekta. [5]

## 4. MATEMATIČKI MODEL SUSTAVA

U diplomskom radu predstaviti će se model sustava vjetroelektrane i baterijskog spremnika električne energije. Izraditi će se optimizacijski model sustava spremnika energije i vjetroparka s ciljem maksimizacije zarade na tržištu električne energije. Uz to, koristit će se za minimizaciju penala zbog odstupanja od plana rada ugovorenog na tržištu dan unaprijed.

### 4.1. Matematički model za maksimizaciju dobiti na tržištu dan unaprijed (DA)

**Funkcija cilja** osmišljena je kako si se maksimizirala zarada na tržištu električne energije dan unaprijed. Maksimizacija dobiti računa se prema formuli :

$$\text{maks.} \sum_{t=1}^{n_t} \lambda_t * Pda_t \quad (4-1)$$

gdje su :

$\lambda_t$  – očekivana satna cijena na tržištu dan unaprijed

$Pda_t$ - satna ponuda na tržištu dan unaprijed (negativan predznak predstavlja kupovnu ponudu, a pozitivan predstavlja prodajnu ponudu)

$n_t$  – period simulacije

#### Ograničenja:

Balans energije i stanje napunjenosti baterijskog spremnika ograničeni su sljedećim izrazima:

Balans energije za svaki sat glasi :

$$B_t + W_t = D_t + Pda_t \quad (4-2)$$

gdje su :

$B_t$ - angažirana energija baterijskog spremnika u satu  $t$  ( negativan predznak znači da se baterija puni, a pozitivan predznak da se prazni)

$W_t$ - očekivana proizvodnja električne energije iz vjetroparka u satu  $t$

$D_t$  – električna energija definirana bilatelarnim ugovorom

$Pda_t$ - satna ponuda na tržištu dan unaprijed (negativan predznak predstavlja kupovnu ponudu, a pozitivan predstavlja prodajnu ponudu)

Stanje napunjenosti baterijskog spremnika matematički se definira:

$$SOC_t = SOC_{t-1} - B_t \quad \text{za } t > 1 \quad (4-3)$$

$$SOC_t = SOC_{start} - B_t \quad \text{za } t > 1 \quad (4-4)$$

gdje su :

$SOC_t$ - stanje napunjenosti baterijskog spremnika na kraju sata  $t$

$SOC_{start}$  –stanje napunjenosti baterijskog spremnika na početku promatranog razdoblja

### **Limiti varijabli :**

Maksimalno punjenje i maksimalno pražnjenje baterijskog spremnika u jednome satu :

$$-B_{CH} \leq B_t \leq B_{DISCH} \quad (4-5)$$

$B_{CH}$ - maksimalna energija punjenja baterijskog spremnika u jednome satu

$B_{DISCH}$ - maksimalna energija pražnjenja baterijskog spremnika u jednome satu

Stanje napunjenosti baterijskog spremnika glasi :

$$SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{max} \quad (4-6)$$

$SOC_{min}$ - minimalno stanje napunjenosti baterijskog spremnika

$SOC_t$ - stanje napunjenosti baterijskog spremnika na kraju sata  $t$

$SOC_{max}$ - maksimalno stanje napunjenosti baterijskog spremnika

Stanje napunjenosti baterijskog spremnika na kraju promatranog razdoblja :

$$SOC_{nt} = SOC_{end} \quad (4-7)$$

$SOC_{end}$ - očekivano stanje napunjenosti baterijskog spremnika na kraju promatranog razdoblja

## 4.2. Matematički model za minimizaciju penala zbog uzrokovanja neravnoteže

**Funkcija cilja** osmišljena je za minimizaciju penala zbog odstupanja od plana rada ugovorenog na tržištu dan unaprijed. Matematički zapis funkcije glasi :

$$\min. \sum_{t=1}^{n_t} (Ed_t * P_{en+} * \lambda_t + Ev_t * (1 - P_{en-} * \lambda_t)) \quad (4-8)$$

gdje su :

$Ed_t$ - kupljena energija uravnoteženja u satu  $t$

$P_{en+}$  - koeficijent cijene energije uravnoteženja „na gore“ u satu  $t$

$\lambda_t$ - očekivana satna cijena na tržištu dan unaprijed

$Ev_t$  -prodana energija uravnoteženja u satu  $t$

$P_{en-}$  -koeficijent cijene energije uravnoteženja „na dolje“ u satu  $t$

**Ograničenja :**

$$B_t + W_t + Ed_t - Ev_t = D_t + Pda_t \quad (4-9)$$

gdje su :

$B_t$ - angažirana energija baterijskog spremnika u satu  $t$  ( negativan predznak znači da se baterija puni, a pozitivan predznak da se prazni)

$W_t$ - očekivana proizvodnja električne energije iz vjetroparka u satu  $t$

$Ed_t$  -kupljena energija uravnoteženja u satu  $t$

$Ev_t$  -prodana energija uravnoteženja u satu  $t$

$D_t$  – električna energija definirana bilatelarnim ugovorom

$Pda_t$ - satna ponuda na tržištu dan unaprijed (negativan predznak predstavlja kupovnu ponudu, a pozitivan predstavlja prodajnu ponudu)

