

Ninoslav Holjevac  
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
ninoslav.holjevac@fer.hr

doc. dr. sc. Tomislav Capuder  
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
tomislav.capuder@fer.hr

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

## KOREKCIJSKO PLANIRANJE KRATKOROČNOG OPTIMALNOG POGONA JEDINICA S POMIČNIM HORIZONTOM FLEKSIBILNIH VIŠE-ENERGIJSKIH MIKROMREŽA

### SAŽETAK

Agregiranje grupa potrošača različitih energetskektora te različitih proizvodnih jedinica na jednome mjestu pomoću centralnog upravljanja naziva se konceptom više-energijskih mikromreža. No, ako je slučaj da ovi potencijalno fleksibilni potrošači i proizvođači nemaju mogućnost balansiranja varijabilnosti i neizvjesnosti proizvodnje iz obnovljivih izvora energije ili su neprikladno dimenzionirani, onda će, od strane ostatka sustava, biti razmatrani kao izvor promjena u održavanju ravnoteže između proizvodnje i potrošnje. Ovaj referat ima cilj kvantificirati utjecaj različitih energetskektora na fleksibilnost pogona, utjecaj konfiguracije više-energijske mikromreže te procijeniti utjecaj korištenja različitih koncepata modeliranja na indikatore fleksibilnosti. Rad će predstaviti optimizacijski model proširen s korektivnim upravljanjem temeljen na pristupu pomičnog horizonta kako bi se prikazao utjecaj povezivanja više energetskektora, njihovo optimalno upravljanje te potencijal fleksibilnog pogona u niskougljičnom elektroenergetskom sustavu.

**ključne riječi:** više-energijski sustavi, mikromreže, fleksibilnost

## CORRECTIVE RECEDING HORIZON SCHEDULING OF FLEXIBLE DISTRIBUTED MULTI-ENERGY MICROGRIDS

### SUMMARY

Aggregating groups of consumers of different energy vectors and generating units at the same location with centralized control is known as the concept of multi-energy microgrid (MEM). However, if those potentially flexible producers and consumers do not have the ability to balance the intermittent production of renewable energy sources within them, from the system perspective, they are seen as a source of imbalances and potential problems in maintaining the equilibrium of production and consumption. This paper has the main goal to quantify the ability of MEM components to provide flexibility, to quantify the impact different energy vectors have on overall flexibility and to estimate what effect the configuration of MEM and modelling concepts have on flexibility indicators. The paper will present an optimization model expanded with corrective receding horizon scheduling approach in order to capture the value of integrating multiple energy vectors, its optimal operation and flexibility potential for low carbon energy system.

**Key words:** multi-energy systems, microgrids, flexibility

## 1. UVOD

Integracija obnovljivih izvora energije je u današnje vrijeme u velikoj mjeri podržana različitim poticajnim mjerama i općeniti je cilj Europske unije povećati udio proizvodnje uz nultu razinu emisija [1], [2]. Međutim, pasivna integracija obnovljivih izvora blizu potrošačima može dovesti do značajno prevelikih iznosa investicija zbog zahtijeva za pojačanjima u distribucijskoj mreži [3]. Dodatno, cilj potpuno obnovljivog elektroenergetskog sustava treba sagledati i iz aspekta najnovijih strateških ciljeva Europe koji između ostalog kažu da se barem 50% proizvodnje energije treba nalaziti u rukama finalnih potrošača [4]. To ujedno i znači da će značajna količina pogonske fleksibilnosti koja smanjuje utjecaj problema integracije obnovljivih izvora upravo dolaziti iz smjera distribucijske mreže kroz integraciju tehnologija koje su sposobne djelovati sukladno različitim cjenovnim signalima. Procjena potencijalnih koristi fleksibilnosti pogona različitih tehnologija u razini distribucijskog sustava i mjesnih zajednica predstavlja vrijedan iskorak prema uspješnoj integraciji obnovljivih izvora energije koja će upotpunjavati niskouglične tehnologije korištene na višoj, prijenosnoj, razini [5].

Mikromreža je definirana kao skup potrošača, distribuirane proizvodnje i spremnika energije čije koordinirano upravljanje ima cilj postizanja pouzdane opskrbe energijom finalnih potrošača te poštivanje razmjena unaprijed najavljenih količina energije s ostatkom distribucijskog sustava preko susretnog mjesta priključka [6]. Planiranje pogona mikromreža podložno je greškama proizašlim iz nesavršene prognoze proizvodnje lokalnih obnovljivih izvora energije ili potrošnje. Ako su ti izvori neravnoteže kompenzirani na lokalnoj razini mikromreže onda se ta mikromreža može smatrati fleksibilnim čvorištem sposobnim pružati različite usluge fleksibilnosti ostatku sustava [7]. Agregiranje potrošača različitih energetskektorskih vektora (električna energija, toplinska energija, energija za hlađenje, plin) sa distribuiranim više-energijskim izvorima i spremnicima energije pomoću centralnog upravljanja je glavna prednost više-energijskih sustava i mikromreža koja je još uvijek nedovoljno istražena.

