

Zora Luburić  
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
Sveučilište u Zagrebu  
zora.luburic@fer.hr

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

## INTEGRACIJA OBNOVLJIVIH IZVORA KORIŠTENJEM SPREMNIKA ENERGIJE I FACTS UREĐAJA

### SAŽETAK

Sve značajnijom integracijom obnovljivih izvora u elektroenergetski sustav javljaju se dodatni izazovi u planiranju i pogonu samog sustava. Zbog koncentriranih lokacija pogodnih za gradnju vjetroelektrana, poput Dalmacije u Hrvatskoj, koje su često udaljene od centara potrošnje električne energije, javlja se problem zagušenja prijenosnih vodova. Zbog relativno malene učestalosti zagušenja uslijed proizvodnje iz vjetroelektrana i sezonalnosti tokova snaga u Hrvatskoj, gradnja novih i povećanja kapaciteta postojećih prijenosnih vodova često nije ekonomična opcija. Povrh toga, gradnja dugačkih trasa vodova često rezultira pravnim problemima i dugotrajnim procesom gradnje. Preostale opcije su ugradnja FACTS uređaja i spremnika energije. FACTS uređaji utječu na tokove snaga te se njihovim korištenjem mogu opteretiti slabije opterećeni vodovi te rasteretiti opterećeni vodovi. Integracijom spremnika energije omogućuje se pohrana viška proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana te injekcija pohranjene energije u trenucima niskog opterećenja vodova, odnosno niske proizvodnje vjetroelektrana.

U radu će se obraditi mogućnosti korištenja distribuiranih spremnika energije u prijenosnoj mreži unutar postojećeg tržišnog okvira. Glavni cilj bit će evaluirati učinkovitost korištenja spremnika za različite primjene: arbitraža, primarna i sekundarna rezerva, odgoda investicija u vodove i sl. Također će se obraditi interakcija ugradnje spremnika energije i FACTS uređaja.

**Ključne riječi:** spremnik energije, FACTS uređaj, obnovljivi izvori energije

## INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES BY USING ENERGY STORAGE SYSTEMS AND FACTS DEVICES

### SUMMARY

With the more significant integration of renewable sources into the power system there are more challenges in the planning and operation of the system. Due to concentrated locations suitable for wind power plants such as Dalmatia in Croatia, that are often remoted from power consumption centres, there is a problem of congestion of transmission lines. However, the relative low incidence of congestion due to wind farm production and seasonality of power flows in Croatia, the construction of new and increasing capacity of existing transmission lines are often not an economical option. Additionally, construction of long lines usually results in legal problems and a long-lasting construction process. The remaining options are the installation of FACTS and energy storage devices. FACTS devices affect power currents, and by their use they can burden the weaker load lines and disburden the loaded lines. It is possible to store surplus power generation from the wind power plant and to inject energy during the low loaded lines or low wind power production by integrating energy storage into the power system.

The paper deals with the possibilities of using distributed energy storage in the transmission network within the existing market framework. The main goal will be to evaluate the efficiency of the use of energy storage for different applications: arbitrage, primary and secondary reserve, delay of investment in lines etc. Also, the interaction of the energy storage and FACTS device will be investigated.

**Key words:** energy storage system, FACT devices, renewable energy sources

## 1 UVOD

Proizvodnja iz obnovljivih izvora energije (OIE), posebno iz vjetro donosi nove zahtjeve u vođenju elektroenergetskog sustava za Operatore prijenosnih sustava, čija je uloga osigurati pouzdanost i sigurnost u prijenosnoj mreži EES-a. Integracija OIE primjerice vjetroelektrana (VE), izravno utječe na promjenjivost u proizvodnji unutar jednog dana, kao i na prostornu ovisnost izgradnje istih [1].

Prema posljednjim zaključcima konferencije o klimatskim promjenama (engl. The Conference of the Parties (COP 22)) mjere za potporu integracije obnovljivih izvora u EES se nastavljaju [2]. Ujedinjeno Kraljevstvo je već 2002. godine donijelo zakon o obveznoj integraciji obnovljivih izvora energije (engl. The Renewable Obligation (RO)) koji imaju prednost pred ostalim konvencionalnim elektranama [3]. U Njemačkoj sva proizvodnja iz OIE ima prednost na tržištu električne energije čak i onda kada se povećava nesigurnost u vođenju EES-a [4].

Odbacivanje proizvodnje iz obnovljivih izvora može značajno povećati troškove pogona EES-a i smanjiti iznos društvenog blagostanja (eng. Social welfare). Kako bi se izbjegle ove okolnosti i sve više postale prihvatljivije nove promjene u vođenju modernog EES-a, povećava se integracija spremnika energije (SE), dolazi do optimalnijeg pogona već izgrađenih vodova, potrošnja ima mogućnost odziva, veća potreba za pomoćnim uslugama i fleksibilnijim generatorima te povećanje prijenosnog kapaciteta mreže izgradnjom novih vodova.

Prijenosni vodovi su obično zagušeni u područjima gdje je povećana integracija OIE. Uobičajena rješenja ovog slučaja su gradnja novih prijenosnih vodova, što za nestalnu proizvodnju iz OIE ne daje konačno rješenje, budući da neiskorištenost vodova dovodi do povećanja napona u mreži u vremenu kada je mala proizvodnja iz OIE.

Razvojem tehnologije razvila su se nova rješenja ovog problema, kao što su FACTS uređaji i spremnici energije čija će se uloga i mogućnosti raznih primjena u sustavu predstaviti u dijelu ovog rada kao i njihov zajednički doprinos u elektroenergetskom sustavu. Cilj njihova rada je smanjiti troškove pogona sustava.

## 2 RAZVOJ PRIJENOSNE MREŽE I PRIMJENA SPREMNIKA ENERGIJE

Planiranje razvoja prijenosne mreže (PRPM) je problem pomoću kojeg se optimira najniži trošak integracije novih komponenti u EES-u, a na način da su postignuti zahtjevi sigurnosti [5]. U stvarnosti on je mješovito-cjelobrojni, ne-linearani i nekonveksni problem koji je prilično teško riješiti u optimizacijskim programima bez dodatnih metoda za linearizaciju. Problem PRPM-a se rješava na dva načina [6]: i) matematičkom optimizacijom i ii) heurističkim modelima.