Stanje napunjenosti baterijskog spremnika:

$$SOC_t = SOC_{t-1} - B_t \quad \text{za } t > 1 \quad (4-10)$$

$$SOC_t = SOC_{start} - B_t \quad \text{za } t > 1 \quad (4-11)$$

$SOC_t$ - stanje napunjenosti baterijskog spremnika na kraju sata  $t$

$SOC_{start}$  –stanje napunjenosti baterijskog spremnika na početku promatranog razdoblja

### **Limiti varijabli:**

Maksimalno punjenje i maksimalno pražnjenje baterijskog spremnika u jednome satu :

$$-B_{CH} \leq B_t \leq B_{DISCH} \quad (4-12)$$

$B_{CH}$ - maksimalna energija punjenja baterijskog spremnika u jednome satu  $t$

$B_{DISCH}$ - maksimalna energija pražnjenja baterijskog spremnika u jednome satu  $t$

Stanje napunjenosti baterijskog spremnika glasi :

$$SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{max} \quad (4-13)$$

$SOC_{min}$ - minimalno stanje napunjenosti baterijskog spremnika

$SOC_t$ - stanje napunjenosti baterijskog spremnika na kraju sata  $t$

$SOC_{max}$ - maksimalno stanje napunjenosti baterijskog spremnika

Stanje napunjenosti baterijskog spremnika na kraju promatranog razdoblja :

$$SOC_{nt} = SOC_{end} \quad (4-14)$$

$SOC_{end}$ - očekivano stanje napunjenosti baterijskog spremnika na kraju promatranog razdoblja

Ukoliko je kupljena energija uravnoteženja veća ili jednaka nula , prodajna energija uravnoteženja mora biti 0. Nadalje ako je prodajna energija jedna nuli ili veća od nule, kupljena energija uravnoteženja iznosi 0. Matematički zapis glasi :

$$Ed_t \geq 0 \quad \text{za } Ev_t = 0 \quad (4-15)$$

$$Ev_t \geq 0 \quad \text{za } Ed_t = 0 \quad (4-16)$$

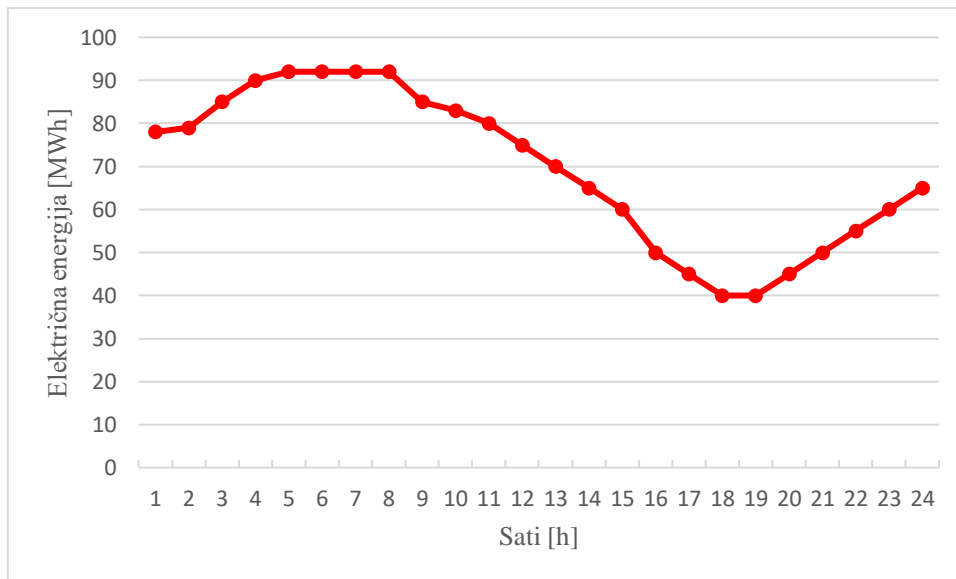


## 5. SIMULACIJSKI PRIMJER MATEMATIČKOG MODELA

Za provedbu simulacije osmišljen je primjer sustava koji čine vjetropark i baterijski spremnik. Za simulaciju uzete su u obzir vjetroeletana Lukovac čija je instalirana snaga 48 MW i vjetroeletkana Poštak instalirane snage 44,2 MW te baterijski spremnik koji se nalazi u Japanu, opisan u poglavlju 3.4.4. U tablici 5.1. prikazana je pretpostavljena očekivana proizvodnja električne energije iz oba vjetroparka u trenutku izrade ponude na tržištu dan unaprijed.

Tablica 5.1. Očekivana proizvodnja električne energije vjetroparka

<b>t [h]</b>	<b><math>W_t</math> [MWh]</b>
1	78
2	79
3	85
4	90
5	92
6	92
7	92
8	92
9	85
10	83
11	80
12	75
13	70
14	65
15	60
16	50
17	45
18	40
19	40
20	45
21	50
22	55
23	60
24	65



Slika 5.1. Očekivana proizvodnja energije iz vjetroparka

Ulazni podatci za bateriju su :

Instalirana snaga baterije: 50 MW

Instalirana maksimalna zapremnina energija baterije: 300 MWh

Maksimalno stanje napunjenosti baterijskog spremnika  $SOC_{max}$  iznosi 300 MWh.

Minimalno stanje napunjenosti baterijskog spremnika  $SOC_{min}$  iznosi 10 % od ukupne instalirane energije, odnosno od ukupne energije koju baterija može pohraniti.

