

Kristina Jurković<sup>1</sup>  
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
kristina.jurkovic@fer.hr

Hrvoje Pandžić  
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
hrvoje.pandzic@fer.hr

Igor Kuzle  
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
igor.kuzle@fer.hr

## STRATEGIJA NASTUPA DISTRIBUIRANIH BATERIJSKIH SPREMNIKA NA TRŽIŠTU ELEKTRIČNE ENERGIJE

### SAŽETAK

Spremnici električne energije preuzimaju sve važniju ulogu u modernim elektroenergetskim sustavima s velikim udjelom obnovljivih izvora energije. Posebno su zanimljivi baterijski spremnici zbog svoje modularnosti i brzog odziva.

Ovaj rad analizira ulogu distribuiranih baterijskih spremnika kao sudionika na tržištu električne energije. Formuliran je dvorazinski model maksimizacije profita distribuiranih baterijskih spremnika koji u gornjoj razini određuje profit i nastup na tržištu dok u donjoj razini simulira čišćenje tržišta i formaciju cijena. Matematički problem s ravnotežnim ograničenjima pretvoren je u cjelobrojno-mješoviti linearni problem. Predloženi model primijenjen je na proširenom IEEE RTS-96 sustavu. Vrednovan je utjecaj distribuiranih baterijskih spremnika na lokalne čvorišne cijene u sustavu.

**Ključne riječi:** baterijski spremnik, maksimizacija profita, dvorazinski problem, matematički problem s ravnotežnim ograničenjima

## DISTRIBUTED BATTERY STORAGE OFFERING STRATEGY IN DAY-AHEAD ELECTRICITY MARKET

### SUMMARY

Energy storage is becoming an important feature in modern power system with high renewable energy penetration. Battery energy storage is especially interesting because of their modularity and fast response.

This paper analyzes the distributed battery storage role in day-ahead electricity market. We formulate a bilevel profit maximization model. The upper level determines the profit and offering strategy, while the lower level simulates the market clearing problem and price formation. Mathematical problem with equilibrium constraints is reformulated as a mixed-integer linear problem.

The model is applied to an extended IEEE RTS-96 system. We analyzed and evaluated battery storage impact on the system's prices.

**Key words:** battery energy storage, profit maximization, bilevel programming, mathematical problem with equilibrium constraints

<sup>1</sup> Stavovi izneseni u referatu su osobna mišljenja autora, nisu obvezujući za poduzeće/instituciju u kojoj je autor zaposlen te se ne moraju nužno podudarati sa službenim stavovima poduzeća/institucije.

## 1. UVOD

### 1.1. Motivacija

Rastući udio obnovljivih izvora energije (OIE) mijenja sliku modernog elektroenergetskog sustava. Veliki udio nedispečebilnog kapaciteta smanjuje tehničku mogućnost praćenja nesigurne neto potrošnje i povećava trošak rezerve. Ovi tehnički i ekonomski uvjeti stvaraju pogodnu klimu za spremnike električne energije. Jednakost proizvodnje i potrošnje održava se kroz duži vremenski period, npr. kroz sate, dok spremnik električne energije služi za pokrivanje kratkoročnih razlika između proizvodnje i potrošnje. U članku [1], Rasmussen tvrdi da bi spremnici električne energije mogli omogućiti pokrivanje cjelokupne europske potražnje obnovljivim izvorima energije. Proizvodnja električne energije iz vjetroelektrana već sad ima visoke razine. U Danskoj 2015. godine, vjetroturbine su zadovoljile 42% ukupne potražnje na državnoj razini[2].

Glavni nedostaci konvencionalnih spremnika električne energije (reverzibilna hidroelektrana i spremnik komprimiranog zraka) su geografska ograničenja i glomaznost stoga nisu primjereni kao modularna rješenja koja se mogu instalirati na gotovo bilo koje mjesto u sustavu. Pregled trenutnog stanja spremničkih tehnologija izdvaja baterijska rješenja kao najsvestranija[3]. S obzirom na njihovu uporabu u električnim vozilima, cijene su u konstantnom padu [4]. Baterije imaju širok raspon aplikacija u elektroenergetskom sustavu kao što su smanjenje vršne potrošnje [5], [6], povećanje fleksibilnosti i pouzdanosti sustava, usluge regulacije [7]. Baterijski spremnici zbog brzog odziva imaju potencijal za korištenje kod potrebe za brzom promjenom proizvodnje u sustavu [8]. Ekonomska vrijednost odgađanja investicije u prijenosni vod ili proizvodni kapacitet razmatra se u [9]. Razvoj tehnologija spremanja električne energije, posebno baterijskih rješenja nudi rješenja za mnoge izazove u naprednim mrežama [10], [11]. Kombiniranjem aplikacija smanjuje se vrijeme povrata investicije što investiciju čini privlačnijom.

### 1.2. Pregled literature

Većina istraživanja o spremnicima električne energije usmjerena je na podršku OIE, obično vjetroelektranama. U [12] i [13] autori predlažu mehanizam nadmetanja združene vjetroelektrane i reverzibilne hidroelektrane na tržištu. Model maksimizacije profita virtualne elektrane koja sadrži spremnik električne energije predložen je u [14]. Model uzima u obzir bilateralne ugovore uz maksimizaciju profita na tržištu dan-unaprijed.

Rad spremnika na tržištu dan unaprijed i tržištu rezerve istražen je u [15]. Kao jedan od glavnih zaključaka nameće se važnost lokacije spremnika jer se profit može značajno razlikovati u slučaju zagušenog sustava.

Formulacija ponašanja spremnika u srednje- i dugoročnim modelima korištenjem krivulje trajanja opterećenja predlaže se u [16]. Metodologija stanja sustava aproksimira rad spremnika bez zahtjeva za satnom vremenskom skalom što smanjuje veličinu modela kao i vrijeme računanja.

U [17] se procjenjuje utjecaj strateškog ponašanja spremnika na tržištu. Rezultati pokazuju da strateško ponašanje ne utječe uvijek povoljno na društveno blagostanje. Spremnik nastoji zadržati volatilnost cijena kako bi maksimizirao profit.