Modeli mješovito-cjelobrojnog programiranja su u najvećem broju slučajeva DC tokovi snaga u kojima se gubici ne uzimaju u obzir. Jedna od novih tehnologija za razvoj u prijenosnoj mreži su veliki spremnici energije čiji je nazivni kapacitet kao i razvoj tehnologije zadnjih godina u stalnom porastu [7]. Njihova ugradnja može odgoditi ili čak zamijeniti investiciju u vodove prijenosne mreže. Autori u [8] determinističkim nelinearnim modelom PRPM-a modeliraju spremnike energije uzimajući u obzir gubitke koje su linearizirali po segmentima. Modelom su odredili optimalan kapacitet spremnika kao i njegovu lokaciju u mreži. Rezultati su pokazali kako SE donose manji trošak sustava kao i veću fleksibilnost prilikom planiranja razvoja mreže. Spremnici energije velikih snaga pružaju pomoć za vrijeme promjenjive proizvodnje iz OIE te omogućuju što jednostavnije upravljanje sustavom. Njihov trenutno ukupno instalirani kapacitet iznosi 190 GW [9]. Ukupan broj instaliranih i planiranih velikih baterijskih spremnika u svijetu je oko 3279 MW [10], pretežno u SAD-u, premda se taj broj povećava i u Europi. Spremnici energije u sustavu sudjeluju u upravljanju zagušenjima u mreži, izravnavanju dnevnog dijagrama opterećenja (arbitraža), pružaju pomoćne usluge kao što su: frekvencijska stabilnost (sekundarna i tercijarna rezerva), naponska stabilnost i crni start [11] te imaju mogućnost odgode investicije u dodatne vodove u mreži. U [12] istražene su karakteristike triju tehnologija velikih baterijskih spremnika energije na prijenosnoj mreži: 1) NaS baterije (engl. sodium-sulfur); 2) Vanadij redoks baterije (engl. Vanadium redox-flow – VRB) i 3) Li-ion baterije (engl. lithium-ion). Detaljan opis svih vrsta i karakteristika spremnika nalazi se u [13]. Njihove karakteristike su: visoka gustoća energije, relativno visoka učinkovitost, mali gubici samo-pražnjenja, mali troškovi održavanja.

U znanstvenoj i stručnoj literaturi pogon spremnika energije u EES-u najviše je istražena tema dok je određivanje njihovog razmještaja kao i kapaciteta nešto složeniji aspekt koji još uvijek nije istražen u potrebnoj mjeri. Tablica I prikazuje primjenu spremnika u tri različite relacije: proizvodnji, prijenosu i pomoć pri proizvodnji elektrana iz obnovljivih izvora. Sve ove primjene odnose se na sam pogon spremnika koji se u ovom radu i istražuje.

Tablica I Primjena spremnika energije u modernom EES-u

	Proizvodnja	Prijenos	OIE
Primjena u EES-u	Arbitraža	Zahtjevi sigurnosti (N-1 kriterij)	Pomoć uslijed pogreške u prognozi
	Rezerva	Regulacija napona	Pokrivanje vršne potrošnje
	Frekvencijska stabilnost: primarna, sekundarna, tercijarna	Otklanjanje zagušenja	
	Crni start	Odgoda investicije	

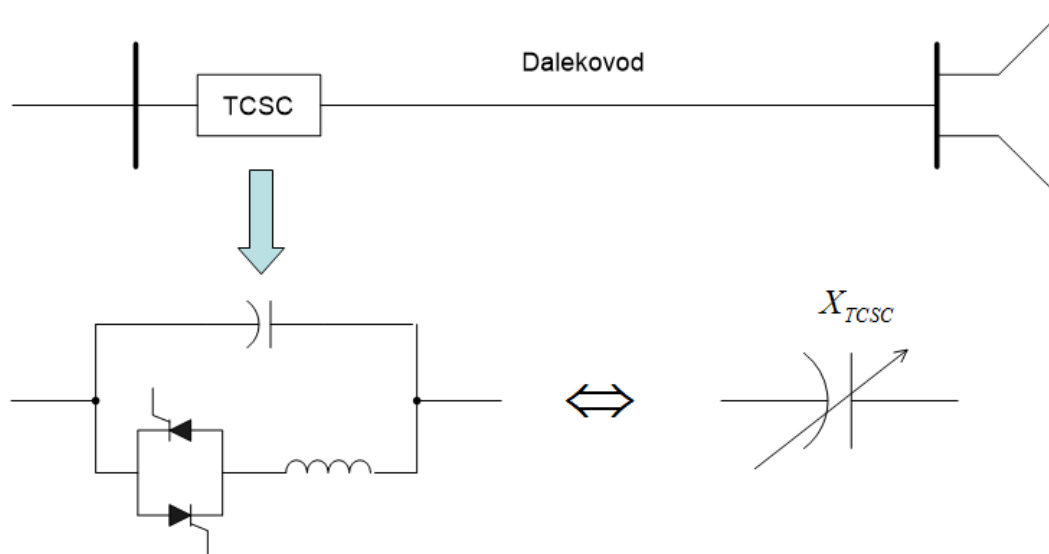
### 3 PRIMJENA FACTS UREĐAJA

U [14] - [16] opisan je značajan doprinos FACTS uređaja. Njihove glavne prednosti su: povećanje sigurnosti i dostupnosti prijenosne mreže te upravljanje zagušenjima u mreži. FACTS tehnologija zasnovana je na energetskej elektronici, odnosno na elektroničkim ventilima i tiristorima (GTO i IGBT). Vrijeme upravljanja je unutar nekoliko milisekundi, što znači da su u stanju kontinuirano upravljati karakterističnim varijablama sustava. Njihova ugradnja u već postojeća postrojenja iziskuje mnogo manje prostora u usporedbi s izgradnjom novog prijenosnog voda. Područje njihovog djelovanja je lokalnog karaktera. FACTS uređaji dijele se na tri skupine:

- Poprečni: SVC (engl. Static Var Compensator) i STATCOM (engl. Static Compensator)
- Serijski: SSSC (engl. Static Synchronous Series Compensator) i TCSC (engl. Thyristor Controlled Series Capacitors)
- Kombinirani: UPFC(engl. Unified Power Flow Controller).