Dodatno, fleksibilnost elektroenergetskog sustava postaje ključna karakteristika u pronalasku odgovora na rastući udio promjenjive proizvodnje. Tehnički gledano, fleksibilnost se može definirati kao mogućnost odgovora na promjene u ravnoteži između proizvodnje i potrošnje [8]. Ekonomski gledano, fleksibilnost se može definirati kao mogućnost brzog prilagođavanja pojedinog tržišnog subjekta brzog prilagođavanja najrecentnijim uvjetima na tržištu i poštivanja najavljenog plana razmjena [9]. Svi elektroenergetski sustavi inherentno imaju ugrađenu određenu dozu fleksibilnosti koja s povećanjem nepredvidive i varijabilne proizvodnje iz obnovljivih izvora energije prestaje zadovoljava u potpunosti. Nedostatak fleksibilnosti se može manifestirati kao odstupanja frekvencije koja mogu dovesti do neuspjele isporuke energije, odstupanja od najavljenih planova razmjene, propuštanja proizvodnje energije iz vjetrova, povećane volatilnosti cijena itd. Trenutni zahtjevi za fleksibilnošću uglavnom se temelje na determinističkom proračunu kojim se povećavaju troškovi pogona i koji ne uključuju varijable koje se protežu kroz nekoliko vremenskih koraka (intertemporalne varijable) te koji ne uračunava u potpunosti potencijal distribucijskog sustava za osiguravanje fleksibilnosti.

Tradicionalno razmatrano, sav je iznos poremećaja između potrošnje i proizvodnje bivao kompenziran od strane centralnih jedinica. No dolaskom je novih tehnologija (mikro-kogeneracija, električni automobili, upravljiva potrošnja, električne dizalice topline itd.) novi fleksibilni potencijal može se omogućiti na lokalnoj, distribucijskoj razini [10]. Iako su koncepti virtualnih elektrana [11] i mikromreža, [12] poznati i dalje nedostaje cjelovit pristup procjeni mogućnosti svih energetskektorskih vektora posebice s aspekta interakcije između više-energijske mikromreže i ostatka sustava koji istražuje pogonske karakteristike više-energijskih sustava te pruža vrijedne uvide za planiranje, optimalno dimenzioniranje jedinica, pogon i nove poslovne strategije.

Dok je integracija baterija i električnih automobila često razmatrana opcija zbog njihove mogućnosti pružanja usluga fleksibilnosti [13], jednako je važno, ako ne i važnije, omogućiti već postojeće mogućnosti i potencijal fleksibilnog pogona na distribucijskoj razini elektroenergetskog sustava. Iz tog konteksta više-energijski sustavi [14] i više-energijske mikromreže postaju sve važnije zbog svoje mogućnosti da povežu pogon različitih jedinica i energetskektorskih vektora. Takvi sustavi imaju mogućnost pružanja zahtijevanih usluga bez smanjivanja komfora krajnjih korisnika kako bi pružile pogodan odziv na zahtjeve sustava u različitim vremenskim okvirima [15], [16], [17].

Kako bi se iskoristilo pružanje usluga temeljeno na cjenovnim signalima više-energijskih subjekata poput više-energijske mikromreže ili neke druge potencijalno fleksibilne jedinice na distribucijskoj razini, potrebno je te subjekte agregirati u jedan jedinstveni tržišni subjekt. Takvo agregiranje povećava vidljivost na tržištu, mogućnost sudjelovanja u tržišnom natjecanju te sukladno tome ukupnu korist [18]. Agregiranje u slučaju koncepta virtualnih elektrana uobičajeno uključuje i konvencionalne jedinice i jedinice obnovljivih izvora energije [19], [20]. Nemogućnost točnog predviđanja proizvodnje iz obnovljivih izvora energije uključenih u virtualnu elektranu određujuće definira nastup takvog subjekta na tržištu pri čemu su fleksibilne jedinice poput spremnika energije korištene u svrhu minimizacija razine varijabilnosti i neizvjesnosti koja je

bila predviđena prije same realizacije proizvodnje [20], [21]. Najnovija istraživanja strategija nastupa na tržištu najčešće su usmjerena na robusne strategije ili strategije temeljene ne procjeni rizika kako bi se nadvladao spomenuti problem [22], no takvi pristupi mogu dovesti do značajno konzervativnih rješenja i suboptimalnih pogonskih točaka. Zanimljivo je primijetiti da se već jedna lokalna više-energijska jedinica može smatrati virtualnom elektranom jer se sastoji od različitih jedinica koje su zajednički pogonjene [24]. Koordinirana proizvodnja ovakvih jedinica rezultira uštedama i smanjenim utjecajem na okoliš u usporedbi s odvojenim pogonom [25]. Prilikom grupiranja i agregiranja različitih više-energijskih jedinica potencijalna vrijednost međusobnog zamjenjivanja različitih energijskih vektora postaje još i više izražena [26].

Na lokalnoj razini područja mikromreže, potražnja za toplinskom energijom i energijom za hlađenje dobro su predvidivi i ne doprinose značajno varijabilnosti i nepredvidivosti, za razliku od obnovljivih izvora energije. Dodatno, grijanje i hlađenje imaju određenu količinu tromosti ugrađenu u prirodu samog procesa što znači da su njihovi zahtjevi za uravnoteženjem iz trenutka u trenutak manje zahtjevni. [27] i [28] pokazuju adaptivno upravljanje s pomičnim horizontom za preraspodjelu proizvodnje više-energijskih jedinica s ciljem minimizacije odstupanja od najavljenih iznosa razmjena te maksimizacije korištenja lokalno proizvedene električne energije samo sa stanovišta optimalnih količina energije.