Maksimalna energija punjenja baterijskog spremnika u jednome satu  $B_{CH}$  i maksimalna energija pražnjenja baterijskog spremnika u jednome satu  $t B_{DISCH}$  iznosi 50 MWh.

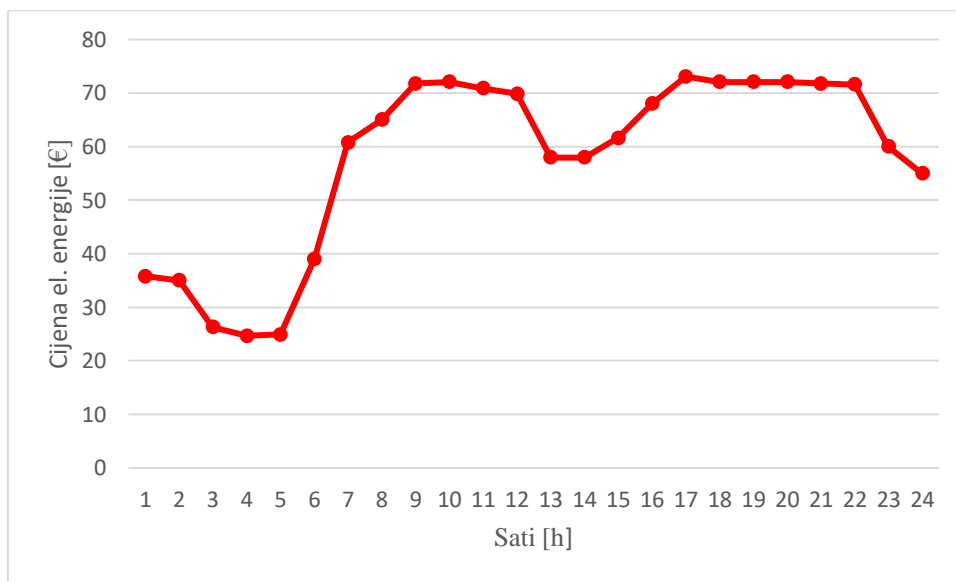
Prije početka simulacije stanje napunjenosti baterijskog spremnika je 60 MWh.

Željeno stanje napunjenosti baterijskog spremnika na kraju simulacije iznosi 60 MWh.

Cijene električne energije za svaki sat na tržištu dan unaprijed koje su korištene u simulaciji preuzete su sa Hrvatske burze električne energije CROPEX dana 02.07.2019. Cijena električne energije se mijenja svaki sat, za četvrti sat ona je najmanja, a najveća je za sedamnaesti sat što se vidi u tablici 5.2.

Tablica 5.2. Cijena električne energije

<b>t [h]</b>	1	2	3	4	5	6	7	8
$\lambda_t$ [€]	35,8	35	26,3	24,7	24,9	39	60,8	65
<b>t [h]</b>	9	10	11	12	13	14	15	16
$\lambda_t$ [€]	71,8	72,1	70,9	69,9	58	58	61,6	68
<b>t [h]</b>	17	18	19	20	21	22	23	24
$\lambda_t$ [€]	73,1	72,1	72,1	72,1	71,8	71,6	60	55



Slika 5.2. Cijena električne energije

U simulaciji se provode dva matematička modela. Prvi model nastoji maksimizirati dobit za podatke dostupne u trenutku formiranja ponude za tržište dan unaprijed. Drugi model nastoji minimalizirati troškove zato što se prognoza očekivane proizvodnje energije iz vjetroparkova promijenila u odnosu na onu prognozu dostupnu u trenutku formiranja ponude za dan unaprijed.

## 5.1. Maksimizacija dobiti

Satna ponuda na tržištu dan unaprijed prikazana je u tablici 5.3

Tablica 5.3. Satna ponuda el. energije na tržištu dan unaprijed

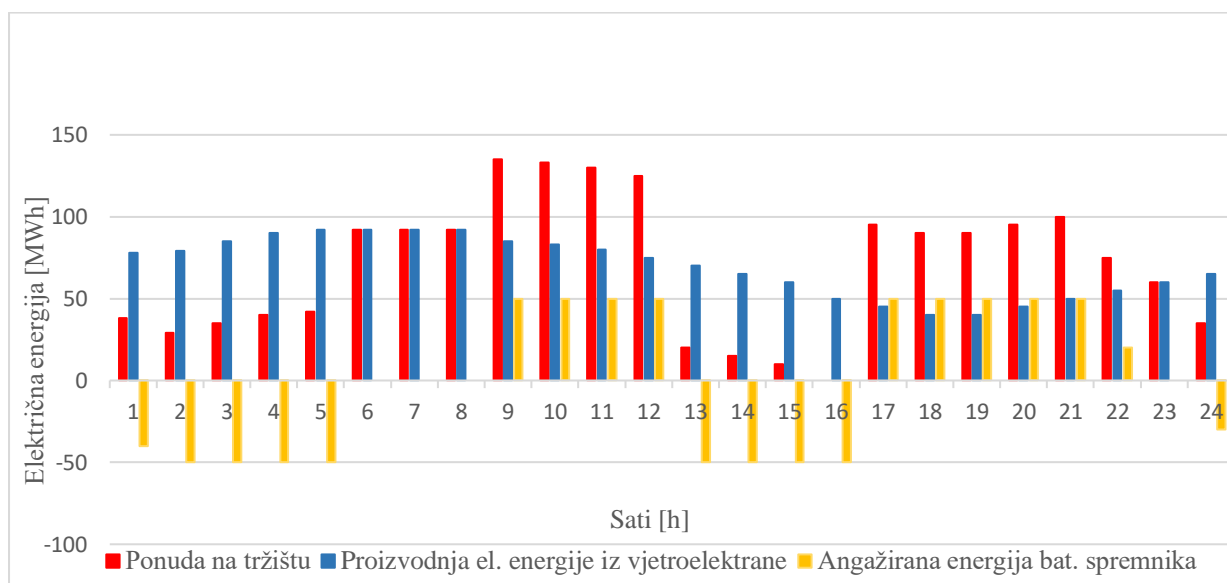
<b>t [h]</b>	<b><math>Pda_t</math> [MWh]</b>
1	38
2	29
3	35
4	40
5	42
6	92
7	92
8	92
9	135
10	133
11	130
12	125
13	20
14	15
15	10
16	0
17	95
18	90
19	90
20	95
21	100
22	75
23	60
24	35

