

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

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

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

EKONOMSKA I OKOLIŠNA ANALIZA ADAPTIVNO UPRAVLJANE FLEKSIBILNE MIKROMREŽE

SAŽETAK

U ovome se referatu opisuje mješovito cjelobrojni linearni model mikromreže koji je razvijen kako bi se ocijenio utjecaj različitih elemenata mikromreže na fleksibilnost mikromreže. Promatra se kako instalirana veličina elemenata (obnovljivi izvori, spremnik topline, upravljiva potrošnja, kombinirana mikro kogeneracijska postrojenja (μ CHP) i toplinske pumpe (EHP)) utječe na fleksibilnost. Drugi aspekt rada odnosi se na interakciju mikromreže s ostatkom sustava u slučaju paralelnog rada s distribucijskom mrežom unutar stohastičkog okruženja. Implementacijom varijabilnog kliznog upravljačkog algoritma zasnovanog na modelskom prediktivnom upravljanju (MPC) pokazuju se poboljšanja u pogonu mikromreže i povećana fleksibilnost te mogućnost odgovora na inherentno neizvjesno ponašanje potrošnje i proizvodnje iz obnovljivih izvora.

Ključne riječi: mikromreže, fleksibilnost pogona, modelsko prediktivno upravljanje

ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL ASSESMENT OF ADAPTIVELY CONTROLLED FLEXIBLE MICROGRID

SUMMARY

This paper presents mixed integer linear model of the microgrid which was developed to evaluate impact on the operational flexibility of the different microgrid elements. It was investigated what impact installed capacity of microgrid elements (renewable energy sources, heat storage, micro combined heat and power plants (μ CHP) and electric heat pumps (EHP)) has on operational flexibility. Additionally, interaction of the microgrid with the rest of the distribution system in a stochastic environment. With the implementation of the proposed control algorithm based on model predictive control (MPC) the microgrid operation is augmented with reduced costs and improved flexible response to inevitable stochastic changes in demand and RES production.

Key words: microgrids, flexibility, model predictive control

1. UVOD

Integracija obnovljivih izvora danas je u velikoj mjeri motivirana sustavima poticaja, pogotovo na razini obnovljivih izvora male snage [1]. Generalna je težnja Europske unije tranzicija prema proizvodnim tehnologijama s nultom razinom emisija [2] te će integracija velike količine obnovljivih izvora neupitno biti izazov s kojim će se biti potrebno suočiti. Investicije i unaprjeđenja u distribucijskoj mreži će biti potrebna kako bi se sustav mogao nositi s varijabilnom proizvodnjom i uravnoteženjem mreže u takvim uvjetima [3]. Gruba podjela načina integracije obnovljivih izvora može se svesti na „*fit and forget*“ pristup i „*smart grid*“ pristup. Prvi pristup zahtijeva velike investicije i dovodi do neoptimalnog dimenzioniranja mreže [4] te povećava gubitke [5]. S druge strane napredan pristup integracije preko mikromreža i naprednih mreža izbjegava velika pojačanja mreže uz određene investicije u nadzornu i upravljačku opremu [6]. Predmetna oprema i upravljački algoritmi omogućavaju integraciju obnovljivih izvora već na razini manjih jedinica, mikromreža, no potrebna je određena razina promjena u sustavu kako bi tranzicija bila uspješno ostvarena [7]. Tradicionalno gledano, postojala je izrazita razlika između proizvodnje i potrošnje gdje je potrošnja smatrana potpuno pasivnim elementom s vrlo malom mogućnosti kontrole. Stoga je svako odstupanje između proizvodnje i potrošnje moralo biti uravnoteženo na proizvodnim jedinicama [8]. Danas na razini mikromreže postoje upravljivi elementi čijim se agregiranjem i odgovarajućim tržišnim mehanizmom [9] može postići ublažavanje negativnih utjecaja integracije obnovljivih izvora. Iako ideje virtualne elektrane i mikromreža nisu nove [10] još uvijek postoji nedostatak integralnih modela koji će pokazivati interakciju mikromreže s ostatkom sustava i raspodjelu opterećenja na elemente mikromreže te omogućiti robustan odziv na fluktuacije u proizvodnji obnovljivih izvora i, ako je to potrebno, nezavisni otočni rad. Kako bi se ostvarilo ponašanje koje minimizira odstupanje proizvodnje od planiranog rasporeda i integrira sve elemente mikromreže potrebno je učinkovito upravljanje.