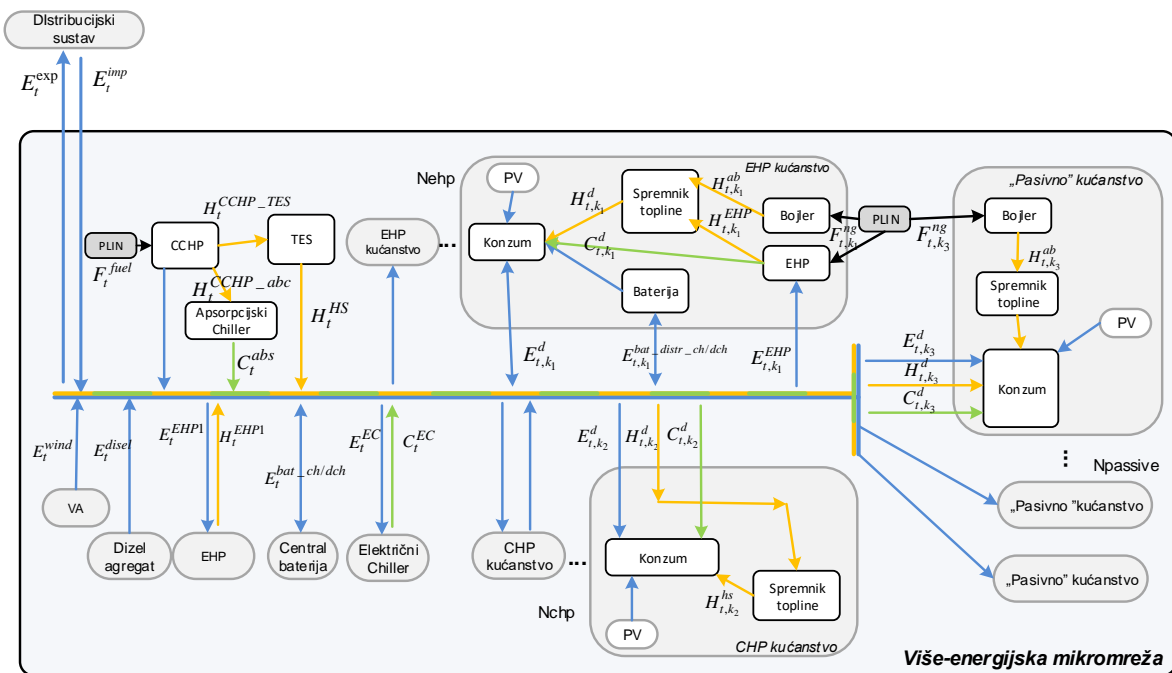
Referat će ukratko dati prikaz razvijenog optimizacijskog modela te će biti prikazani rezultati koji pokazuju kako dodavanje dodatnih energijskih vektora poboljšava mogućnosti pogona te rezultati koji pokazuju razlike proizašle iz različitih konfiguracija mikromreže (centralne jedinice u odnosu na manje decentralizirane jedinice na razini kućanstva), te razlike proizašle iz aproksimacija korištenih prilikom izrade modela mikromreža (prvenstveno pretpostavka konstantne učinkovitosti).

## 2. MODEL VIŠE-ENERGIJSKE MIKROMREŽE

Model mikromreže uključuje sve relevantne komponente potrebne za istraživanje interakcija između različitih energijskih vektora. Može uključivati proizvoljan broj kućanstava pri čemu svako može biti opremljeno različitim izvorima energije te slijediti različite krivulje potrošnje električne energije, toplinske energije i energije za hlađenje. Konfiguracija ovog više-energijskog sustava može biti različita, potrošači se mogu napajati iz centralne trigeneracijske jedinice (CCHP – *Combined Colling Heating and Power*) ili iz manjih jedinica instaliranih u kućanstvima poput dizalica topline (EHP – *Electric heat pump*) i mikro kogeneracijskih jedinica ( $\mu$ CHP – *micro Combined Heat and Power*). Dodatno na raspolaganju mogu biti bojleri, kućni spremnici toplinske energije, distribuirani izvori energije itd. Model je lako proširiv s novim elementima za razmatranje te pretpostavlja da je:

- a) Vrijeme uzorkovanja konstantno – korak simulacije  $\tau$  se ne mijenja što omogućava jasnu vezu između snage i energije te na isti način omogućava korištenje različitih vremenskih koraka;
- b) Ponašanje fleksibilnih potrošača nije direktno popraćeno financijskim tokom iako je primarno motivirano povećanjem učinkovitosti, odnosno smanjenjem troškova pogona.
- c) Veličina mikromreže je takva da ne utječe na formiranje cijena te slijedi ponašanje *price-takera*
- d) Pogon je razmatran s višeg, tržišnog aspekta te su regulacija napona i frekvencija pretpostavljeno obavljaju na nižim razinama
- e) Komunikacijske pogreške i kašnjenja se zanemaruju što znači da centralni upravljački algoritam raspolaže sa svim potrebnim informacijama;

Shematski prikaz dan je na slici (Slika 1). Različite konfiguracije koriste različite jedinice te se sukladno tome finalna shema mijenja. Plave strelice predstavljaju tok električne energije, žuta strelica toplinske tokove dok zelena tok energije za hlađenje. Crvenom bojom je označen tok fosilnog goriva (prirodni plin). Važno je primijetiti kako je najveći izvor fleksibilnost potencijal komunikacije i prenošenja dijela potrošnje između različitih energijskih vektora preko elektroenergetske infrastrukture koja je uvijek dostupna i koja dolazi do svakog potrošača (primjerice prema električne dizalice topline i mikro kogeneracijskih jedinica).



Slika 1. Shematski prikaz više-energijske mikromreže

Kao što je već spomenuto elementi mogu biti korišteni u različitim konfiguracijama, centralno (veće jedinice) i distribuirano (jedinice instalirane na razini kućanstava) (Tablica 1). Tip 1 pretpostavlja sve distribuirane jedinice, tip 2 pretpostavlja centraliziranu strukturu dok su tip 3 i tip 4 kombinacija različitih centralnih i distribuiranih jedinica, prvenstveno EHP i CHP jedinica.