Angažirana energija baterijskog spremnika na dan unaprijed tržištu prikazana je u tablici 5.4. (negativan predznak znači da se baterija puni, a pozitivan predznak da se prazni). U tablici se također može vidjeti stanje napunjenosti baterijskog spremnika za svaki sat. Od petog do osmog sata baterija je maksimalno napunjena.

Tablica 5.4. Angažirana energija i stanje napunjenosti bat. spremnika

<b>t [h]</b>	<b><math>B_t</math> [MWh]</b>	<b><math>SOC_t</math> [MWh]</b>
1	-40	100
2	-50	150
3	-50	200
4	-50	250
5	-50	300
6	0	300
7	0	300
8	0	300
9	50	250
10	50	200
11	50	150
12	50	100
13	-50	150
14	-50	200
15	-50	250
16	-50	300
17	50	250
18	50	200
19	50	150
20	50	100
21	50	50
22	20	30
23	0	30
24	-30	60

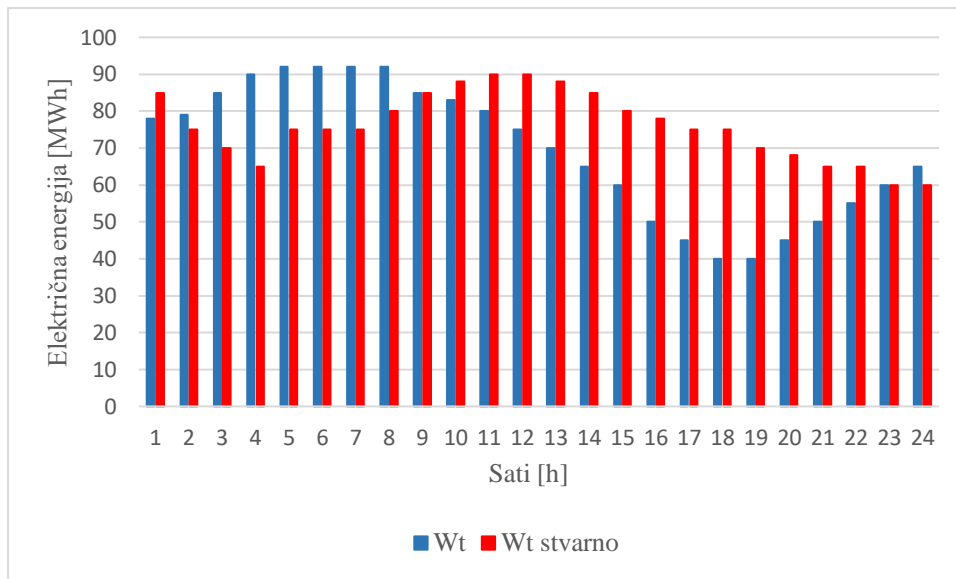
Od prvog do petog sata baterija se puni zato što u tim satima vjetropark proizvodi energiju, a očekivana cijena na tržištu je relativno mala u odnosu na cijene u dnevnim satima. Spremljenu energiju baterija će kasnije iskoristiti kada vjetar bude manje puhao, a cijena bude visoka. To se može primjetiti od devetog do dvanaestog sata. Baterija se prazni predajući energiju potrebnu za ponudu na tržište dan unaprijed.



Slika 5.3. Ponuda na tržištu za svaki sat

## 5.2. Minimalizacija troškova

Nakon ovoga, dobiveni rezultat „ $Pda_t$ “ se kao ulazni podatak ubacuje u model za minimalizaciju gubitaka zajedno sa promijenjenom, „stvarnom“ prognozom proizvodnje iz vjetroparka (termin „stvarna proizvodnja“ koristit će se za očekivanu proizvodnju prema boljoj prognozi puhanja vjetra budući da je vrijeme između davanje prognoze i trenutka ostvarivanja proizvodnje kraće nego u slučaju kada se prognoza izvršila u trenutku formiranja ponude na tržištu dan unaprijed). Očekivane vrijednosti energije iz vjetroparka su se promijenile. Energija koju vjetropark daje u svakom satu se promijenila zato što to ovisi o vremenskim uvjetima, ovisi o tome koliko u kojem satu puše vjetar.