Poprečni FACTS uređaji reguliraju iznos napona putem kontroliranog injektiranja jalove snage, dok serijski FACTS uređaji reguliraju tokove snaga pomoću injektiranog izvora napona u serijskom spoju s vodom. Kombinirani FACTS uređaji istodobno reguliraju iznos napona i tokove djelatne i jalove snage na vodu na kojem su priključeni [14]. Predmetom ovog članka u kategoriji FACTS uređaja je TCSC, prikazan Slikom 1. Princip njegova rada bazira se na povećanju razlike napona susjednih čvorišta pomoću kontinuirane promjene reaktancije pomoću tiristorskog kuta upravljanja (engl. firing angle).

Zajednički pogon FACTS uređaja i vjetroelektrana (VE) predstavljen je u [17] kako bih se smanjilo odbacivanje proizvodnje iz VE. Model je predstavljen u dvije faze: i) tržišna faza koja se sastoji od trgovanja dan unaprijed i trgovanja energijom uravnoteženja te ii) faza pogona koja uključuje nekoliko scenarija proizvodnje iz VE. Autori članka su naglasili mogućnost promjene kapaciteta TCSC-a u svakom scenariju kako bi se pronašlo optimalno rješenje. Autori u [18] su pokazali poboljšanje u prijenosu do 18.18 % uz instalaciju TCSC-a.



Slika 1. Model FACTS uređaja, tip TCSC

## 4 OPIS MODELA

U ovom poglavlju predstavljen je model spremnika energije i FACTS uređaja (tip TCSC-a), a čiji vlasnik bi bio Operator prijenosnog sustava. Funkcija (1) predstavlja funkciju cilja modela kojom se minimiziraju troškovi proizvodnje.  $C_i^{fx}$  su fiksni troškovi neke elektrane  $i$ ,  $C_i^{start}$  su troškovi pokretanja elektrane  $i$  ovisno o hladnom, toplom i vrućem startu generatora  $i$ ,  $mc_a$  su varijabilni troškovi neke elektrane  $i$  odnosno njeni marginalni troškovi. Funkcija cilja praćena je ograničenjima (2)–(19). Jednadžba (2) predstavlja ograničenje binarnih varijabli kojima se uvjetuje da je generator  $i$  u nekom trenutku  $t$  ušao u pogon,  $v_i(t)$  je 1, tada to također znači da je  $i$  u pogonu, odnosno  $u_i(t)$  je 1. Ukoliko je  $z_i(t)$  jednako 1, tada generator u trenutku  $t$  izlazi iz pogona. Ograničenje (3) predstavlja da generator ne može istovremeno ući i izaći iz pogona.

$$\text{Minimize } \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \left( C_i^{fx} \cdot u_i(t) + C_i^{start} \cdot v_i(t) + \sum_{a=1}^A mc_a \cdot p_i(t) \right) \quad (1)$$

uz ograničenja:

Logičke binarne varijable:

$$v_i(t) - z_i(t) = u_i(t) - u_i(t-1) \quad \forall i \in I, t \in T \quad (2)$$

$$v_i(t) + z_i(t) \leq 1 \quad \forall i \in I, t \in T \quad (3)$$

Jednadžba (4) označuje da u svakom čvorištu suma ulaznih i izlaznih snaga mora biti jednaka. Na lijevoj strani su iznosi proizvodnje generatora u čvorištima, snaga pražnjenja spremnika, izraz za tok snage ulaska i izlaska iz čvorišta, a na desnoj strani su iznosi potrošnje u čvorištu i ukupna snaga kojom se puni spremnik. Jednadžba (5) izračunava ukupni tok snage po vodu  $l$  u nekom trenutku  $t$  množeći iznos susceptancije voda  $l$  i razlike kutova u čvorištima  $b$  i  $n$  koja povezuju vod  $l$ . Susceptancija ( $sus_l$ ) za sve vodove na kojima

nema FACTS uređaja je fiksna te varijabilna ( $sus_{FACTS}(t)$ ) za vodove na kojima su instalirani FACTS uređaji, predstavljena ograničenjem (6). Ukoliko je razlika kutova veća od nule, nejednadžba (7) ograničava tok snage na vodovima na kojima je instaliran FACTS uređaj, kao i nejednadžba (8) za slučajeve kad je razlika kutova manja od nule. Pretpostavljamo da FACTS uređaji neće promijeniti smjer tokova snage ( $flow_{FACTS}(t)$ ) na glavnim dobavnim pravcima. Nejednadžbe (9)–(12) predstavljaju ograničenja na tokovima snaga na vodovima koristeći binarnu varijablu  $x_{FACTS}(t)$ . Binarna varijabla  $x_{FACTS}(t)$  je jednaka 1 ukoliko je pozitivna razlika kutova, a u suprotnom je nula. Zbog ove pretpostavke, model je potrebno proračunati bez FACTS uređaja, a zatim iz smjerova tokova snage na glavnim vodovima odrediti iznos binarne varijable, odnosno iz razlike kutova između čvorišta.