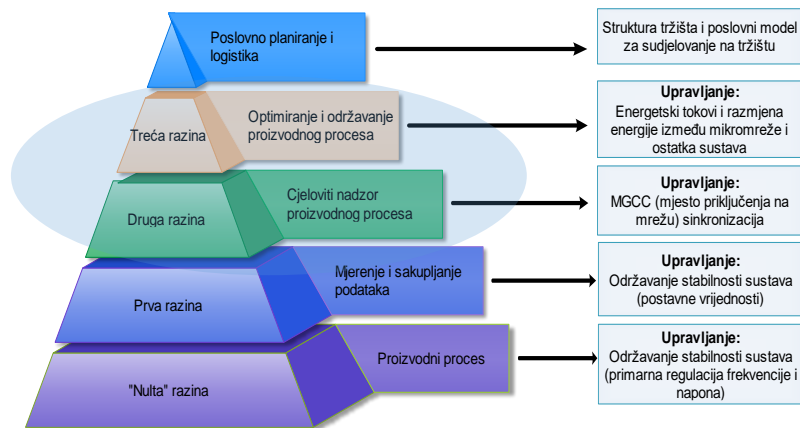
Tablica 1. Predložene različite konfiguracije više-energijske mikromreže

	CHP		EHP		Toplinski spremnik		Baterijski spremnik		Uređaji za hlađenje	Dizel gen.	OIE	
	Central	Kućni	Central	Kućni	Central	Kućni	Central	Kućni			PV	Vjetar
Tip 1 – distribuiran	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓
Tip 2 – centraliziran	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	✓	✓	✓
Tip 3 – CCHP+ kućni EHP	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	✓	✓
Tip 4 – centralni EHP+μCHP	-	✓	✓	-	-	✓	-	✓	-	✓	✓	✓

Radi sažetosti prikaza detaljniji opis matematičkog modela za svaki od elemenata mikromreže neće biti naveden i moguće ga je pronaći u literaturi [28] i [29] te će fokus biti stavljen na prikaz zanimljivih rezultata i zaključaka koji proizlaze iz niza simulaciju koje su provedene.

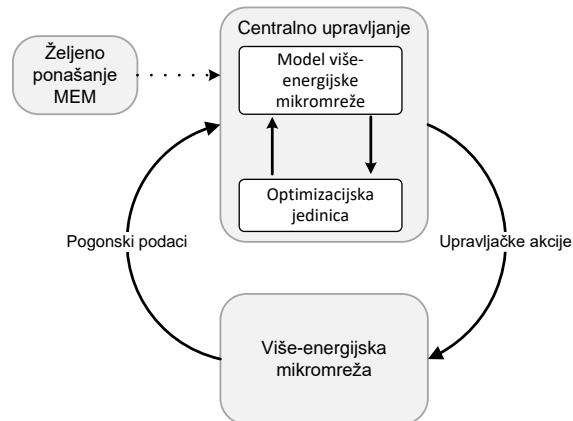
### 3. KOREKCIJSKO PLANIRANJE S POMIČNIM HORIZONTOM

Upravljanje više-energijskom mikromrežom se može razmatrati kao hijerarhijski problem (Slika 2). Najniža razina je izravno vezana uz karakteristike generatora dok je sljedeća razina zadužena za stabilizaciju frekvencije. Algoritam korekcijskog upravljanja djeluje u višim razinama upravljanja pretpostavljajući, kako je već spomenuto, efikasno izvršavanje aktivnosti na nižim razinama. Upravljanje djeluje na mjestu susretnog mjesta priključenja (PCC – *Point of common coupling*) između mikromreže i ostatka distribucijskog sustava.



Slika 2. Shematski prikaz više-energijske mikromreže

Upravljački algoritam s pomičnim horizontom oslanja se na principe modelskog prediktivnog upravljanja (MPC – *Model Predictive Control*) čija je osnovna ideja prikazana na slici (Slika 3). Centralno upravljanje temeljem rezultata referentnog modela odlučuje o željenom ponašanju sustava. Iteracijski proces nakon toga ispravlja utjecaje neizvjesnih ostvarenja različitih elemenata kroz niz simulacija za svaki vremenski korak. Pri čemu se u svakom koraku set ulaznih podataka i ulaznih parametara osvježava najnovijim stanjem i najnovijim prognozama za nadolazeće korake (primjerice do kraja aktualnog dana). Željeno ponašanje više-energijske mikromreže predstavlja što bolje slaganje s najavljenim planom ponašanja uzimajući u obzir sve stohastičke elemente (OIE, potrošnja) promatranom u točki zajedničkog mjesta priključenja.



Slika 3. Koncept modelskog prediktivnog upravljanja primijenjen na razvijeni model više-energijske mikromreže

U svakom optimizacijskom koraku upravljački algoritam estimira stanja za cijeli horizont planiranja unaprijed. Na temelju trenutnog stanja sustava i prognoza za nadolazeće korake upravljački algoritam određuje optimalno pogonsko stanje. Na ovaj način najnovija informacija o aktualnom pogonskom stanju i najnovijim prognozama utječe na korekciju pogonskog stanja. Kod sljedećeg vremenskog koraka cijeli se proces ponavlja. Vremenski horizont planiranja predstavlja 24-satni okvir tržišta dan unaprijed čiji je mikromreža aktivni sudionik dok se unutar dana korekcije pogona ravnanju sukladno dan-unaprijed planu te trenutnom stanju na unutar dnevnom tržištu (eng. *balancing market*). Najvažniji koraci optimizacijskog postupka mogu se podijeliti u dvije osnovne faze:

1. U određenom trenutku trenutnog dana (primjerice 12 sati prije realizacije plana) mikromreža šalje predviđeni plan razmjena (promatrano na susretnom mjestu priključenja) za nadolazeći dan
2. Na početku dnevnog ciklusa mikromreža u svakom vremenskom koraku sukladno rezultatima korekcijskog algoritma postavlja pogonske točke jedinica kako bi se čim bolje anulirao utjecaj devijacija u proizvodnji iz obnovljivih izvora energije te čim bolje slijedio najavljeni plan razmjena s ostatkom sustava.