Slika 5.4. Očekivana i „stvarna“ proizvodnja vjetroparka

Iz grafikona se vidi da se očekivana proizvodnja električne energije iz vjetroparka i stvarna proizvodnja razlikuju. Od drugog do osmog sata vjetropark proizvodi manje energije, a od desetog do dvadesetdrugog sata vjetropark proizvodi više energije od očekivane. Ukoliko vjetropark proizvodi manje energije, dodatna energija mora se kupiti po dvostrukoj većoj cijeni, a višak energije prodaje se po cijeni koja iznosi 10% tržišne cijene ostvarene na tržištu dan unaprijed. Npr., za peti sat očekivana energija iznosi 92 MWh, a stvarna proizvodnja je 75 MWh što je 17 MWh manje energije te ta dodatna energija mora se kupiti po cijeni 49,8 €/MWh, ukupno 846,6 €. Električna energija u osamnaestom satu prodaje se po cijeni od 7,21 €/MWh, što je ukupno 252,35 € zato što postoji viška 35 MWh.

Upravo kako bi se izbjeglo ovo smanjivanje zarade, provedena je optimizacija redišpečiranja, odnosno preraspodjele angažiranja baterijskog spremnika.

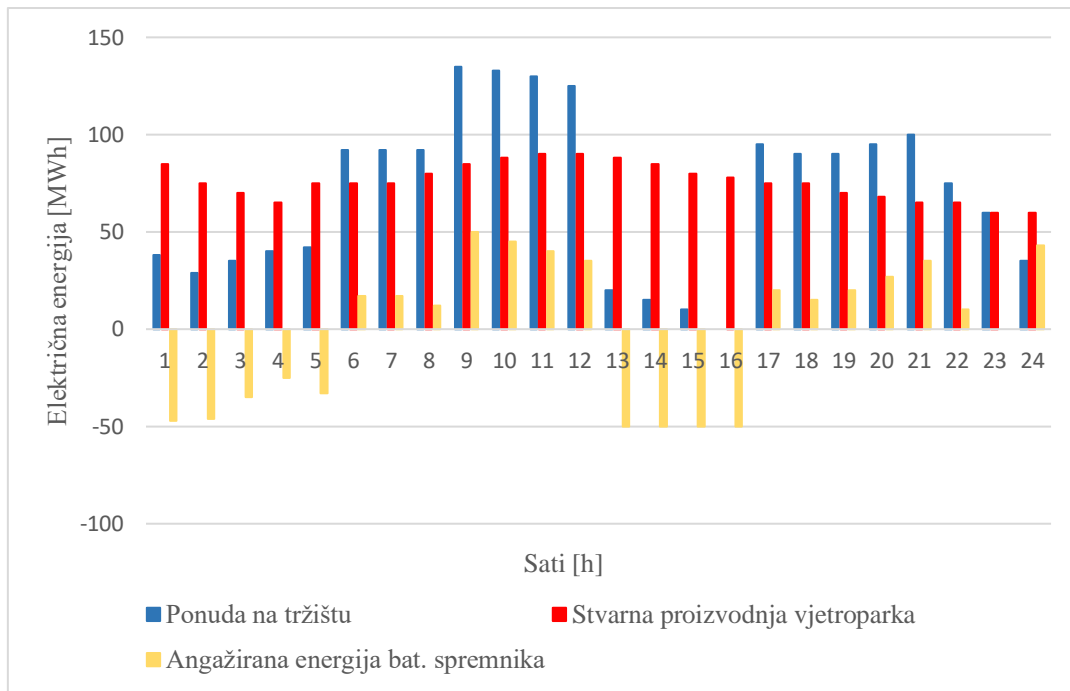
U tablici 5.5. može se vidjeti stvarna proizvodnja vjetroparka, angažirana električna energija baterijskog spremnika te stanje napunjenosti baterijskog spremnika.

Tablica 5.5. Stvarna proizvodnja vjetroparka, angažirana energija i napunjenost bat. spremnika

<b>t [h]</b>	<b><math>W_t</math> [MWh]</b>	<b><math>B_t</math> [MWh]</b>	<b><math>SOC_t</math> [MWh]</b>
1	85	-47	107
2	75	-46	153
3	70	-35	188
4	65	-25	213
5	75	-33	246
6	75	17	229
7	75	17	212
8	80	12	200
9	85	50	150
10	88	45	105
11	90	40	65
12	90	35	30
13	88	-50	80
14	85	-50	130
15	80	-50	180
16	78	-50	230
17	75	20	210
18	75	15	195
19	70	20	175
20	68	27	148
21	65	35	113
22	65	10	103
23	60	0	103
24	60	43	60

Od prvog do petog sata baterija se puni. Od šestog do dvanaestog sata baterija se prazni. Baterija se također puni od trinaestog do šesnaestog sata i to sa maksimalnom energijom koju baterijski spremnik može primiti u jednom satu, a to je 50 MWh.