Ograničenja prijenosa:

$$\sum_{i=1}^I p_i(t) + \sum_{w=1}^W p_w(t) + \sum_{s=1}^S p_s^{dis}(t) - \sum_{l=1|b(l)}^{L^b} flow_l^-(t) + \sum_{l=1|n(l)}^{L^b} flow_l^+(t) = d_b(t) + \sum_{s=1}^S p_s^{ch}(t) \quad (4)$$

$$\forall b \in B, t \in T$$

$$flow_l^-(t) = sus_l \cdot (\vartheta_b(t) - \vartheta_n(t)) \quad \forall \{b, n\} \in \bar{L}, t \in T \quad (5)$$

$$sus_{FACTS}^{min} \leq sus_{FACTS}(t) \leq sus_{FACTS}^{max} \quad \forall l^{FACTS} \in L^{FACTS}, t \in T \quad (6)$$

$$\text{If } (\vartheta_b(t) - \vartheta_n(t)) \geq 0:$$

$$sus_{FACTS}^{min} \cdot (\vartheta_b(t) - \vartheta_n(t)) \leq flow_{FACTS}(t) \leq sus_{FACTS}^{max} \cdot (\vartheta_b(t) - \vartheta_n(t)) \quad (7)$$

$$\forall l^{FACTS} \in L^{FACTS}, t \in T$$

$$\text{If } (\vartheta_b(t) - \vartheta_n(t)) \leq 0:$$

$$\text{sus}_{\text{FACTS}}^{\max} \cdot (\mathcal{Q}_b(t) - \mathcal{Q}_n(t)) \leq \text{flow}_{\text{FACTS}}(t) \leq \text{sus}_{\text{FACTS}}^{\min} \cdot (\mathcal{Q}_b(t) - \mathcal{Q}_n(t)) \quad (8)$$

$$\forall \text{FACTS} \in \text{L}^{\text{FACTS}}, t \in \text{T}$$

$$\left( (1 - x_{\text{FACTS}}(t)) \cdot \text{sus}_{\text{FACTS}}^{\min} + x_{\text{FACTS}}(t) \cdot \text{sus}_{\text{FACTS}}^{\max} \right) \cdot (\mathcal{Q}_b(t) - \mathcal{Q}_n(t)) \geq \text{flow}_{\text{FACTS}}(t) \quad (9)$$

$$\forall \text{FACTS} \in \text{L}^{\text{FACTS}}, t \in \text{T}$$

$$\left( (1 - x_{\text{FACTS}}(t)) \cdot \text{sus}_{\text{FACTS}}^{\max} + x_{\text{FACTS}}(t) \cdot \text{sus}_{\text{FACTS}}^{\min} \right) \cdot (\mathcal{Q}_b(t) - \mathcal{Q}_n(t)) \leq \text{flow}_{\text{FACTS}}(t) \quad (10)$$

$$\forall \text{FACTS} \in \text{L}^{\text{FACTS}}$$

$$(1 - x_{\text{FACTS}}(t)) \cdot \mathcal{Q}_n(t) + x_{\text{FACTS}}(t) \cdot \mathcal{Q}_b(t) \geq (1 - x_{\text{FACTS}}(t)) \cdot \mathcal{Q}_b(t) + x_{\text{FACTS}}(t) \cdot \mathcal{Q}_n(t) \quad (11)$$

$$\forall \text{FACTS} \in \text{L}^{\text{FACTS}}, t \in \text{T}$$

$$x_{\text{FACTS}}(t) \in \{0, 1\} \quad (12)$$

Jednadžba (13) predstavlja iznos stanja napunjenosti  $\text{soc}_s(t)$  spremnika  $s$  u periodu  $t$ , kao zbroj prethodne napunjenosti u periodu  $(t-1)$  i iznosa punjenja u trenutku  $t$ , odnosno pražnjenja u periodu  $t$  pomnoženima  $s$  učinkovitošću punjenja/pražnjenja. Nejednadžba (14) ograničuje minimalnu i maksimalnu napunjenost spremnika u periodu  $t$ , dok (15)-(16) ograničavaju da snaga punjenja/pražnjenja može biti manja ili jednaka od maksimalne snage punjenja/pražnjenja. Nejednadžba (17) onemogućuje istovremeno punjenje i pražnjenje spremnika  $s$ . Na kraju (18) predstavlja sve ne-negativne varijable, a (19) varijable koju mogu biti i pozitivne i negativne.

Ograničenja spremnika energije:

$$\text{soc}_s(t) = \text{soc}_s(t-1) + p_s^{\text{ch}}(t) \cdot \eta_s^{\text{ch}} - \frac{p_s^{\text{dis}}(t)}{\eta_s^{\text{dis}}} \quad \forall s \in \text{S}, t \in \text{T} \quad (13)$$

$$\text{soc}_s^{\min} \leq \text{soc}_s(t) \leq \text{soc}_s^{\max} \quad \forall s \in \text{S}, t \in \text{T} \quad (14)$$

$$p_s^{\text{ch}}(t) \leq \text{ch}_s^{\max} \cdot x_s^{\text{ch}}(t) \quad \forall s \in \text{S}, t \in \text{T} \quad (15)$$

$$p_s^{\text{dis}}(t) \leq \text{dis}_s^{\max} \cdot x_s^{\text{dis}}(t) \quad \forall s \in \text{S}, t \in \text{T} \quad (16)$$

$$x_s^{\text{ch}}(t) + x_s^{\text{dis}}(t) \leq 1 \quad \forall s \in \text{S}, t \in \text{T} \quad (17)$$

$$p_s^{\text{ch}}(t), p_s^{\text{dis}}(t), p_{i,a}^g(t), p_w(t), \text{soc}_s(t) \geq 0 \quad \forall t \in \text{T} \quad (18)$$

$$\text{flow}_i(t), \mathcal{Q}_b(t) \text{ slobodne varijable} \quad \forall t \in \text{T} \quad (19)$$