Sukladno ovome, upravljački algoritam nakon inicijalnog (referentnog) optimizacijskog plana, koristi modificiranu funkciju cilja koja u obzir uzima i trošak pogreške prognoza.

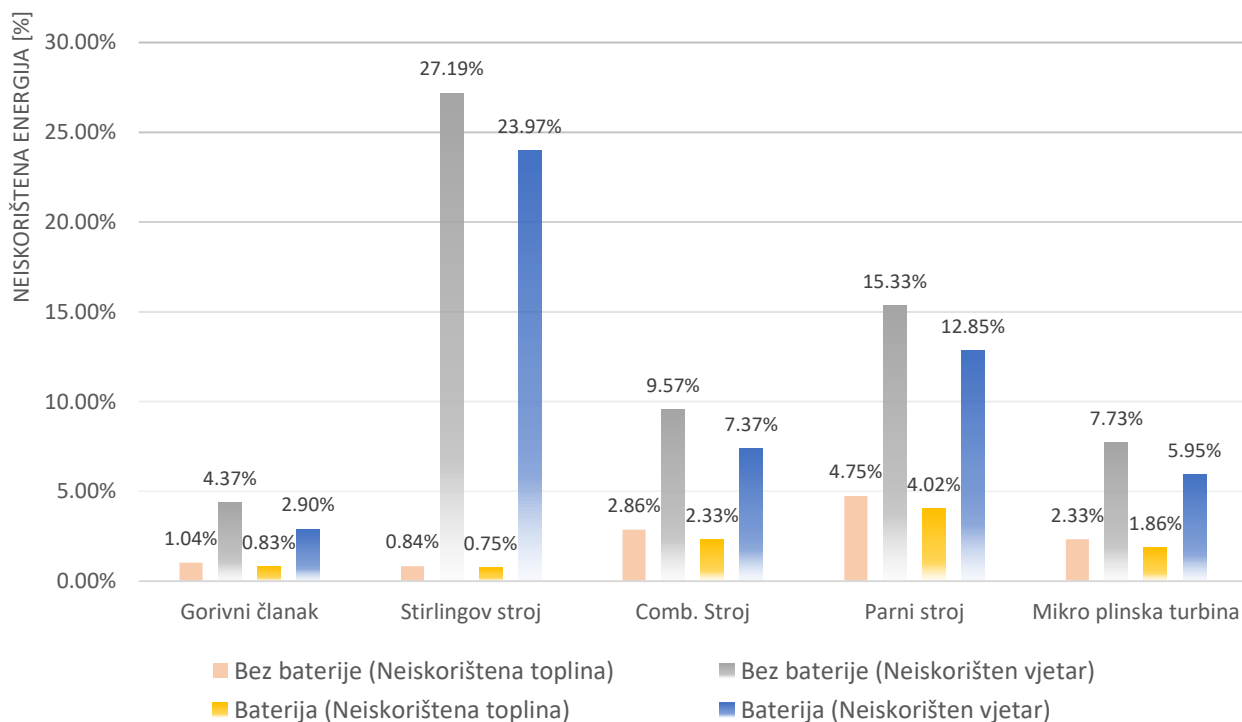
#### 4. REZULTATI

Kvaliteta pogona izražena preko odgovarajućih indikatora, neiskorištena toplinska energija i energija vjetra, mijenja se u ovisnosti o karakteristikama elemenata i konfiguraciji mikromreže. U otočnom radu mikromreža mora imati dovoljno kapaciteta i fleksibilnosti da zadovoljni sve potrebe svojih potrošača u svakom vremenskom trenutku. U paralelnom pogonu razlike u odnosu na najavljeni raspored uvoza/izvoza pogona indikator su nedostatne fleksibilnosti pogona. Serija simulacija koja demonstriraju rad mikromreže i prikazuju utjecaj spremnika energije na mogućnost fleksibilnog pogona te kapacitet prihvata obnovljivih izvora energije (Tablica 2). Na istoj seriji simulacija pokazuje se kako različite tehnologije primarne tehnologije izvora toplinske energije (kogeneracijske jedinice) postižu različite rezultate (Tablica 2).