Slika 5.5. Raspored angažiranja baterijskog spremnika sa stvarnom prognozom vjetra

Kako bi prikazali dobrobit sustava, prikazat će se zarada na tržištu dan unaprijed, zarada kada se ne bi vršilo redišpečiranje baterijskog spremnika (bez provedbe 2. optimizacijskog modela) te zarada ukoliko se provede redišpečiranje baterijskog spremnika prema novoj, stvarnoj prognozi proizvodnje iz vjetroparka koristeći 2. optimizacijski model. Rezultati su prikazani u tablici 5.6.

Tablica 5.6. Zarada na tržištu

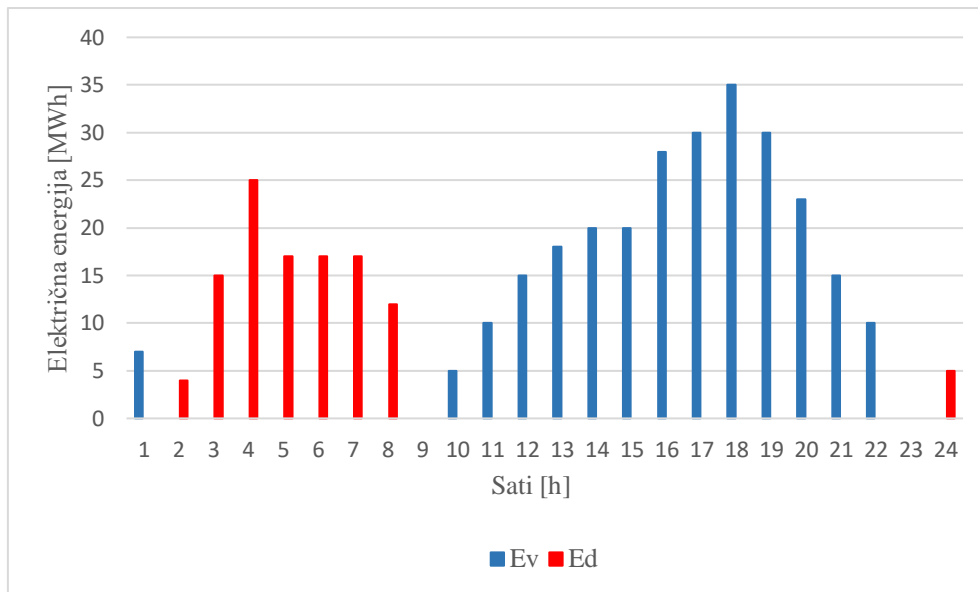
Zarada na tržištu dan unaprijed	105221,1 [€]
Ukupna zarada na tržištu u stvarnom vremenu bez korekcije plana rada baterijskog spremnika	98371,2 [€]
Zarada na tržištu u stvarnom vremenu uz korekciju plana rada baterijskog spremnika (redišpečiranje baterijskog spremnika)	106129,1 [€]

Zarada na tržištu električne energije dan unaprijed računa se kao umnožak satne ponude na tržištu i cijene električne energije te iznosi 105221,1 € što je i prikazano u tablici.

Pretpostavljena proizvodnja električne energije iz vjetroparka i stvarna proizvodnja energije se razlikuju te zbog toga postoje viškovi i manjkovi električne energije. Kada ne bi imali baterijski spremnik te viške i manjke energije bi morali prodavati ili kupovati. U tablici 5.7. je prikazana razlika stvarne i pretpostavljene proizvodnje iz vjetroparka te cijena za te penale za svaki sat. Pozitivan predznak znači da se energija prodaje dok negativan predznak znači da se energija kupuje. Cijena kupovne energije računa se prema formuli:  $2 \cdot \lambda_t \cdot Ed_t$ , a prodane energije:  $0,1 \cdot \lambda_t \cdot Ev_t$ . Ukupna dobit iznosi 98371,2 € što je 6849,86 € manje od zarade na tržištu dan unaprijed.