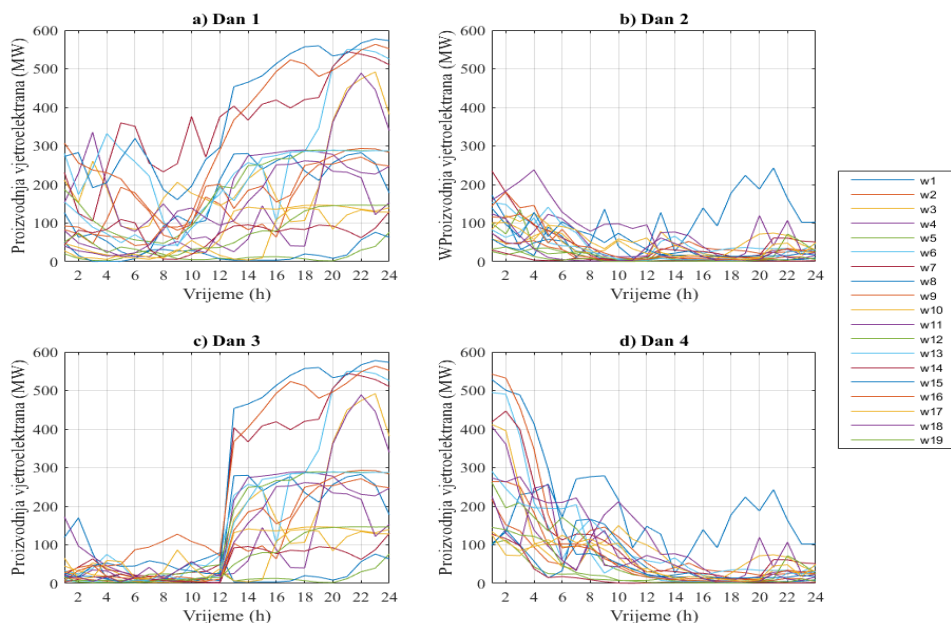
Preostale formule se nalaze u [19].

## 5 CASE STUDY

### 5.1 Opis

Model prikazan u prethodnim poglavlju simuliran je na IEEE RTS 96 modelu za ispitivanje. Model sadrži 19 vjetroparkova različitih kapaciteta 150 MW, 300 MW i 600 MW, a njihov ukupan iznos je 6 900 MW. Dva spremnika energije ukupnog kapaciteta po 150 MW instalirana su u čvorištima 120 i 202. Vrsta baterija je NaS, čije vrijeme punjenja iznosi do 8 sati, a vrijeme pražnjenja do 6 sati. Učinkovitosti punjenja i pražnjenja su 0.9. Vrsta FACTS uređaja je TCSC i instalirani su na tri voda: /39, /66, /119 te je pretpostavljeno kako je njihov kapacitet do 50 % iznosa susceptancije voda na kojem su instalirani. To znači da će se susceptancija voda na kojem postoji TCSC kretati u iznosu +/- 50 % početne fiksne susceptancije. Simulacije su provođene na temelju četiri različite dnevne krivulje proizvodnje vjetroelektrana predstavljene na Slici 2.

Rezultati su podijeljeni na četiri slučaja: a) kad nema spremnika energije ni FACTS uređaja u sustavu, b) kada su instalirani samo spremnici energije, c) kada su instalirani samo FACTS uređaji i d) kad su u sustavu i spremnici energije i FACTS uređaji. Potrošnja je u svim slučajevima fiksna i predstavlja dan s maksimalnom potrošnjom u sustavu, čiji je ukupni dnevni iznos 187,347 MWh.



Slika 2. Ukupna proizvodnja vjetroelektrana prema četiri reprezentativna dana

## 5.2 Rezultati

Rezultati predstavljeni u Tablici II, pokazuju koliki su troškovi sustava u svakom reprezentativnom danu te koliko je odbačeno energije iz vjetra zbog nastalih zagušenja u mreži. Kao što se može uočiti, dan 1 ima najniže troškove pogona u svim slučajevima zbog veće proizvodnje vjetroelektrana, oko 77,315 MWh (Tablica II, slučaj d). Varijabilni troškovi VE prilikom pogona su pretpostavljeni kao da ih nema. Najveće uštede se postižu u slučaju d u prvom danu, do 2 %, kada EES ima i spremnike energije i FACTS uređaje. Odmah iza slijedi treći dan s uštedama do 1.8 %. Glavni razlog ovoga je velika proizvodnja vjetroelektrana u drugom dijelu dana kada su i cijene značajno veće. Nadalje, uštede u trećem danu u slučaju b su 1.38 % te u slučaju d 1.8 %. Lako je primjetno kako u pojedinačnom pogonu spremnika energije i FACTS uređaja, veće uštede postižu upravo spremnici energije. Najveća odbačena energija vjetra je postignuta u danu 4 u iznosu od 1,293 MWh u slučaju d do očekivani 2,223 MWh u slučaju a. Manji iznosi odbačene energije vjetra su postignuti u danu 3 i 1. Međutim, ti iznosi su zanemarivi u danu 2 zbog male proizvodnje vjetroelektrana koja je većinom sva iskorištena. Glavni razlog za veću odbačenu energiju vjetra u četvrtom danu je velika proizvodnja vjetroelektrana za vrijeme noćnih sati i niske potražnje za električnom energijom.

Tablica II. Optimalni troškovi sustava i bačena energija iz vjetra

Slučaj		Dan 1	Dan 2	Dan 3	Dan 4
a	Troškovi (€)	1,946,296	3,365,550	2,394,968	3,051,922
	Odbačena energija iz vjetra (MWh)	857	4	889	2,223
b	Troškovi (€)	1,919,213	3,351,578	2,362,926	3,020,371
	Odbačena energija iz vjetra (MWh)	323	0	331	1,347
c	Troškovi (€)	1,932,642	3,364,737	2,381,124	3,050,230
	Odbačena energija iz vjetra (MWh)	389	0	390	1985
d	Troškovi (€)	1,907,548	3,351,856	2,350,976	3,019,579
	Odbačena energija iz vjetra (MWh)	181	0	182	1,293

U Tablici III može se uočiti negativna korelacija između proizvodnje generatora iz konvencionalnih izvora i proizvodnje iz vjetroelektrana. Najmanja proizvodnja iz VE je u drugom danu što utječe na najveću proizvodnju iz konvencionalnih izvora, kao npr. 169,614 MWh u slučaju b i d. Uvjet od 50 % napunjenosti spremnika energije na kraju dana utječe dodatno na ovu povećanu proizvodnju.