Tablica II. Ovisnost mogućnost prihvata OIE o elementima mikromreže

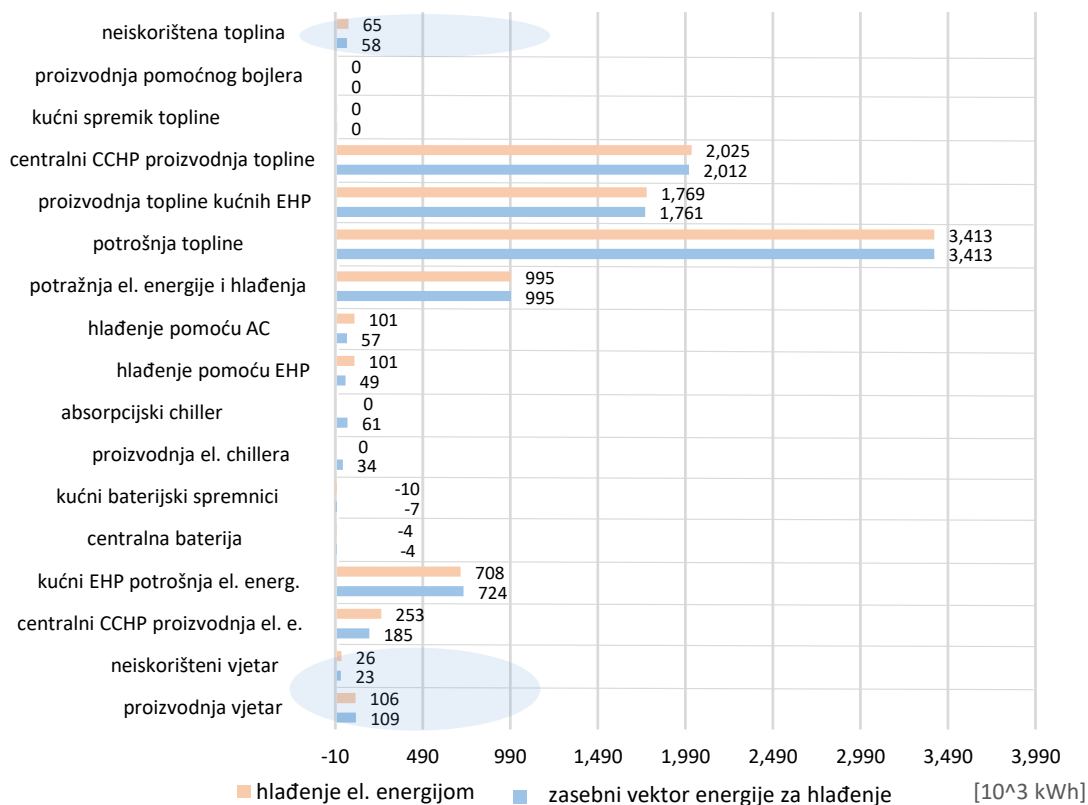
μCHP tehnologija	Učinkovitost [%]		Optimalni kapacitet FN [kW]		Optimalni kapacitet VA [kW]		Ukupne emisije [tone]		Udio potrošnje podmiren iz OIE [%]	
	Elek.	Topl.	NO bat.	Bat.	NO bat.	Bat.	NO bat.	Bat.	NO bat.	Bat.
Gorivni članak	30	55	92	102	71	68	840	834	37.93	38.77
Stirlingov stroj	20	77	70	89	184	180	799	795	61.98	62.24
Comb. motor	26	64	70	81	108	101	817	810	45.78	46.44
Parni motor	24	70	68	79	135	130	808	801	51.81	52.30
Plinska turbina	24	55	65	88	97	91	863	856	43,21	43.63

U svim scenarijima dodatak spremnika energije povećava fleksibilnost pogona (smanjuje neiskorištenu energiju) i mogućnost prihvata OIE (Slika 4). Dodatno zanimljivo je primijetiti kako scenariji koji koriste tehnologiju CHP jedinica s većom toplinskom učinkovitošću imaju veće postotke neiskorištenog vjetra (Slika 4). Proizvodnja topline i električne energije su u CHP jedinicama povezani, što znači da će u trenutcima kada te jedinice rade u praćenju toplinskog konzuma proizvoditi i dodatni višak električne energije. To je moguće izbjeći modifikacijom težinskog faktora koji se dodjeljuje penaliziranju pojavljivanja neiskorištene energije, no u globalu, optimizacija pokazuje da je nekada moguće postići niže troškove upravo na taj način – iskorištavanjem toplinskog izvora veće učinkovitosti iako to znači potencijalno propuštenu proizvodnju iz OIE.



Slika 4. Neiskorištena energija više-energijske mikromreže za različite karakteristike proizvodnih jedinica (u postotku od ukupno iskorištene topline || ukupno proizvedene energije iz vjetra)

Dobrobiti uključivanja dodatnog energijskog vektora, u ovom slučaju energije za hlađenje, prikazani su na Slici 5 koja prikazuje usporedne rezultate pokrivanja energetske potrebe mikromreže za slučaj kada su potrebe za hlađenjem podmirene pomoću električnih uređaja (klimatizacijski uređaji ili dizalice topline) te kada su podmirene uz pomoć zasebnog vektora energija za hlađenje (iz apsorpcijskih rashladnih uređaja). Dodavanjem zasebnog vektora povećava razinu slobode te povećava fleksibilnost pogona. Neiskorištena količina vjetra smanjuje se s 25.15% na 20.90% (jednako iznosu do 2838 kWh) a neiskorištena toplinska energija s 1.90% na 1.70% (jednako iznosu od 6761 kWh). Dodatno ukupni godišnji trošak pogona se smanjuje za 21% (s 193700 EUR na 153000 EUR).



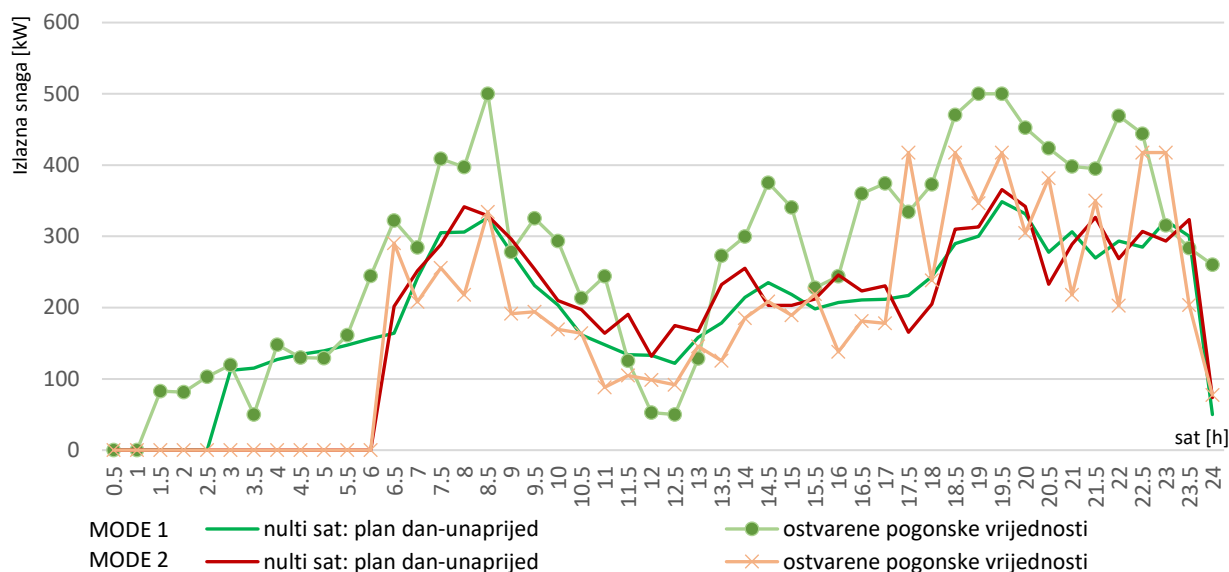
Slika 5. Usporedba pogona više-energijske mikromreže koja koristi različite načine hlađenja (hlađenje pomoću električnih uređaja VS hlađenje pomoću zasebnog vektora rashladne energije)