Kako bi se dobio najveći profit, potrebno je proučiti problem odabira lokacije spremnika. U [18] autori predstavljaju skoro-optimalnu tehniku za odabir lokacije i veličine spremnika. Optimalne lokacije spremnika nalaze se u blizini vjetroelektrana ili u zagušenim dijelovima mreže.

Rad spremnika uvelike ovisi o vlasničkoj strukturi. Na primjer, TERNA koristi spremnike za sigurnije i jeftinije vođenje talijanske prijenosne mreže [19]. U vertikalno integriranim sustavima spremnici se koriste za smanjenje ukupnog operativnog troška [18]. Spremnici koji sudjeluju na tržištu za cilj imaju maksimizaciju profita [17].

## 2. FORMULACIJA

### 2.1. Notacija

#### 1) Skupovi

$\Omega^B$  – skup linearnih segmenata koji opisuju krivulju troškova svake proizvodne jedinice, b.

$\Omega^C$  – skup linearnih segmenata koji opisuju krivulju ponude svakog tereta, c.

$\Omega^H$  – skup baterijskih spremnika, h.

$\Omega^I$  – skup proizvodnih jedinica, i.

$\Omega^L$  – skup vodova, l.

$\Omega^S$  – skup sabirnica, s.  
 $\Omega^T$  – skup vremenskih perioda, t.  
 $\Omega^W$  – skup vjetroelektrana, w.

2) Varijable

$d_{t,s,c}$  – teret segmenta c na sabirnici s u trenutku t (MW)  
 $g_{t,i,b}$  – izlazna snaga segmenta b generatora i u trenutku t (MW)  
 $k_{t,w}$  – snaga vjetra vjetroelektrane w u trenutku t (MW)  
 $pf_{t,s,m}$  – snaga na vodu između sabirnica s i m u trenutku t (MW)  
 $q_{t,h}^{ch}$  – snaga punjenja spremnika h u trenutku t (MW)  
 $q_{t,h}^{dis}$  – snaga pražnjenja spremnika h u trenutku t (MW)  
 $soc_{t,h}$  – stanje napunjenosti spremnika h u trenutku t (MWh)  
 $\alpha_{t,h}^{ch}$  – ponuda za punjenje spremnika h u trenutku t (\$)  
 $\alpha_{t,h}^{dis}$  – ponuda za pražnjenje spremnika h u trenutku t (\$)  
 $\theta_{t,s}$  – kut napona na sabirnici s u trenutku t (rad)

3) Parametri

$ch_h^{max}$  – maksimalna snaga punjenja spremnika h (MW)  
 $dis_h^{max}$  – maksimalna snaga pražnjenja spremnika h (MW)  
 $d_{t,s,c}^{max}$  – maksimalna snaga segmenta c tereta na sabirnici s u trenutku t (MW)  
 $\eta_h^{ch}$  – učinkovitost punjenja spremnika h  
 $\eta_h^{dis}$  – učinkovitost pražnjenja spremnika h  
 $g_{i,b}^{max}$  – maksimalna snaga segmenta b generatora i (MW)  
 $k_{t,w}^{max}$  – maksimalna snaga vjetroelektrane w u trenutku t (MW)  
 $\lambda_{s,c}^D$  – Ponudbena cijena segmenta c na sabirnici s (€/MW)  
 $\lambda_{i,b}^G$  – Ponudbena cijena segmenta b generatora i (€/MW)  
 $pf_{s,m}^{max}$  – maksimalna snaga voda između sabirnica s i m (MW)  
 $soc_h^{max}$  – maksimalno stanje napunjenosti spremnika h (MWh)  
 $sus_{s,m}$  – susceptancija voda između sabirnica s i m (S)

## 2.2. Formulacija modela

Optimizacijski problem koji maksimizira profit distribuiranih baterijskih spremnika:

$$\max \sum_{t \in \Omega^T} \sum_{h \in \Omega^H} -\lambda_{t,s(h)} \cdot (q_{t,h}^{dis} - q_{t,h}^{ch}) \quad (1)$$

Ograničenja funkcije cilja:

$$soc_{t,h} = soc_{t-1,h} + \Delta t \cdot q_{t,h}^{ch} \cdot \eta_h^{ch} - \Delta t \cdot \frac{q_{t,h}^{dis}}{\eta_h^{dis}} \quad \forall t \in \Omega^T, h \in \Omega^H \quad (2)$$

$$0 \leq soc_{t,h} \leq soc_h^{max} \quad \forall t \in \Omega^T, h \in \Omega^H \quad (3)$$

$$\alpha_{t,h}^{dis} \geq 0 \quad \forall t \in \Omega^T, h \in \Omega^H \quad (4)$$

$$\alpha_{t,h}^{ch} \geq 0 \quad \forall t \in \Omega^T, h \in \Omega^H \quad (5)$$

$$\max \sum_{t \in \Omega^T} \sum_{s \in \Omega^S} \sum_{c \in \Omega^C} \lambda_{s,c}^D \cdot d_{t,s,c} + \sum_{t \in \Omega^T} \sum_{h \in \Omega^H} \alpha_{t,h}^{ch} \cdot q_{t,h}^{ch} - \sum_{t \in \Omega^T} \sum_{i \in \Omega^I} \sum_{b \in \Omega^B} \lambda_{i,b}^G \cdot g_{t,i,b} - \sum_{t \in \Omega^T} \sum_{h \in \Omega^H} \alpha_{t,h}^{dis} \cdot q_{t,h}^{dis} \quad (6)$$