Tablica III Optimalna proizvodnja generatora iz konvencionalnih izvora i vjetroelektrana

Slučaj	Ukupno proizvedeno iz konvencionalnih TE i VE (MWh)				
		Dan 1	Dan 2	Dan 3	Dan 4
a	TE	110,708	169,392	128,441	452,469
	VE	76,639	17,955	58,906	34,878
b	TE	110,530	169,614	128,307	151,821
	VE	77,173	17,960	59,465	35,754
c	TE	110,241	169,388	127,941	152,231
	VE	77,107	17,959	59,406	35,116
d	TE	110,363	169,614	128,132	151,776
	VE	77,315	17,959	59,614	35,808

Tablice IV i V prikazuju broj konvencionalnih generatora koji su u pogonu u slučajevima a–d, zelena boja prikazuje smanjenje broja generatora u pogonu, a crvena prikazuje porast broja generatora u pogonu. Ukoliko je vjetrovit dan i to za vrijeme vršnih sati ima dosta proizvodnje iz vjetroelektrana, kao što je slučaj s prvim danom, broj konvencionalnih generatora se smanjuje. U slučajevima b (pogon uz spremnike energije) i d (kada su u pogonu i spremnici energije i FACTS uređaji), za vrijeme jutarnjih vršnih sati 8–12, broj generatora u pogonu se smanjio, što je doprinijelo manjim ukupnim troškovima pogona. To se ponovilo u poslijepodnevnim satima 14–21 u slučaju b te u satima 14–22 u slučaju d. Nekoliko puta je došlo do povećanja broja generatora u pogonu čiji je glavni razlog u slučajevima b i d punjenje spremnika u satima kada su niske cijene, a smanjena proizvodnja iz VE.

Tablica IV Broj konvencionalnih generatora u svim slučajevima 1 – 12 sata, Dan 1

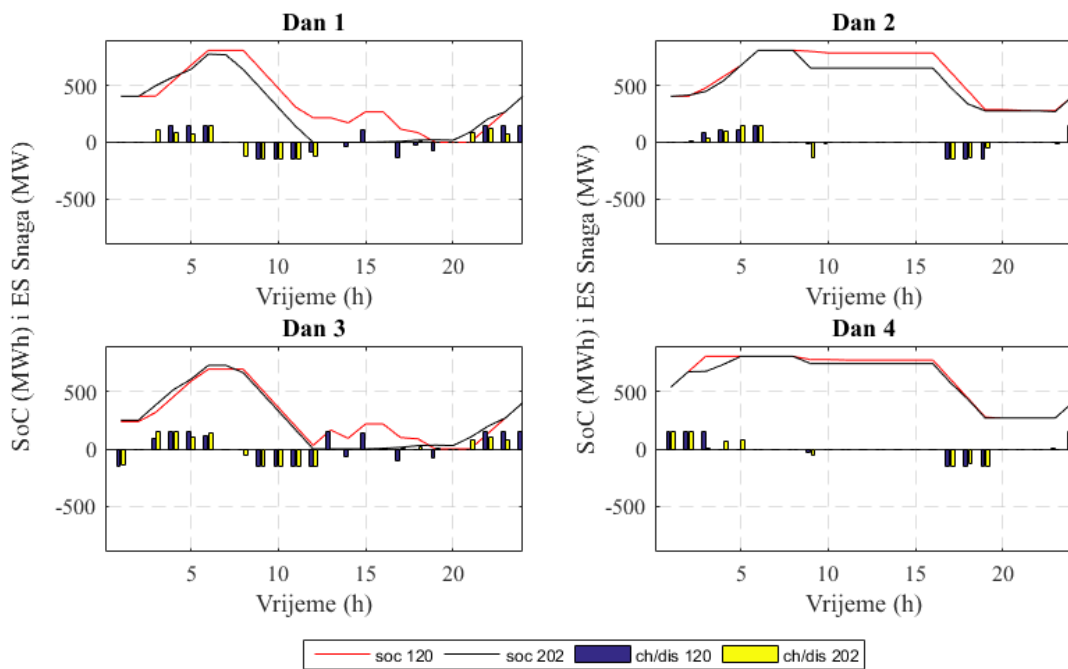
Slučaj	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h
a	30	30	28	27	21	24	40	45	47	45	44	40
b	30	30	27	21	22	28	40	43	45	43	43	37
c	30	30	28	27	21	24	40	45	47	45	45	39
d	30	30	26	21	23	28	40	43	45	43	43	37

Tablica V Broj konvencionalnih generatora u svim slučajevima 13 – 24 sata, Dan 1

Slučaj	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h	24h
a	40	34	31	26	28	29	28	28	21	16	11	10
b	35	30	26	27	27	27	27	20	15	11	10	6
c	34	29	25	26	27	26	24	19	14	11	10	4
d	34	28	25	25	26	25	24	19	13	10	10	6