Dnevni proračun pogona više-energijske mikromreže upravljan korektivnim upravljačkim algoritmom s klizajućim horizontom poslužiti će kako bi se demonstrirala važnost preciznosti modela prilikom procjena dostupne fleksibilnosti u svakom vremenskom koraku. Između dva dnevna ciklusa mikromreža pokušava slijediti najavljene iznose razmjena bazirane na rezultatima inicijalnog proračuna za 24 sata unaprijed. Inicijalni plan označen s „0“ na slici 6 je podložan promjenama zbog fluktuacija i stohastičkog elementa u proizvodnji iz OIE. U determinističkom okruženju (savršena prognoza) najavljeni i ostvareni planovi ne razlikuju se. No u stvarno okruženju postoji stvarna potreba za točnim poznavanjem mogućnosti fleksibilnosti pogona kako bi se čim uspješnije slijedili dan unaprijed planovi i izbjegli troškovi uravnoteženja i postiglo ponašanje pogodno za ostatak sustava. Razvijeni upravljački algoritam u svakom vremenskom koraku (15 minutni/30 minutni koraci) proračunava optimalno pogonsko stanje za cijeli horizont promatranja unaprijed (24 sata) te primjenjuje korektivne radnje kako bi se od tog trenutka do kraja dnevnog ciklusa čim bolje smanjio utjecaj neizvjesnosti.

Razlike u planiranim i ostvarenim vrijednostima radnih točaka centralne CCHP jedinice mogu se razlikovati. Slika 10 dodatno prikazuje razlike proizašle iz različite preciznosti modeliranja učinkovitosti. MODE 1 predstavlja konstantnu učinkovitost dok MODE 2 predstavlja precizniji model učinkovitosti koji uzima u obzir promjenu učinkovitosti u ovisnosti o izlaznoj snazi (eng. *loading*). Rezultati su prikazani za jedan zimski dan te je moguće primijetiti velike razlike već u inicijalnom („nultom“) planu (zelena i crvena linija na slici 6). Realizirane vrijednosti za svaki sat također pokazuju razlike koje nekada mogu drastično mijenjati mogućnost fleksibilnog odziva, posebice trenutke kada jedinica radi u radnoj točki bliskoj minimalnoj stabilnoj snazi ili maksimalnoj snazi što je moguće primijetiti u razlikama između markerima



označenim zelenim i narančastim linijama (Slika 6). To može za posljedicu imati značajno odstupanje od najavljenog plana te povlačiti izraženo povećanje troškova.



Slika 5. Usporedba pogona više-energijske mikromreže koja koristi različite načine hlađenja (hlađenje pomoću električnih uređaja VS hlađenje pomoću zasebnog vektora rashladne energije)

## 5. ZAKLJUČAK

Rezultati pokazuju da postoji značajna razlika u troškovima i dostupnoj fleksibilnosti u ovisnosti o konfiguraciji više-energijske mikromreže. Dodatno učinkovitost i preciznost modeliranja učinkovitosti predstavlja ključni parametar prilikom procjena mogućnosti fleksibilnog pogona. Rezultati provedenih analiza mogu se sažeti u sljedeće točke:

- Konfiguracija više-energijske mikromreže koja kombinira centraliziranu i distribuiranu strukturu postiže najpovoljniji omjer troškova i pokazatelja pogona;
- Dodavanje zasebnih energetskih vektora u optimizacijski problem i centralno planiranje povećava mogućnosti fleksibilnog pogona te smanjuje troškove i neiskorištenu energiju;
- Pretpostavke modeliranja (npr. učinkovitosti – konstantna vs varijabilna) nemaju značajan utjecaj na ukupne godišnje troškove;
- Na satnoj bazi prilikom pogona upravljanog predloženim korekcijskim algoritmom s pomičnim horizontom razlike u pogonskim točkama između različitih načina modeliranja elemenata mikromreže imaju značajan utjecaj na dostupnu fleksibilnost.

## 6. ZAHVALA

Istraživanje je financirano u sklopu projekta SUCCESS Hrvatske zaklade za znanost, koji se financira u sklopu Programa Vlade Republike Hrvatske za poticanje istraživačkih i razvojnih aktivnosti u području klimatskih promjena te u sklopu financiranja od strane Hrvatske zaklade za znanost kroz projekt FENISG—Flexible Energy Nodes in Low Carbon Smart Network (Grant broj 7766).

## 7. LITERATURA

- P. Siano, Assessing the Impact of Incentive Regulation for Innovation on RES Integration, IEEE Transactions on Power Systems., vol. 29, pp. 2499–2508, 2014.
- D.F. Dominković, I. Bačeković, B. Čosić, G. Krajačić, T. Pukšec, N. Duić and N. Markovska, Zero carbon energy system of South East Europe in 2050, Applied Energy, vol. 184, pp. 1517-1528, 2016.
- L. Baringo and A. J. Conejo, Wind Power Investment within a Market Environment, Applied Energy, vol. 88, pp. 3239–3247, 2011.
- European Commission, “Communication from the Commission: Clean Energy For All Europeans,” 2016.