Ograničenja unutarnje funkcije cilja:

$$\sum_{w \in \Omega^{W(S)}} k_{t,w} + \sum_{h \in \Omega^{H(S)}} q_{t,h}^{\text{dis}} + \sum_{i \in \Omega^{I(S)}} \sum_{b \in \Omega^B} g_{t,i,b} - \sum_{l \in \Omega^{L(S)}} pf_{t,l}^- + \sum_{l \in \Omega^{L(S)}} pf_{t,l}^+ = \sum_{s \in \Omega^S} \sum_{c \in \Omega^C} d_{t,s,c} + \sum_{h \in \Omega^{H(S)}} q_{t,h}^{\text{ch}}$$

$$: \lambda_{t,s} \quad \forall t \in \Omega^T, s \in \Omega^S \quad (7)$$

$$pf_{t,l} = sus_{s,m} \cdot (\theta_{t,s} - \theta_{t,m}) \quad : \beta_{t,l} \quad \forall t \in \Omega^T, l \in \Omega^L, l \in \{s, m\} \quad (8)$$

$$-pf_l^{\text{max}} \leq pf_{t,l} \leq pf_l^{\text{max}} \quad : \beta_{t,l}^{\text{min}}, \beta_{t,l}^{\text{max}} \quad \forall t \in \Omega^T, l \in \Omega^L \quad (9)$$

$$0 \leq g_{t,i,b} \leq g_{i,b}^{\text{max}} \quad : \gamma_{t,i,b}^{\text{min}}, \gamma_{t,i,b}^{\text{max}} \quad \forall t \in \Omega^T, i \in \Omega^I, b \in \Omega^B \quad (10)$$

$$0 \leq d_{t,s,c} \leq d_{t,s,c}^{\text{max}} \quad : \sigma_{t,s,c}^{\text{min}}, \sigma_{t,s,c}^{\text{max}} \quad \forall t \in \Omega^T, s \in \Omega^S, c \in \Omega^C \quad (11)$$

$$0 \leq q_{t,h}^{\text{dis}} \leq dis_h^{\text{max}} \quad : \phi_{t,h}^{\text{dmin}}, \phi_{t,h}^{\text{dmax}} \quad \forall t \in \Omega^T, h \in \Omega^H \quad (12)$$

$$0 \leq q_{t,h}^{\text{ch}} \leq ch_h^{\text{max}} \quad : \phi_{t,h}^{\text{cmin}}, \phi_{t,h}^{\text{cmax}} \quad \forall t \in \Omega^T, h \in \Omega^H \quad (13)$$

$$0 \leq k_{t,w} \leq k_{t,w}^{\text{max}} \quad : \eta_{t,w}^{\text{min}}, \eta_{t,w}^{\text{max}} \quad \forall t \in \Omega^T, w \in \Omega^W \quad (14)$$

$$-\pi \leq \theta_{t,s} \leq \pi \quad : \mu_{t,s}^{\text{max}}, \mu_{t,s}^{\text{min}} \quad \forall t \in \Omega^T, s \in \Omega^S \quad (15)$$

$$\theta_{t,s_1} = 0 \quad : \mu_t^{\text{ref}} \quad \forall t \in \Omega^T \quad (16)$$

Funkcija cilja (1) maksimizira dobit distribuiranih baterijskih spremnika. Lokalna čvorišna cijena sabirnice na koju je spojen baterijski spremnik označena je s  $\lambda_{t,s}$  i predstavlja dualnu varijablu ravnotežnog ograničenja snage (7) koja se računa u unutarnjoj razini problema. Baterijski spremnik stvara profit na temelju razlike cijena električne energije u trenutku kupnje i u trenutku prodaje na tržištu električne energije. Prihod baterijskog spremnika ovisan je o profilu cijena na lokaciji na kojoj je spojen.

Funkcija cilja (1) ograničena je ograničenjima gornje razine koja predstavljaju rad spremnika (2)-(5), a donja razina problema predstavlja proceduru čišćenja tržišta (6)-(16). Ograničenje (2) određuje trenutno stanje napunjenosti baterijskog spremnika na temelju vrijednosti iz prethodnog vremenskog perioda i ukupnog punjenja ili pražnjenja u trenutnom vremenskom periodu. Ograničenje (3) ograničava stanje napunjenosti. S obzirom na učinkovitosti punjenja i pražnjenja, spremnik se neće istovremeno puniti i prazniti. Ograničenja (4) i (5) osiguravaju pozitivne cijene nuđenja na tržištu.

Funkcija cilja problema donje razine (6) maksimizira društveno blagostanje. Za aproksimaciju prijenosne mreže koristi se istosmjerni čvorišni model. Ograničenje (7) predstavlja čvorišnu ravnotežnu jednadžbu snage. Tokovi kroz vodove izračunavaju se u (8), a ograničeni su ograničenjem (9). Ograničenja (10) i (11) ograničavaju ponudbene blokove generatora i tereta. Ograničenja (12) i (13) ograničavaju ponudbene blokove spremnika, a ograničenje (15) ograničava snagu iz OIE. Pretpostavka je da vjetroelektrane nude svoju energiju na tržištu po cijeni 0€/MWh te se njihovo nuđenje ne modelira u funkciji cilja donje razine. Posljedično, model će koristiti najviše moguće besplatne energije vjetra. Ograničenje (15) ograničava kutove napona svakog čvorišta, a ograničenje (16) postavlja referentnu sabirnicu.

Model izračunava satne krivulje nuđenja distribuiranih baterijskih spremnika i maksimizira njihov profit na tržištu električne energije. Ponude ostalih generatora i tereta smatraju se poznatima i mogu se izračunati na temelju povijesnih podataka i procedure iz [20].

### 2.3. Reformulacija modela

Problem donje razine je kontinuiran i linearan stoga ga je moguće zamijeniti KKT uvjetima optimalnosti [21] što rezultira matematičkim problemom s ravnotežnim ograničenjima čija je formulacija:

$$\max \sum_{t \in \Omega^T} \sum_{h \in \Omega^H} -\lambda_{t,s(h)} \cdot (q_{t,h}^{\text{dis}} - q_{t,h}^{\text{ch}}) \quad (17)$$

$$\text{ograničenja gornje razine (2) - (5)} \quad (18)$$

KKT uvjeti:

$$-\lambda_{i,b}^G - \lambda_{t,s(i)} + \gamma_{t,i,b}^{\min} - \gamma_{t,i,b}^{\max} = 0 \quad \forall t \in \Omega^T, i \in \Omega^I, b \in \Omega^B \quad (19)$$

$$\lambda_{s,c}^D + \lambda_{t,s} + \sigma_{t,s,c}^{\min} - \sigma_{t,s,c}^{\max} = 0 \quad \forall t \in \Omega^T, s \in \Omega^S, c \in \Omega^C \quad (20)$$