U radu će biti opisane temeljne značajke mikromreža i problemi koji se susreću prilikom dimenzioniranja njezinih elemenata. Nakon toga bit će objašnjen pojam fleksibilnosti pogona i osnovna ideja povećanja fleksibilnosti te fleksibilnost koju mikromreže mogu ponuditi sustavu. Kako bi se to ostvarilo potrebno je na razvijenim modelima potvrditi učinkovitost predloženog načina upravljanja koje se oslanja na modelsko prediktivno upravljanje. U završnom dijelu referata bit će ukratko prikazan dio rezultata dobivenih različitim analizama na modeliranoj mikromreži.

2. KONCEPT MIKROMREŽE

Jedna od prvih definicija mikromreža koja se pojavljuje u literaturi [11] spominje se u kontekstu integracije OIE. Sukladno tome, mikromreža se može definirati kao skup trošila, distribuirane proizvodnje i spremnika energije upravljanih na koordiniran način s ciljem pouzdane razmjene energije s ostatkom sustava preko jednog susretnog mjesta priključka (eng. *Point of Common Coupling (PCC)*). Način pogona mikromreže može biti paralelan sa sustavom ili otočni o čemu ovisi izbor upravljanja istom [12].

Kako bi se omogućila uspješna integracija obnovljivih izvora energije potrebno je sagledati sljedeće probleme:

- Raspodjela opterećenja na proizvodne jedinice mikromreže u uvjetima nesigurnosti te određivanje odgovarajućih razina potrebne rezerve;
- Pouzdan i ekonomičan rad mikromreže s velikim udjelom varijabilne proizvodnje iz OIE u samostalnom (otočnom) režimu rada;
- Oblikovanje odgovarajućih shema upravljanja potrošnjom kako bi se potrošačima omogućila reakcija na potrebe mreže;
- Definiranje novih tržišnih modela sudjelovanja koji će omogućiti sudjelovanje na tržištu entiteta koji integriraju obnovljive izvore energije i distribuiranu proizvodnju, električne automobile, upravljivu potrošnju, spremnike energije te sukladne poticaje;
- Proračunavanje zaštite na distribucijskoj razini uzimajući u obzir dvosmjerne tokove snaga;
- Razvoj novih regulacijskih tehnika za regulaciju napona i frekvencije koje uvažavaju povećanje udjela proizvodnje spojene na mrežu preko energetske elektronike (bez velike inertne zalihosti).

Fleksibilna mikromreža se na ostatak distribucijskog sustava spaja preko jednog susretnog mjesta (Slika 1) te ako će sve nesigurnosti i varijabilnosti potrošnje i proizvodnje biti uravnotežene unutar tog istog mjesta tada se može reći da takva mikromreža nema negativnih utjecaja i ima karakteristike fleksibilnog energetskog čvorišta [13].



Slika 1 Elementi mikromreže te potencijal spajanja mikromreže kao fleksibilnog čvorišta na distribucijsku mrežu preko jedne točke