- [5] I. Pavić, T. Capuder and I. Kuzle, Low Carbon Technologies as Providers of Operational Flexibility in Future Power Systems, *Applied Energy*, vol. 168, pp. 724-738, 2016.
- [6] E. Olivares, A. Mehrizi-Sani, A.H. Etemadi, C.A. Canizares, R. Iravani, M. Kazerani, A. H. Hajimiragha, O. Gomis-Bellmunt, M. Saeedifard, R. Palma-Behnke, G.A. Jimenez-Estevez and N. D. Hatziargyriou, Trends in Microgrid Control, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, pp. 1905-1919, 2014.
- [7] M. Hakimi and S. M. Moghaddas-Tafreshi, Optimal Planning of a Smart Microgrid Including Demand Response and Intermittent Renewable Energy Resources, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, pp. 2889-2900, 2014.
- [8] E. Lannoye, D. Flynn and M. O'Malley, Evaluation of Power System Flexibility, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, pp. 922-931, 2012.
- [9] Group of authors: „Flexibility in 21st Century Power Systems“, National Renewable Energy Laboratory, 2014.
- [10] T. Capuder and P. Mancarella, Techno-economic and Environmental Modelling and Optimization of Flexible Distributed Multi-generation Options, *Energy*, vol. 71, pp. 516-533, 2014.
- [11] N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani, and C. Marnay, Microgrids, *IEEE Power & Energy Magazine*, 2007.
- [12] H. Pandžić, I. Kuzle and T. Capuder, Virtual power plant mid-term dispatch optimization, *Applied Energy*, vol. 101, pp. 134-141, 2011.
- [13] Y. Dvorkin, R. Fernandez-Blanco, D. S. Kirschen, H. Pandžić, J.-P. Watson, and C. A. Silva-Monroy, Ensuring Profitability of Energy Storage, *IEEE Transactions On Power Systems*, vol. 32, pp. 611–623, 2016.
- [14] P. Mancarella, MES (multi-energy systems): an overview of concepts and evaluation models, *Energy*, vol. 65, pp. 1–17, 2014.
- [15] N. Good, E. Karangelos, A. Navarro-Espinosa, and P. Mancarella, Optimization under Uncertainty of Thermal Storage-Based Flexible Demand Response with Quantification of Residential Users' Discomfort, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, pp. 2333–2342, 2015.
- [16] A. Majzoubi and A. Khodaei, Application of Microgrids in Providing Ancillary Services to the Utility Grid, *Energy* 2017
- [17] A. Saint-Pierre and P. Mancarella, “Active Distribution System Management: A Dual-Horizon Scheduling Framework for DSO/TSO Interface Under Uncertainty,” *IEEE Trans. Smart Grid*, pp. 1–12, 2016.
- [18] T. Capuder and P. Mancarella, “Assessing the Benefits of Coordinated Operation of Aggregated Distributed Multi-Energy Generation, in *Power System Computation Conference (PSCC 2016)*, pp. 1–7, 2016.
- [19] H. Cui, F. Li, Q.Hu, L. Bai and X. Fang, Day-ahead Coordinated Operation of Utility-scale Electricity and Natural Gas Networks Considering Demand Response Based Virtual Power Plants, *Applied Energy*, vol. 176, pp. 183-195, 2016.
- [20] A. Ghahgharaee Zamani, A. Zakariazadeh and S. Jadid, Day-ahead resource scheduling of a renewable energy based virtual power plant, *Applied Energy*, vol. 169, pp. 324-340, 2016.
- [21] M. Rahimiyan and L. Baringo, Strategic Bidding for a Virtual Power Plant in the Day-Ahead and Real-Time Markets: A Price-Taker Robust Optimization Approach, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, pp. 2676–2687, 2016.
- [22] N. Zhang, C. Kang, Q. Xia, Y. Huang, A Convex Model of Risk-Based Unit Commitment for Day-Ahead Market Clearing Considering Wind Power Uncertainty, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, pp. 1582-1592, 2014.
- [23] A. Baringo and L. Baringo, A Stochastic Adaptive Robust Optimization Approach for the Offering Strategy of a Virtual Power Plant, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. PP, pp. 1–1, 2017.
- [24] G. Chicco and P. Mancarella, Matrix Modelling of Small-scale Trigeneration Systems and Application to Operational Optimization,” *Energy*, vol. 34, pp. 261–273, 2009.
- [25] T. Capuder and P. Mancarella, Techno-economic and Environmental Modelling and Optimization of Flexible Distributed Multi-Generation Options, *Energy*, vol. 71, pp. 516-533, 2014.
- [26] H. Wang and P. Mancarella, Towards Sustainable Urban Energy Systems: High Resolution Modelling of Electricity and Heat Demand Profiles, in *IEEE Powercon, 2016*, Wollongong, Australia, pp. 1–6, 2016.
- [27] N. Holjevac, T. Capuder and I. Kuzle, Adaptive Control for Evaluation of Flexibility Benefits in Microgrid System, *Energy*, vol. 52, pp. 487-504, 2015.
- [28] N. Holjevac, T. Capuder and I. Kuzle, Defining Key Parameters of Economic and Environmentally Efficient Residential Microgrid Operation, *Energy Procedia*, vol 105. pp. 999-1008, 2017.

- [29] N. Holjevac, T. Capuder, I. Kuzle, N.Zhang, C. Kang. Corrective Receding Horizon Scheduling of Flexible Distributed Multi-Energy Microgrids. *Applied Energy*, 2017.