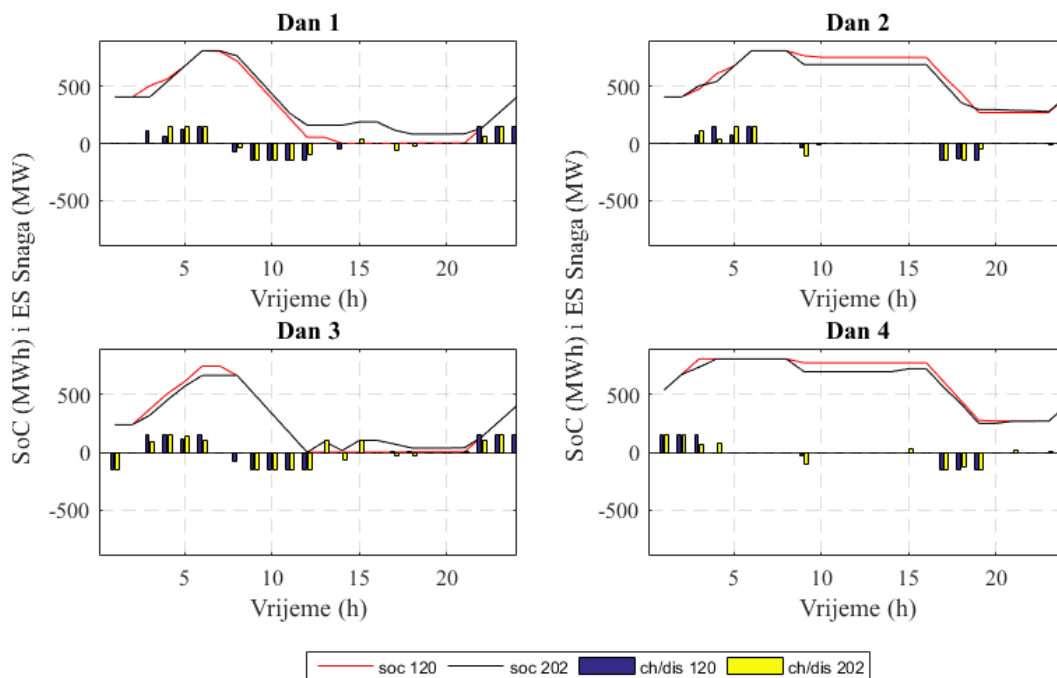
Slika 3 prikazuje punjenje i pražnjenje spremnika energije u čvorištima 120 i 202 kroz četiri reprezentativna dana. Sličnosti ponašanja spremnika može se podijeliti u dvije skupine po dva dana, dan 1 i 3 te dan 2 i 4. Razlog tomu su slične krivulje proizvodnje iz vjetroelektrana budući da se spremnici nalaze na lokacijama blizu velikih vjetroparkova. Također, lako je uočiti kako iznosi punjenja i pražnjenja spremnika ovise o proizvodnji VE tijekom dana. Tako u ranim jutarnjim satima tijekom noći (obično od 3–6 sati) dolazi do punjenja spremnika, osim u danu 3 kada se u prvom satu spremnik prazni. U danu 1 spremnik je pun do svog mogućeg maksimalnog stanja napunjenosti 810 MWh u čvorištu 120 te 770 MWh u čvorištu 202. Moguće maksimalno stanje napunjenosti je manje zbog učinkovitosti punjenja odnosno pražnjenja od 0.9. Za vrijeme vršnih dnevnih sati 8–12, spremnici se prazne, u čvorištu 202 potpuno, dok u čvorištu 120 spremnik nastavlja sa svojim punjenjem i pražnjenjem do 19 sati.

Budući da su prošli vršni sati, spremnici se pune do svojih 50 % ukupnog stanja napunjenosti (SoC) prema ograničenju iz modela. Međutim, zbog značajno niske proizvodnje iz VE u drugom danu, niti jedan spremnik nema puni ciklus punjenja/pražnjenja tj. spremnik se niti jednom ne isprazni. Spremnici se pune u ranim jutarnjim satima te se prazne u poslijepodnevnim vršnim satima 17–19 sati do polovine njihovog kapaciteta. Dan 3 se neznatno razlikuje od dana 1, s pražnjenjem u prvom satu te pražnjenjem većih količina energije u satima 13 i 15 u čvorištu 120. Slično je tako dan 4 usporediv s danom 2 s jednom razlikom u punjenju u prvom satu.



Slika 3 Punjenje i pražnjenje spremnika energije u slučaju b

Slika 4 prikazuje slučaj d u kojem su u pogonu istovremeno i spremnici energije i FACTS uređaji. Ponašanje spremnika je jako slično slučaju b, no glavna razlika je u iznosima punjenja/pražnjenja spremnika, primjerice u prvom i trećem danu za spremnik u čvorištu 202. Razlog tomu je što je TCSC instaliran na vodu /39 jako blizu lokacije ovog spremnika te omogućuje veće snage punjenja i pražnjenja, npr. u satima 13–15.



Slika 4 Punjenje i pražnjenje spremnika energije u slučaju d



## 6 ZAKLJUČAK

Moderni elektroenergetski sustavi teže sve većem udjelu obnovljivih izvora energije u proizvodnji. Otežavajuće okolnosti koje proizlaze iz toga su nemogućnost preciznog određivanja iznosa njihove proizvodnje kao i to da su lokacije ovih elektrana često daleko od velikih centara potrošnje. Prijenos električne energije u periodima velike proizvodnje često uzrokuje zagušenja u mreži. Na taj način dolazi do pojave šireg raspona nesigurnosti kao i dodatnih izazova u samom vođenju sustava. Spremnici energije i FACTS uređaji jedan su od načina pomoći pri ovakvim prilikama. Glavno obilježje FACTS uređaja je otklanjanje zagušenja u mreži. Karakteristike spremnika energije omogućuju pružanje pomoćnih usluga, izravnavanje dnevnih dijagrama potrošnje i odgodu investicija u mreži. Ovim radom je pokazano kako spremnici energije i FACTS uređaji pozitivno doprinose smanjenju ukupnih troškova sustava budući da omogućuju veći plasman proizvodnje iz OIE.

## 7 ZAHVALA

Rad autora sufinancirali su Hrvatska zaklada za znanost i Hrvatski operator prijenosnog sustava d.o.o. kroz projekt Smart Integration of RENewables - SIREN (I-2583-2015).

## 8 NOMENKLATURA

### 8.1.1 Skupovi

$a \in A$	Segmenti krivulje troškova generatora $i$
$b \in B$	Čvorišta u mreži
$i \in I$	Konvencionalni generatori
$l \in L$	Svi vodovi
$l^{\text{FACTS}} \in L^{\text{FACTS}}$	Prijenosni vodovi $l^{\text{FACTS}}$ s FACTS uređajima
$\bar{l} \in \bar{L}$	Prijenosni vodovi $\bar{l}$ bez FACTS uređaja
$s \in S$	Spremnici energije
$t \in T$	Vremenska razdoblja, $t = 1 \text{ h}$
$w \in W$	Vjetroelektrane