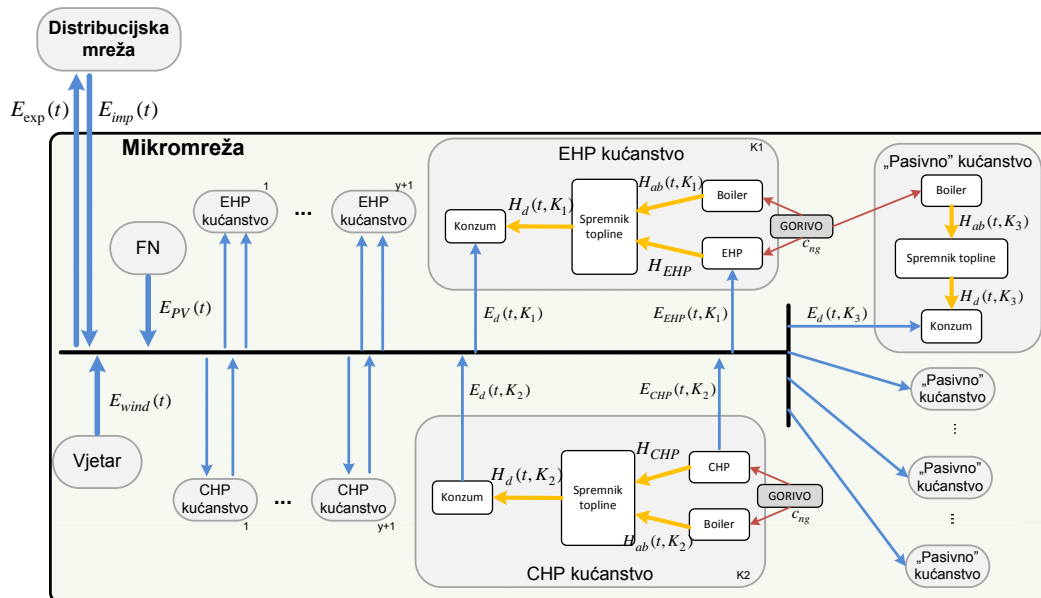
3. FLEKSIBILNOST POGONA

Fleksibilnost pogona može se definirati kao sposobnost sustava da angažira svoje resurse u odgovoru na promjene u opterećenju [14]. Ako se promatra tržišno planiranje pogona elektrana, fleksibilni plan angažmana jedinica je onaj koji operatoru omogućava brzu i jeftinu promjenu u pogonu jedinica kao odgovor na promijenjenu tržišnu situaciju. Svi elektroenergetski sustavi inherentno imaju ugrađenu određenu razinu fleksibilnosti. Neizvjesnost i varijabilnost u proizvodnji i potrošnji bilo je moguće izbalansirati postojećim kapacitetima bez potrebe za dodatnim ulaganjima u nove spremnike energije, fleksibilno upravljanje potrošnjom ili prijenosne kapacitete. No izgradnjom velike količine obnovljivih izvora energije zahtjevi na fleksibilnost sustava su se povećali. Istovremeno je ostvarivanje fleksibilnosti nekonvencionalnim izvorima energije otežano (primjerice asinkroni generatori u slučaju vjetroelektrana). Pri tome se postavlja pitanje kako ocijeniti na koji način će dodatna količina obnovljivih izvora utjecati na pogon, koliko obnovljivih izvora sustav može podnijeti te koje su promjene potrebne kako bi se zadržala zadovoljavajuća razina pouzdanosti?

Pokazatelji nedostatka fleksibilnosti mogu se očitovati: nemogućnošću uravnoteženja proizvodnje i potrošnje što može dovesti do promjena u frekvenciji ili rasterećenja; značajnim količinama neiskorištene energije; odstupanjima od najavljenih rasporeda angažmana jedinica; volatilnošću cijena i negativnim cijenama energije. Tradicionalno su elektrane s mogućnosti lake promjene snage, odnosno s dobrim gradijentom promjene snage, pružale usluge rezerve. Pri tome su pretežno hidro-sustavi imali puno bolju fleksibilnost od pretežno termo-nuklearnih sustava jer inherentna gornja granica fleksibilnosti ovisi o značajkama generatora. U uvjetima velike penetracije obnovljivih izvora sve je češća potreba da velike proizvodne jedinice značajno mijenjaju svoju snagu ili ulaze/izlaze iz pogona. To se odluke temelje na determinističkom proračunu potrebne rezerve na primjerice satnoj bazi ovisno o sadašnjem stanju sustava. No, osim što takav pristup povećava troškove pogona ne uključuje na učinkovit način ograničenja u pogonu koja nastaju na manjoj vremenskoj skali i koja se protežu kroz nekoliko vremenskih koraka (intertemporalna ograničenja). Intenzivnijim prodorom novih tehnologija (μ CHP, baterije, EV, upravljiva trošila itd.) otvara se mogućnost ostvarivanja veće fleksibilnosti pogona na distribucijskoj razini. Uključivanje problema fleksibilnosti koordiniranog pogona svih jedinica na distribucijskoj razini mikromreža zahtijeva nove formulacije metoda angažmana jedinica. Jednako tako ocjena fleksibilnosti zadire i u pitanje dimenzioniranja jedinica. Često korišten pokazatelj fleksibilnosti sustava je količina neiskorištene energije. Pri tome je bitno primijetiti da granična korist investiranja u fleksibilne jedinice pada s veličinom ukupne investicije. Stoga je informacija kako određeni elementi mikromreže utječu na fleksibilnost pogona važan čimbenik prilikom planiranja daljnjeg razvoja. Jednako tako bitan je pronalazak optimalnog načina upravljanja i iskorištavanja te fleksibilnosti. U radu su preko pokazatelja neiskorištene energije prikazani rezultati analiza osjetljivosti fleksibilnosti sustava na udio obnovljivih izvora energije i dimenzioniranje različitih elemenata mikromreže (udio μ CHP i EHP jedinica, udio upravljive potrošnje, veličina toplinskih spremnika).