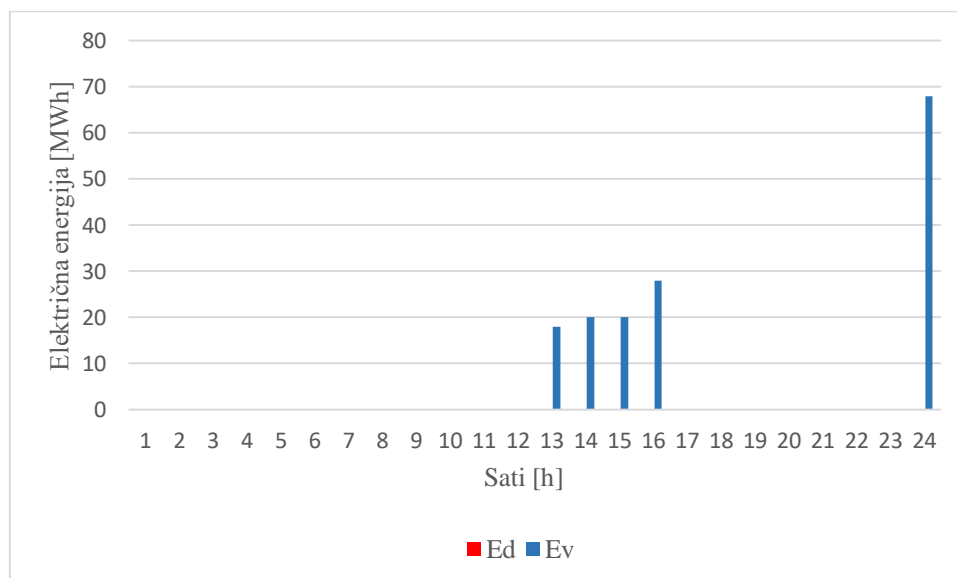
Tablica 5.7. Penali

<b>t [h]</b>	1	2	3	4	5	6	7	8
<b><math>Ed_t, Ev_t</math> [MWh]</b>	7	-4	-15	-25	-17	-17	-17	-12
<b>Cijena [€]</b>	25,06	-280	-789	-1235	-846,6	-1326	-2067,2	-1560
<b>t [h]</b>	9	10	11	12	13	14	15	16
<b><math>Ed_t, Ev_t</math> [MWh]</b>	0	5	10	15	18	20	20	28
<b>Cijena [€]</b>	0	36,05	70,9	104,85	104,4	116	123,2	190,4
<b>t [h]</b>	17	18	19	20	21	22	23	24
<b><math>Ed_t, Ev_t</math> [MWh]</b>	30	35	30	23	15	10	0	-5
<b>Cijena [€]</b>	219,3	252,35	216,3	165,83	107,7	71,6	0	-550



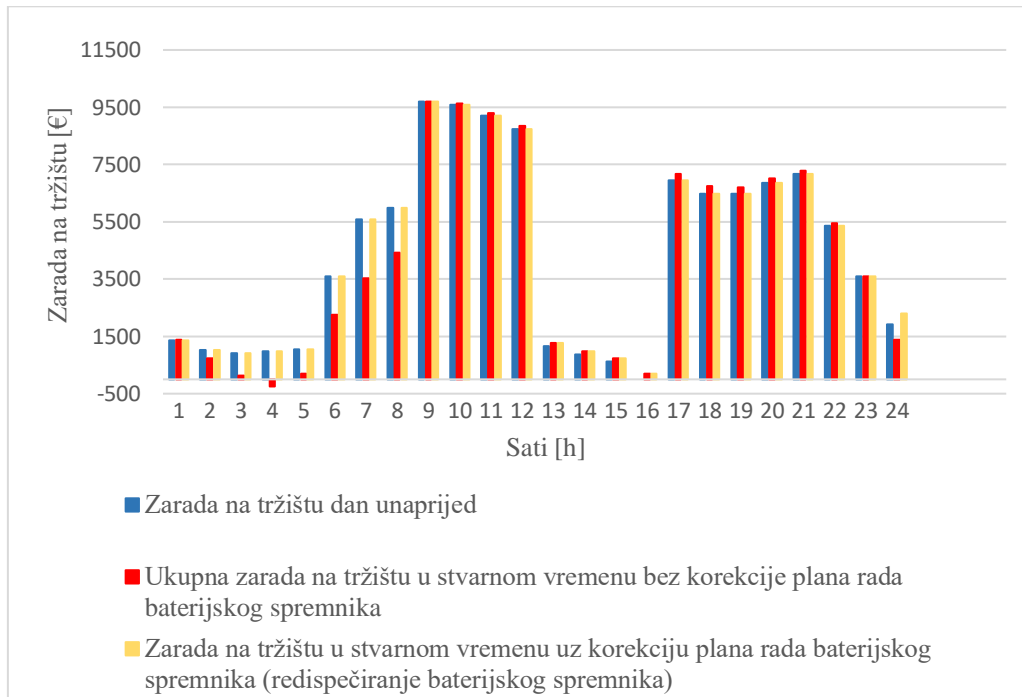
Slika 5.6. Dodatna kupljena (Ed) i prodana (Ev) električna energija za slučaj bez korekcije angažmana baterijskog spremnika

Kada se u stvarnom vremenu koristi 2. optimizacijski model, za vrijeme kada postoji manjak energije iz vjetroparka, bat. spremnik će nadomjesti taj manjak ako baterija nije ispražnjena i ako nije jeftinije kupiti dodatnu električnu energiju. Ukoliko postoji višak energije, koristit će se za punjenje baterije. Ukoliko je baterija već napunjena, višak će se prodati na tržište. Na slici 5.7. je prikazana dodatna kupljena (Ed) i dodatna prodana energija (Ev) za svaki sat.



Slika 5.7. Dodatna kupljena i prodana električna energija za slučaj redispečiranja baterijskog spremnika

Višak energije prodaje se od 13. do 16. sata pa ponovo 24. sat. Dobit od prodanog viška je 908 €, a ukupna zarada na kraju promatranog razdoblja iznosi 106129,1 €. Može se primijetiti da u ovom slučaju ne postoji potreba za kupovinom dodatne električne energije, budući da se ona dobiva redispečiranjem baterijskog spremnika.