$$-\alpha_{t,h}^{\text{dis}} - \lambda_{t,s(h)} + \phi_{t,h}^{\text{dmin}} - \phi_{t,h}^{\text{dmax}} = 0 \quad \forall t \in \Omega^T, h \in \Omega^H \quad (21)$$

$$\alpha_{t,h}^{\text{ch}} + \lambda_{t,s(h)} + \phi_{t,h}^{\text{cmin}} - \phi_{t,h}^{\text{cmax}} = 0 \quad \forall t \in \Omega^T, h \in \Omega^H \quad (22)$$

$$-\lambda_{t,s(l)} - \beta_{t,l} + \beta_{t,l}^{\min} - \beta_{t,l}^{\max} = 0 \quad \forall t \in \Omega^T, l \in \Omega^L \quad (23)$$

$$\beta_{t,l} \cdot \text{sus}_l - \mu_t^{\text{ref}} + \mu_{t,s}^{\min} - \mu_{t,s}^{\max} = 0 \quad \forall t \in \Omega^T, s \in \Omega^S, l \in \Omega^{\text{S(L)}} \quad (24)$$

$$\sum_{w \in \Omega^{\text{W(S)}}} k_{t,w} + \sum_{h \in \Omega^{\text{H(S)}}} q_{t,h}^{\text{dis}} + \sum_{i \in \Omega^{\text{I(S)}}} \sum_{b \in \Omega^{\text{B}}} g_{t,i,b} - \sum_{l \in \Omega^{\text{L(S)}}} pf_{t,l}^- + \sum_{l \in \Omega^{\text{L(S)}}} pf_{t,l}^+ = \sum_{s \in \Omega^{\text{S}}} \sum_{c \in \Omega^{\text{C}}} d_{t,s,c} + \sum_{h \in \Omega^{\text{H(S)}}} q_{t,h}^{\text{ch}} \quad \forall t \in \Omega^T \quad (25)$$

$$pf_{t,l} = \text{sus}_l \cdot (\theta_{t,s} - \theta_{t,m}) \quad \forall t \in \Omega^T, \{s, m\} \in \Omega^L, l \in \{s, m\} \quad (26)$$

$$\theta_{t,s_1} = 0 \quad \forall t \in \Omega^T \quad (27)$$

$$0 \leq pf_l^{\max} + pf_{t,l} \perp \beta_{t,l}^{\min} \geq 0 \quad \forall t \in \Omega^T, \forall l \in \Omega^L \quad (28)$$

$$0 \leq pf_l^{\max} - pf_{t,l} \perp \beta_{t,l}^{\max} \geq 0 \quad \forall t \in \Omega^T, \forall l \in \Omega^L \quad (29)$$

$$0 \leq g_{t,i,b} \perp \gamma_{t,i,b}^{\min} \geq 0 \quad \forall t \in \Omega^T, \forall i \in \Omega^I, \forall b \in \Omega^B \quad (30)$$

$$0 \leq g_{i,b}^{\max} - g_{t,i,b} \perp \gamma_{t,i,b}^{\max} \geq 0 \quad \forall t \in \Omega^T, \forall i \in \Omega^I, \forall b \in \Omega^B \quad (31)$$

$$0 \leq d_{t,s,c} \perp \sigma_{t,s,c}^{\min} \geq 0 \quad \forall t \in \Omega^T, \forall s \in \Omega^S, \forall c \in \Omega^C \quad (32)$$

$$0 \leq d_{t,s,c}^{\max} - d_{t,s,c} \perp \sigma_{t,s,c}^{\max} \geq 0 \quad \forall t \in \Omega^T, \forall s \in \Omega^S, \forall c \in \Omega^C \quad (33)$$

$$0 \leq q_{t,h}^{\text{dis}} \perp \phi_{t,h}^{\text{dmin}} \geq 0 \quad \forall t \in \Omega^T, \forall h \in \Omega^H \quad (34)$$

$$0 \leq \text{dis}_h^{\max} - q_{t,h}^{\text{dis}} \perp \phi_{t,h}^{\text{dmax}} \geq 0 \quad \forall t \in \Omega^T, \forall h \in \Omega^H \quad (35)$$

$$0 \leq q_{t,h}^{\text{ch}} \perp \phi_{t,h}^{\text{cmin}} \geq 0 \quad \forall t \in \Omega^T, \forall h \in \Omega^H \quad (36)$$

$$0 \leq \text{ch}_h^{\max} - q_{t,h}^{\text{ch}} \perp \phi_{t,h}^{\text{cmax}} \geq 0 \quad \forall t \in \Omega^T, \forall h \in \Omega^H \quad (37)$$

$$0 \leq k_{t,w} \perp \eta_{t,w}^{\min} \geq 0 \quad \forall t \in \Omega^T, \forall w \in \Omega^W \quad (38)$$

$$0 \leq k_{t,w}^{\max} - k_{t,w} \perp \eta_{t,w}^{\max} \geq 0 \quad \forall t \in \Omega^T, \forall w \in \Omega^W \quad (39)$$

$$0 \leq \pi + \theta_{t,s} \perp \mu_{t,s}^{\min} \geq 0 \quad \forall t \in \Omega^T, \forall s \in \Omega^S \quad (40)$$

$$0 \leq \pi - \theta_{t,s} \perp \mu_{t,s}^{\max} \geq 0 \quad \forall t \in \Omega^T, \forall s \in \Omega^S \quad (41)$$

KKT uvjeti sastoje se od uvjeta stacionarnosti (19)-(24), uvjeta primalne izvedivosti za jednakosti (25)-(27) i uvjeta primalne i dualne izvedivosti za nejednakosti uključujući uvjete komplementarnosti (28)-(41).