### 8.1.2 Parametri

$C_i^{\text{fx}}$	Fiksni troškovi generatora $i \in I$
$C_i^{\text{start}}$	Troškovi pokretanja generatora $i \in I$
$ch_s^{\text{max}}$	Maksimalna snaga punjenja spremnika $s \in S$
$dis_s^{\text{max}}$	Maksimalna snaga pražnjenja spremnika $s \in S$
$mc_a$	Marginalni troškovi generatorske krivulje troškova $a \in A$ (€/MWh)
$sus_{\text{FACTS}}^{\text{max}}$	Maksimalna susceptancija voda $l^{\text{FACTS}}$ s FACTS uređajima
$sus_{\text{FACTS}}^{\text{min}}$	Minimalna susceptancija voda $l^{\text{FACTS}}$ s FACTS uređajima
$sus_{\bar{l}}$	Susceptancija voda $\bar{l}$ bez FACTS uređaja
$soc_s^{\text{max}}$	Maksimalno stanje napunjenosti spremnika $s \in S$
$soc_s^{\text{min}}$	Minimalno stanje napunjenosti spremnika $s \in S$
$\eta_s^{\text{ch}}$	Efikasnost punjenja spremnika $s \in S$ (-)
$\eta_s^{\text{dis}}$	Efikasnost pražnjenja spremnika $s \in S$ (-)

### 8.1.3 Varijable

$d_b(t)$	Potražnja u čvorištu $b \in B$ u razdoblju $t \in T$
$flow_l(t)$	Tok snage na vodu $l \in L$ u razdoblju $t \in T$
$flow_{\bar{l}}(t)$	Tok snage na vodu $\bar{l} \in \bar{L}$ u razdoblju $t \in T$
$flow_{l^{\text{FACTS}}}(t)$	Tok snage na vodu line $l^{\text{FACTS}} \in L^{\text{FACTS}}$ u razdoblju $t \in T$

$p_s^{ch}(t)$	Snaga punjenja spremnika $s \in S$ u razdoblju $t \in T$
$p_s^{dis}(t)$	Snaga pražnjenja spremnika $s \in S$ u razdoblju $t \in T$
$p_i(t)$	Proizvodnja generatora $i \in I$ u razdoblju $t \in T$
$p_{i,a}(t)$	Proizvodnja generatora $i \in I$ na segmentu krivulje troškova $a \in A$
$p_w(t)$	Proizvodnja vjetroelektrana $w \in W$ u razdoblju $t \in T$
$soc_s(t)$	Stanje napunjenosti spremnika $s \in S$ u razdoblju $t \in T$
$sus_{FACTS}(t)$	Susceptancija voda s FACTS uređajem u razdoblju $t \in T$
$g_b(t)$	Kut u čvorištu $b \in B$ u razdoblju $t \in T$

#### 8.1.4 Binarne varijable

$x_s^{ch}(t)$	Označava razdoblje $t \in T$ punjenja spremnika $s \in S$
$x_s^{dis}(t)$	Označava razdoblje $t \in T$ pražnjenja spremnika $s \in S$
$x_{FACTS}$	Označava razliku kutova na vodu s FACTS uređajem; 1 pozitivna, 0 negativna

## 9 LITERATURA

- [1] International Electrical Commission (IEC), "Grid integration of large-capacity Renewable Energy sources and use of large-capacity Electrical Energy Storage", Geneva, Switzerland, 2012.
- [2] CarbonBrief, dostupno na poveznici: <https://www.carbonbrief.org/cop22-key-outcomes-agreed-at-un-climate-talks-in-marrakech>
- [3] G. G. Grimwood and E. Ares, "Energy: The Renewables Obligation", *House of Commons Library*, July 2016.
- [4] Legal sources on renewable energy, dostupno na: <http://www.res-legal.eu/search-by-country/germany/summary/c/germany/s/res-e/sum/136/lpid/135/>
- [5] N. Alguacil, A.L. Motto, A.J. Conejo, "Transmission expansion planning: a mixed-integer LP approach", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 3, pp. 1070–1077., August 2003.
- [6] G. Latorre, R.D. Cruz, J.M. Areiza, A. Villegas, "Classification of publications and models on transmission expansion planning", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 2, pp. 938–946., May 2003.
- [7] H. Chen, T.N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Ding, "Progress in electrical energy storage system: a critical review", *Prog. Nat. Sci.*, vol. 19, no. 3, pp. 291–312., March 2009.
- [8] F. Zhang, Z. Hu, Y. Song, "Mixed-integer linear model for transmission expansion planning with line losses and energy storage systems", *IET Generation Trans. and Distr.*, vol. 7, no. 8, pp. 919 - 928., April 2013.
- [9] Energy storage. Dostupno na: <http://energystorage.org>
- [10] Dostupno na: <http://www.energystorageexchange.org>
- [11] K. Bradbury, "Energy storage technology review", Technical report, 2010
- [12] S. O. Geurin, A. K. Barnes, J. C. Balda, "Smart grid applications of selected energy storage technologies", *IEEE PES, Conference Publications*, pp. 1-8., 2012.
- [13] Z. Luburić, H. Bašić, H. Pandžić, T. Plavšić, "Uloga spremnika energije u elektroenergetskom sustavu", *Cigre 2016.*, pp. 1-10., Studeni 2016.
- [14] N. G. Hingorani, L. Gyugyi, "Understanding FACTS concepts and technology of flexible AC transmission systems", New York: IEEE Press, 2000.
- [15] R. M. Mathur, R. K. Varma, "Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems", Piscataway, IEEE Press, 2002.
- [16] Y.-H. Song, "Flexible ac transmission systems (FACTS)", London: The Institution of Electrical Engineers, pp. 1-4., 1999.
- [17] Nasri, A., Conejo A. J., Kazempour, S. J. and Ghandhari, M., "Minimizing Wind Power Spillage Using an OPF With FACTS Devices", *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol 29., No. 5, pp 2150-2159, September 2014
- [18] Dev Choudhury, N. B., and Jena, R., "Available Transfer Capability Enhancement in Constrained Network Conditions Using TCSC", *International Conference on Advances in Engineering & Technology Research (ICAETR)*, pp 1-7, 2014
- [19] Z. Luburić, H. Pandžić, T. Plavšić. "Assessment of Energy Storage Operation in Vertically Integrated Utility and Electricity Market", *Energies* 10, no. 5: 683., Svibanj 2017.