4. TESTNI MODEL MIKROMREŽE

U sljedećem dijelu rada bit će ukratko opisan razvijeni model mikromreže koji uključuje sve bitne elemente. Kao što se vidi sa slike (Slika 2) mikromreža se sastoji od različitih tipova potrošača (ukupno njih 300, proizvođača el. energije, proizvođača topline, spremnika topline, distribuirane proizvodnje iz obnovljivih izvora energije te spoja s ostatkom distribucijske mreže.



Slika 2 Shematski prikaz modelirane mikromreže sa svim tokovima energije [15]

Razvijeni cjelobrojno-mješoviti linearni optimizacijski model (MILP – *Mixed integer liner programming*) izrađen je pomoću CPLEX solvera [16] dok je MATLAB [17] korišten za manipulaciju podacima i uvođenje stohastičkih elemenata u model.

Pojednostavljenja koja su napravljena prilikom izrade modela odnose se na sljedeće pretpostavke:

- Pogon i optimizacija pogona mikromreže se vrši isključivo prema tržišnim uvjetima uz zanemarivanje regulacije napona i frekvencije za koje je pretpostavljeno da se odvijaju na nižoj razini upravljanja samog agregata;
- Središnje upravljanje ima dostupne sve podatke o trenutnom stanju sustava;
- Razmjena s ostatkom distribucijskog sustava se pretpostavljeno odvija kupnjom/prodajom električne energije na dan unaprijed tržištu i koriste se korigirane cijene (eng. *imbalance prices*: *SSP* – *System Sell Price*; *SBP* – *System Buy Price*) [18];
- Promatrana mikromreža je dovoljno mala da ne utječe na formiranje cijena na tržištu (eng. *price taker*);
- Nema ograničenja na razmjenu između mikromreže i ostatka sustava;
- vrijeme uzorkovanja je konstantno

Svaki od elemenata mikromreže modeliran je svojim jednadžbama unutar linearnog modela koje opisuju njegovo ponašanje i ograničenja. Na taj način se primjerice modeliraju ograničenja maksimalne i minimalne snage, ograničenje proizvodnje topline i električne energije, ukupna ravnoteža proizvodnje i potrošnje, mogućnost neiskorištavanja vjetrova itd.

Korišteni ulazni podaci i varijable odlučivanja navedeni su u tablici (tablica I). Popis korištenih parametara simulacije također se nalazi u tablici (tablica I).

Tablica I. Ulazni parametri i varijable odlučivanja optimizacijskog modela

Parametar	Opis
K	Ukupan broj kućanstava
i	Brojač koji se odnosi na i -to kućanstvo
t	Trenutni korak simulacije
S	Trenutni sat unutar dana
T_{\max}	Vremenski horizont simulacije [sati]
τ	Trajanje koraka simulacije (modificira nazivni period trajanja 1 sat - ΔT)
$c_{ng}(t)$	Cijena prirodnog plina [€/kWh]