Matematički problem s ravnotežnim ograničenjima sadrži sljedeće nelinearnosti:

- 1) Umnožak dualne varijable  $\lambda_{t,s}$  i primalnih varijabli  $(q_{t,h}^{\text{dis}} - q_{t,h}^{\text{ch}})$  u funkciji cilja
- 2) Uvjeti komplementarnosti (28)-(41)

## 2.4. Linearizacija modela

Za linearizaciju funkcije cilja koristimo KKT uvjete. Korištenjem (21) i (22) transformiramo funkciju cilja u:

$$\max - \sum_{t \in \Omega^T} \sum_{h \in \Omega^H} (-\alpha_{t,h}^{\text{dis}} + \phi_{t,h}^{\text{dmin}} - \phi_{t,h}^{\text{dmax}}) \cdot q_{t,h}^{\text{dis}} + \sum_{t \in \Omega^T} \sum_{h \in \Omega^H} (-\alpha_{t,h}^{\text{ch}} - \phi_{t,h}^{\text{cmin}} + \phi_{t,h}^{\text{cmax}}) \cdot q_{t,h}^{\text{ch}} \quad (42)$$

Budući da je  $\phi_{t,h}^{\text{dmin}} \cdot q_{t,h}^{\text{dis}} = 0$  i  $\phi_{t,h}^{\text{cmin}} \cdot q_{t,h}^{\text{ch}} = 0$ , vrijedi:

$$\lambda_{t,s(h)} \cdot (q_{t,h}^{\text{dis}} - q_{t,h}^{\text{ch}}) = \alpha_{t,h}^{\text{dis}} \cdot q_{t,h}^{\text{dis}} + \phi_{t,h}^{\text{dmax}} \cdot q_{t,h}^{\text{dis}} - \alpha_{t,h}^{\text{ch}} \cdot q_{t,h}^{\text{ch}} + \phi_{t,h}^{\text{cmax}} \cdot q_{t,h}^{\text{ch}} \quad (43)$$

Rezultirajuća funkcija cilja (43) sadrži nelinearni umnožak cijena nudića i količina nudića. Teorem stroge dualnosti osigurava jednaku vrijednost primalnog i dualnog problema u točki optimuma.

$$\begin{aligned} & \sum_{s \in \Omega^S} \sum_{c \in \Omega^C} \lambda_{s,c}^D \cdot d_{t,s,c} + \sum_{h \in \Omega^H} \alpha_{t,h}^{\text{ch}} \cdot q_{t,h}^{\text{ch}} - \sum_{i \in \Omega^I} \sum_{b \in \Omega^B} \lambda_{i,b}^G \cdot g_{t,i,b} - \sum_{h \in \Omega^H} \alpha_{t,h}^{\text{dis}} \cdot q_{t,h}^{\text{dis}} = \\ & = \sum_{l \in \Omega^L} (\beta_{t,l}^{\text{min}} \cdot pf_l^{\text{max}} + \beta_{t,l}^{\text{min}} \cdot pf_l^{\text{max}}) + \sum_{i \in \Omega^I} \sum_{b \in \Omega^B} \gamma_{t,i,b}^{\text{max}} \cdot g_{i,b}^{\text{max}} + \sum_{s \in \Omega^S} \sum_{c \in \Omega^C} \sigma_{t,s,c}^{\text{max}} \cdot d_{t,s,c}^{\text{max}} + \\ & + \sum_{h \in \Omega^H} (\phi_{t,h}^{\text{dmax}} \cdot dis_h^{\text{max}} + \phi_{t,h}^{\text{cmax}} \cdot ch_h^{\text{max}}) + \sum_{w \in \Omega^W} \eta^{\text{max}} \cdot k^{\text{max}} + \sum_{s \in \Omega^S} (\pi \cdot \mu_{t,s}^{\text{min}} + \pi \cdot \mu_{t,s}^{\text{max}}) \quad \forall t \in \Omega^T \quad (44) \end{aligned}$$

Iz (44) nelinearni se članovi mogu izraziti:

$$\begin{aligned} & \sum_{h \in \Omega^H} \alpha_{t,h}^{\text{dis}} \cdot q_{t,h}^{\text{dis}} - \sum_{h \in \Omega^H} \alpha_{t,h}^{\text{ch}} \cdot q_{t,h}^{\text{ch}} = \sum_{l \in \Omega^L} (\beta_{t,l}^{\text{min}} \cdot pf_l^{\text{max}} + \beta_{t,l}^{\text{min}} \cdot pf_l^{\text{max}}) - \sum_{i \in \Omega^I} \sum_{b \in \Omega^B} \gamma_{t,i,b}^{\text{max}} \cdot g_{i,b}^{\text{max}} - \\ & - \sum_{s \in \Omega^S} \sum_{c \in \Omega^C} \sigma_{t,s,c}^{\text{max}} \cdot d_{t,s,c}^{\text{max}} - \sum_{h \in \Omega^H} (\phi_{t,h}^{\text{dmax}} \cdot dis_h^{\text{max}} - \phi_{t,h}^{\text{cmax}} \cdot ch_h^{\text{max}}) - \\ & \sum_{w \in \Omega^W} \eta^{\text{max}} \cdot k^{\text{max}} - \sum_{s \in \Omega^S} (\pi \cdot \mu_{t,s}^{\text{min}} + \pi \cdot \mu_{t,s}^{\text{max}}) + \sum_{s \in \Omega^S} \sum_{c \in \Omega^C} \lambda_{s,c}^D \cdot d_{t,s,c} - \sum_{i \in \Omega^I} \sum_{b \in \Omega^B} \lambda_{i,b}^G \cdot g_{t,i,b} \quad (45) \end{aligned}$$

Uvjeti komplementarnosti lineariziraju se korištenjem dobro poznatih izraza iz [22].