Slika 5.8. Zarada na tržištu

Slika 5.8. prikazuje zaradu za svaki sat za sva tri slučaja

## 6. ZAKLJUČAK

Tržište električne energije se dijeli na tržište dan unaprijed i unutardnevno tržište. Električna energija nije opipljiva te zahtjeva neprekidan tok, odnosno električna energija se mora u kontinuitetu proizvoditi i trošiti. Kada potrošnja ili proizvodnja energije odstupaju od dogovorene količine dolazi do neravnoteže sustava te se njezino uzrokovanje penalizira sustavom jedinstvenih i dvojnih cijena. U diplomskom radu predstavljen je sustav vjetroelektrane i baterijskog spremnika električne energije. Baterijski spremnici električne energije preuzimaju sve važniju ulogu u modernim elektroenergetskim sustavima s velikim udjelom obnovljivih izvora energije. Rad sadrži dva modela koji su izrađeni u Matlabu. Prvi model ima zadatak maksimizirati dobit na tržištu dan unaprijed. Drugi model služi za minimizaciju penala zbog odstupanja od plana rada ugovorenog na tržištu dan unaprijed. Energija iz vjetroelektrana nije konstantna, ona se može razlikovati u svakom satu te ona ovisi o brzini puhanja vjetra. Očekivana proizvodnja i stvarna proizvodnja iz vjetroparka se razlikuje. Kako bi zadovoljili ponudu na tržištu dan unaprijed uz promijenjenu prognozu očekivane proizvodnje iz vjetroelektrana, koristi se drugi model minimizacije penala. Ako vjetar puše manje od očekivanog, baterijski spremnik može nadomjesti taj manjak, odnosno tada se baterija prazni kompenzirajući tako očekivani manjak. Ukoliko postoji višak energije iz vjetroparka, baterija taj višak može uskladištiti te ga kasnije iskoristiti. Kada sustav nema baterijski spremnik, manjak ili višak energije bi se morao kupovati, odnosno prodavati prema cijenama penala. Usporedbom zarade ostvarene u slučajevima bez i sa redispečiranjem baterijskom spremnika, prikazana je dobit primjene modela minimizacije penala zbog uzrokovane neravnoteže.

## LITERATURA

- [1] S. Nikolovski, K. Fekete, G. Knežević, Z. Stanić, Uvod u tržište električne energije, udžbenik, Elektrotehnički fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 2010.
- [2] G. Knežević, Optimalna zajednička ponuda na tržištu električne energije za sustav hidroelektrana i vjetroelektrana, doktorski rad, 2013.
- [3] Spremnici energije, dostupno online :  
[https://www.fer.unizg.hr/download/repository/04\\_Baterije.pdf](https://www.fer.unizg.hr/download/repository/04_Baterije.pdf) (pristupljeno : 6.5.2019.)
- [4] Z. Luburić, H. Bašić, H. Pandžić, T. Plavšić, Uloga spremnika energije u elektroenergetskom sustavu, Cigre, 2016. ,dostupno online:  
[https://bib.irb.hr/datoteka/863140.Uloga\\_spremnika\\_energije\\_u\\_elektroenergetskom\\_sustavu.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/863140.Uloga_spremnika_energije_u_elektroenergetskom_sustavu.pdf) (pristupljeno : 7.5.2019. )
- [5] Z. Ofak, T. Plavšić, Lj. Teklić, A. Župan, Spremnici energije u kontekstu povećane potrebe za izvorima fleksibilnosti u elektroenergetskom sustavu, Cigre, 2018. ,dostupno online :  
<https://www.searchnewworld.com/search/search2.html?partid=imnsknsch&p=njema%C4%8Dka+huntorf&subid=62212345> (pristupljeno : 8.5.2019.)
- [6] Z. Ofak, A. Župan, T. Plavšić, Z. Luburić, H. Pandžić , Pravilnik o priključenju spremnika energije na elektroenergetski sustav, dostupno online:  
<https://siren.fer.hr/images/50018491/D4.4.pdf> (pristupljeno : 13.5.2019. )
- [7] Hrvatska burza električne energije, dostupno online : <https://www.cropex.hr/hr/>  
(pristupljeno : 19.5.2019 )

## SAŽETAK

U diplomskom radu je opisano tržište električne energije i načini trgovanja električnom energijom. Za provedbu simulacije osmišljen je sustav koji čine vjetropark i baterijski spremnik. Rad sadrži dva modela. Cilj prvog modela je maksimizacija dobiti na tržištu, a cilj drugog modela je minimalizacija penala zbog neravnoteže. Usporedbom zarade ostvarene u slučajevima bez i s redispečiranjem baterijskom spremnika, prikazana je dobrobit primjene modela minimizacije penala zbog uzrokovane neravnoteže u svrhu promijene plana angažiranja baterijskog spremnika.

**Ključne riječi :** tržište električne energije, maksimizacija dobiti, minimalizacija penala, vjetropark, baterijski spremnik

## ABSTRACT

The thesis describes the electricity market and ways of trading electricity. To perform the simulation is designed a system which is consisted of a wind farm and a battery storage. The thesis contains two models. The aim of the first model is to maximize profits in the market, and the aim of the second model is to minimize penalties due to imbalances. Comparing the profits made in cases without and with redistribution of the battery storage, the benefits of applying a penalty minimization model due to the imbalance caused to change the plan for engaging the battery storage are shown.

**Key words :** electricity market, profit maximization, penalty minimization, wind farm, battery storage

## **ŽIVOTOPIS**

Martina Šušak rođena je 25. srpnja 1992. u Našicama u Hrvatskoj. Osnovnu školu završila je u Našicama nakon koje upisuje srednju školu Isidora Kršnjavog u Našicama, smjer opća gimnazija. Po završetku srednje škole, 2011. godine, upisuje Preddiplomski studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku. 2014. godine upisuje diplomski studij, smjer elektroenergetika.