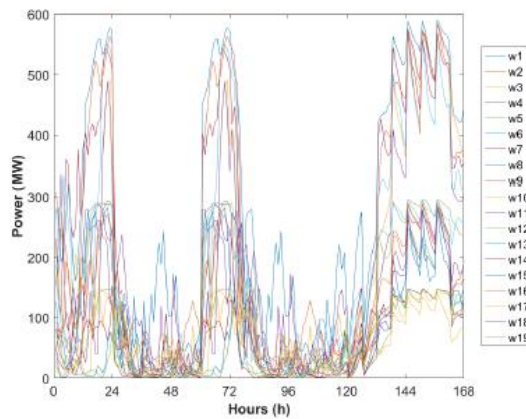
Konačni problem:

$$\begin{aligned} & \max \sum_{s \in \Omega^S} \sum_{c \in \Omega^C} \lambda_{s,c}^D \cdot d_{t,s,c} - \sum_{i \in \Omega^I} \sum_{b \in \Omega^B} \lambda_{i,b}^G \cdot g_{t,i,b} - \sum_{l \in \Omega^L} (\beta_{t,l}^{\text{min}} \cdot pf_l^{\text{max}} + \beta_{t,l}^{\text{min}} \cdot pf_l^{\text{max}}) - \\ & - \sum_{i \in \Omega^I} \sum_{b \in \Omega^B} \gamma_{t,i,b}^{\text{max}} \cdot g_{i,b}^{\text{max}} - \sum_{s \in \Omega^S} \sum_{c \in \Omega^C} \sigma_{t,s,c}^{\text{max}} \cdot d_{t,s,c}^{\text{max}} - \sum_{h \in \Omega^H} (\phi_{t,h}^{\text{dmax}} \cdot dis_h^{\text{max}} + \phi_{t,h}^{\text{cmax}} \cdot ch_h^{\text{max}}) - \\ & - \sum_{w \in \Omega^W} \eta^{\text{max}} \cdot k^{\text{max}} - \sum_{s \in \Omega^S} (\pi \cdot \mu_{t,s}^{\text{min}} + \pi \cdot \mu_{t,s}^{\text{max}}) \quad (46) \end{aligned}$$

Ograničen s (18)-(27) i (28)-(41).

### 3. PRIMJENA MODELA

Predloženi model testiran je na IEEE RTS-96 sustavu koji je nadopunjen s 19 vjetroelektrana čiju proizvodnju kroz reprezentativni tjedan prikazuje Slika 1. Svi testni podatci dostupni su na [23]. Tri baterijska spremnika nalaze se na sabirnicama 106, 117 i 220.



Slika 1. Proizvodnja vjetroelektrana u reprezentativnom tjednu

### 3.1. Utjecaj duljine optimizacijskog vremenskog perioda

Vrlo važan detalj pri optimizaciji baterijskog spremnika koji sudjeluje na tržištu je vremenski period za koji se optimizira njegov rad. Analizirana je dostatnost gledanja samo jednog dana unaprijed, odnosno koliko gledanje više od jednog dana unaprijed doprinosi profitu spremnika.

Analiziran je spremnik kapaciteta 250 MWh koji se nalazi na sabirnici 117. Tablica 1 uspoređuje vrijednosti profita gledanjem jednog dana unaprijed, dva dana unaprijed i tjedan dana unaprijed. Rezultati pokazuju gubitak profita pri korištenju gledanju jedan dan unaprijed od 32% u usporedbi s tjednom računicom. S druge strane, gledanje dva dana unaprijed pokazuje slično ponašanje tjednom.

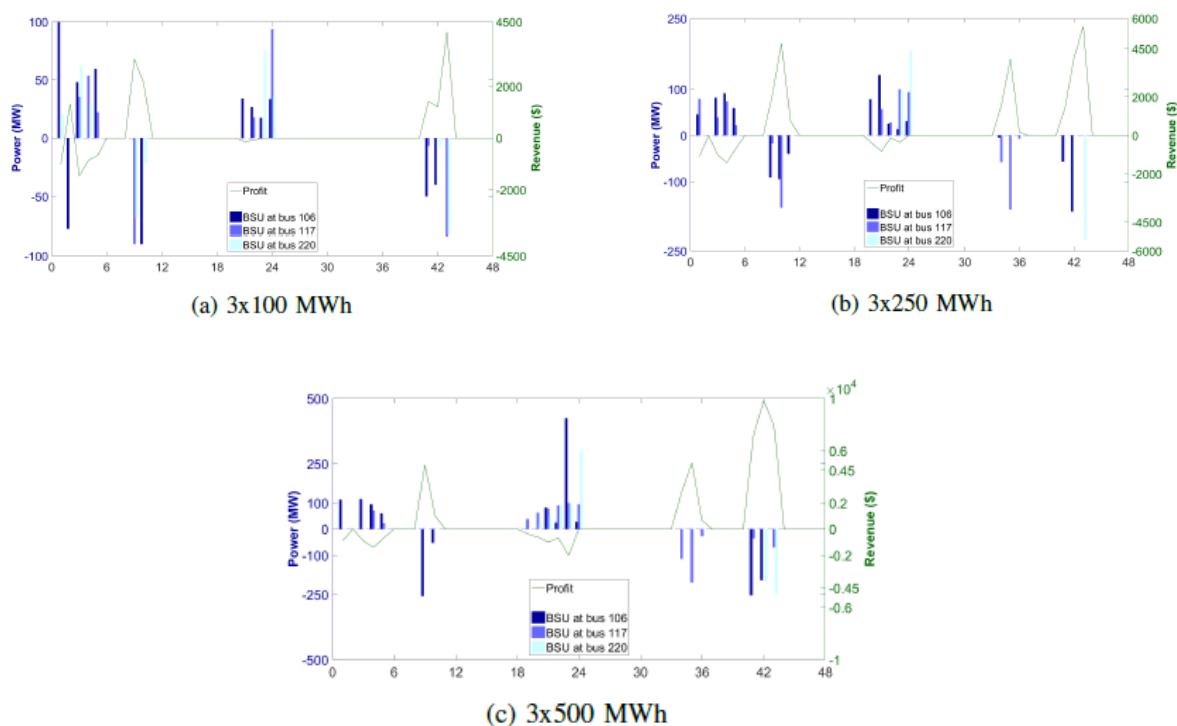
Dulji vremenski periodi promatranja dozvoljavaju spremniku iskorištavanje eventualnih niskih cijena pri kraju dana kako bi napunjen dočekao idući dan te iskoristio eventualne visoke cijene. Kako je teško predviđati dulje vremenske periode unaprijed, dvodnevno gledanje unaprijed predstavlja dobar balans između neizvjesnosti budućnosti i optimalne strategije spremnika.

Tablica 1. Ovisnost prihoda spremnika o vremenu predviđanja

| Dan         | Gledanje jedan dan unaprijed | Gledanje dva dana unaprijed | Gledanje jedan tjedan unaprijed |
|-------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Prvi dan    | 1266 €                       | 1209 €                      | 1209 €                          |
| Drugi dan   | 680 €                        | 5619 €                      | 5619 €                          |
| Treći dan   | 470 €                        | 470 €                       | 470 €                           |
| Četvrti dan | 5567 €                       | 5567 €                      | 5567 €                          |
| Peti dan    | 486 €                        | 481 €                       | 482 €                           |
| Šesti dan   | 486 €                        | 587 €                       | 597 €                           |
| Sedmi dan   | 1644 €                       | 1642 €                      | 1642 €                          |
| Ukupno      | 10600 €                      | 15576 €                     | 15587 €                         |

### 3.2. Utjecaj kapaciteta spremnika na prihode

prikazuje strategiju i profit distribuiranih spremnika energije spojenih na sabirnice 106, 117 i 220 za različite kapacitete: 100, 250 i 500 MWh.



Slika 2. Strategija i prihod spremnika električne energije na tržištu

Najveća aktivnost primjećuje se kod spremnika na sabirnici 117. Pri 100MWh-nom slučaju (Slika 2a), spremnik puni 319 MWh kroz 48 sati dok ostali pune po 222 MWh. U 250MWh-nom slučaju (Slika 2b) spremnik na sabirnici 117 puni 556 MWh, spremnik na sabirnici 106 puni 492 MWh te spremnik na sabirnici 220 samo 278 MWh. Konačno, u 500MWh-nom slučaju (Slika 2c) spremnik na sabirnici 117 puni se 936 MWh dok ostala dva pune po 556 MWh. Ukupni prihod, ovisno o kapacitetu iznosi 9 019 €, 18 418 € i 30 772 €.

Tablica 2 pokazuje udio svakog spremnika u ukupnom profitu. Najviše doprinosi spremnik na sabirnici 117 koji je najaktivniji spremnik gledajući količinu punjenja/praznjenja tijekom 48 sati.

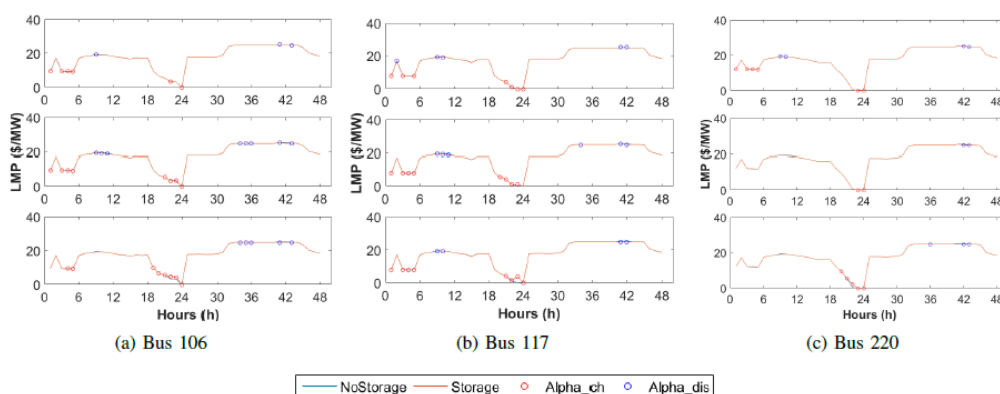
Tablica II. Udio pojedinog spremnika u ukupnom prihodu

| Dan                       | 100 MW       | 250 MW       | 500 MW        |
|---------------------------|--------------|--------------|---------------|
| Spremnik na sabirnici 106 | 2871 € (32%) | 6124 € (33%) | 8229 € (27%)  |
| Spremnik na sabirnici 117 | 3526 € (39%) | 6726 € (37%) | 12089 € (39%) |
| Spremnik na sabirnici 220 | 2622 € (29%) | 5568 € (30%) | 10453 € (34%) |
| Ukupno                    | 9019 €       | 18418 €      | 30772 €       |

### 3.2. Analiza strategije nudića

Prilikom punjenja, spremnik se ponaša kao teret u sustavu i posljedično bi mogao dignuti cijene u sustavu. Također, prilikom pražnjenja, spremnik se ponaša kao proizvodna jedinica i ima mogućnost smanjiti cijene u sustavu što utječe na smanjenje profita. Stoga, ponudbene cijene spremnika, varijable  $\alpha_{t,h}^{dis}$  i  $\alpha_{t,h}^{ch}$  u najvećem se dijelu ponašaju kao i očekivane čvorišne cijene.

Baterijski spremnici nude takvu količinu energije po cijeni koja neće utjecati na cijene u sustavu te time smanjiti njihov očekivani profit. Slika 3 prikazuje strategiju distribuiranih baterijskih spremnika gdje su ponude za punjenje označene crvenim kružićima, a ponude za pražnjenje plavim kružićima. Spremnici se pune do šestog sata pri niskom trošku. Mali skok u cijeni u drugom satu dovoljan je 100 MWh-nom spremniku na sabirnici 117 da isprazni 75 MWh spremljene energije (Slika 2a). S druge strane, spremnik na sabirnici 220 puni se ujutro samo u 100MWh-nom slučaju. Tijekom prvog dana cijene su najviše ujutro, između 9 i 11 sati kad se spremnici prazne. Očekivana vršna potrošnja u večernjim satima smanjena je visokom proizvodnjom iz vjetroelektrana (Slika 1). Cijene pri kraju dana blizu nule su zbog čega se spremnici pune. Spremnici na sabirnici 117 u 500MWh-nom slučaju podiže cijenu na 4€/MWh kako bi se napunio na 450MWh što je najveći uočeni utjecaj spremnika na cijene u sustavu. Ova spremljena energija se djelomično troši tijekom jutarnjih sati (sati 33-36), ali uglavnom za vrijeme vršne potrošnje kad su najviše cijene u drugom danu.



Slika 3. Strategija nastupa spremnika na tržištu



#### 4. ZAKLJUČAK

Ovaj rad istražuje mogućnosti maksimizacije profita spremnika električne energije koji sudjeluje na tržištu korištenjem matematičkog problema s ravnotežnim ograničenjima.

Kako bi sačuvali napunjenost za iskorištavanje viših cijena sustava za pražnjenje spremnici električne energije trebali bi proširiti svoj optimizacijski horizont predviđanja te gledati ishode dva dana unaprijed umjesto jedan dan.

Spremnici električne energije na tržištu će odabrati takvu strategiju koja će minimizirati utjecaj na cijene u sustavu. Iz tog razloga spremnik će se nekad puniti i u satima kad cijena nije najniža, kako bi se u satu u kojem je cijena najniža najviše napunio. Također, spremnik će nekad prazniti energiju i u satima u kojima je cijena niža kako ne bi spustio cijenu u satu s najvišom cijenom.

#### 5. ZAHVALA

Rad autora financirala je Hrvatska zaklada za znanost kroz projekt Flexible Energy Nodes in low-carbon Smart Grid FENISG (7766) te Hrvatska zaklada za znanost i Hrvatski operator prijenosnog sustava d.o.o. kroz projekt Smart Integration of RENewables - SIREN (I-2583-2015).

#### 6. LITERATURA

- [1] M. G. Rasmussen, G. B. Andersen, and M. Greiner, "Storage and Balancing Synergies in a Fully or Highly Renewable Pan-European Power System", *Energy Policy*, vol. 51, no. 2, pp. 642–651, 2012.
- [2] Dostupno na poveznici: [energinet.dk/EN/EI/Nyheder/Sider/Danskvindstroem-slaar-igen-rekord-42-procent.aspx](http://energinet.dk/EN/EI/Nyheder/Sider/Danskvindstroem-slaar-igen-rekord-42-procent.aspx)
- [3] International Energy Agency, "Energy Technology Perspectives 2016 – Towards Sustainable Urban Energy Systems."
- [4] Dostupno na poveznici: [www.mckinsey.com/insights/energy\\_resources/materials/battery-technology-charges-ahead](http://www.mckinsey.com/insights/energy_resources/materials/battery-technology-charges-ahead)
- [5] H. K. Nguyen, J. B. Song, and Z. Han, "Distributed Demand Side Management with Energy Storage in Smart Grid," *IEEE Trans. Parallel and Distributed Syst.*, vol. 26, no. 12, pp. 3346–2257, Dec. 2015.
- [6] Y. Yang, H. Li, A. Aichorn, J. Zheng, and M. Greenleaf, "Sizing Strategy of Distributed Battery Storage System With High Penetration of Photovoltaic for Voltage Regulation and Peak Load Shaving," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 982–991, March 2014.
- [7] T. Yau, L. N. Walker, H. L. Graham, A. Gupta, and R. Raithel, "Effects of Battery Storage Devices on Power System Dispatch," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Syst.*, vol. PAS 100, no. 1, pp. 375–383, Jan. 1981.
- [8] H. I. Su and A. E. Gamal, "Modeling and analysis of the role of fast response energy storage in the smart grid," in *Proc. 49th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton)*, Monticello, IL, pp. 719–726, Sep. 2011.
- [9] P. Denholm and R. Sioshansi, "The value of compressed air energy storage with wind in transmission-constrained electric power systems," *Energy Policy*, vol 37, no. 8, pp. 3149–3158, May 2009.
- [10] Dostupno na poveznici: [www.iaee.org/en/students/bestpapers/PedramMokrian.pdf](http://www.iaee.org/en/students/bestpapers/PedramMokrian.pdf)
- [11] Dostupno na poveznici: [energy.gov/sites/prod/files/2014/09/f18/Grid%20Energy%20Storage%20December%202013.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/2014/09/f18/Grid%20Energy%20Storage%20December%202013.pdf)
- [12] A. K. Varkani, A. Daraeepour and H. Monsef, "A new self-scheduling strategy for integrated operation of wind and pumped-storage power plants in power markets," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 12, pp. 5002–5012, Dec. 2011.
- [13] J. Garcia-Gonzalez, R. M. R. de la Muela, L. M. Santos i A. M. Gonzalez, "Stochastic joint optimization of wind generation and pumped storage units in an electricity market," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 2, pp. 460–468, May 2008.
- [14] H. Pandžić, I. Kuzle and T. Capuder, "Virtual power plant mid-term dispatch optimization," *Appl. Energy*, vol. 101, no. 1, pp. 134–141, Jan. 2013.
- [15] H. Akhavan-Hejazi and H. Mohsenian-Rad, "Optimal operation of independent storage systems in energy and reserve markets with high wind penetration," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 1088–1097, March 2014.

- [16] S. Wogrin, D. Galbally and J. Reneses, "Optimizing Storage Operations in Medium- and Long-Term Power System Models," IEEE Trans. Power Syst., vol. 31, no. 4, pp. 3129–3138, Sept. 2015.
- [17] K. Hartwig and I. Kockar, "Impact of Strategic Behavior and Ownership of Energy Storage on Provision of Flexibility," IEEE Trans. Sust Energy., vol. 7, no. 2, pp. 744–754, April 2016.
- [18] H. Pandžić, Y. Wang, T. Qiu and D. Kirschen, "Near-Optimal Method for Siting and Sizing of Distributed Storage in a Transmission Network," IEEE Trans. Power Syst., vol 30, no. 5, pp. 2288–2300, Sept. 2015.
- [19] Dostupno na poveznici : [www.terna.it/engb/azienda/chisiamo/ternastorage.aspx](http://www.terna.it/engb/azienda/chisiamo/ternastorage.aspx)
- [20] C. Ruiz, A. J. Conejo, D. J. Bertsimas, "Revealing Rival Marginal Offer Prices Via Inverse Optimization," IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 3, pp. 3056–3064, Aug. 2013.
- [21] S. A. Gabriel, A. J. Conejo, J. D. Fuller, B. F. Hobbs, and C. Ruiz. Complementarity Modeling in Energy Markets, Springer, 2013.
- [22] J. Fortuny-Amat and B. McCarl, "A representation and economic interpretation of a two level programming problem" The Journal of Operational Research Society, vol. 32, no. 9, pp. 783–792, Sept. 1981.
- [23] Dostupno na poveznici : [www.ee.washington.edu/research/real/gamscode.html](http://www.ee.washington.edu/research/real/gamscode.html)