Parametar	Opis
P	<i>Penalty factor</i> za rasipanje toplinske energije i neiskorištavanje vjetra [€/kWh]
M_1, M_2	Modifikacijski faktori tržišne cijene
$H_d(t,i)$	Toplinska potrošnja <i>i-tog</i> kućanstva [kWh]
$E_d(t,i)$	Potrošnja električne energije <i>i-tog</i> kućanstva [kWh]
$c_{imp}(t)$	Cijena uvezene električne energije [€/kWh]
$c_{exp}(t)$	Cijena izvezena električne energije [€/kWh]
$c_{mpc}(t)$	Tržišna cijena električne energije (<i>market clearing price</i>) [€/kWh]
$E_{wind_curt}(t)$	Neiskorištena energije vjetra [kWh]
$H_{waste}(t)$	Rasuta toplina [kWh]
$E_{imp}(t)$	Uvezena količina električne energije iz distribucijskog sustava [kWh]
$E_{exp0}(t)$	Najavljeni izvoz u ostatak distribucijskog sustava [kWh]
$E_{imp0}(t)$	Najavljeni uvoz električne energije iz distribucijskog sustava [kWh]
$E_{exp}(t)$	Izvezena električna energija u ostatak distribucijskog sustava [kWh]
$F(t)$	Ukupna potrebna količina (energija) prirodnog plina [kWh] (u CHP jedinicama i pomoćnim bojlerima)
$short_{imp}(t)$	Uvoz manje količine el. energije od najavljene
$short_{exp}(t)$	Izvoz manje količine el. energije od najavljene
$long_{imp}(t)$	Uvoz više od najavljene količine el. energije
$long_{exp}(t)$	Izvoz više od najavljene količine el. energije

U prvom nizu simulacija (deterministički proračun) Opisani model mikromreže koristi se za određivanje optimalnih veličina elemenata unutar mreže. Proračun je proveden za odabranu godinu uz pretpostavku determinističkih podataka, odnosno uz pretpostavku da su svi ulazni podaci unaprijed poznati. Isto tako provedene su analize osjetljivosti kako bi se utvrdio koliki utjecaj instalirana veličina određenog elementa mikromreže ima na fleksibilnost rada. Funkcija cilja ovog niza proračuna jest minimizacija troškova s posebnim naglaskom na kažnjavanje rasipanja energije:

$$COST = \sum_{t=1}^{T_{max}} \left(Fuel(t) \cdot c_{ng}(t) + E_{imp}(t) \cdot c_{imp}(t) - E_{exp}(t) \cdot c_{exp}(t) + P \cdot E_{wind_curt}(t) + P \cdot H_{waste}(t) \right) \quad (1)$$

U drugom nizu simulacija (proračun u uvjetima nesigurnosti) prikazan je rad mikromreže s odabranim instaliranim veličinama elemenata dobivenim u prethodnim proračunima u slučaju sudjelovanja mikromreže kao entiteta na dan unaprijed tržištu električne energije. Simulacija se odvijala u stohastičkom okruženju nesigurnosti ostvarenja očekivane proizvodnje iz OIE i potrošnje, te sukladno tome nesigurnosti ostvarenja dan unaprijed najavljenih razmjena s mrežom. Cilj je bio pokazati koliko dobro mikromreža s primijenjenim predloženim modelom upravljanja može uravnotežiti nepredviđena odstupanja i time omogućiti ostvarivanje minimalnog utjecaja na ostatak distribucijskog sustava. Modificirana funkcija cilja sastoji se od tri osnovna segmenta za svaki vremenski trenutak proračuna: 1) predstavlja očekivani trošak prema ugovorenim razmjenama koja se vrši prema tržišnim cijenama (*market indeks price*); 2) predstavlja naknadu za odstupanje prema modificiranim cijenama; 3) predstavlja predviđene troškove za buduće (neostvarene) sata do kraja promatranog dana.

Segment 1: Ugovoreni trošak

$$\begin{aligned}
 COST = & \sum_{t=1}^{24 \cdot \tau^{-1} + 1 - S} \left[F(t) \cdot c_{ng} + E_{imp0}(t) \cdot c_{mcp}(t) - E_{exp0} \cdot c_{mcp}(t) + P \cdot E_{wind_curt}(t) + P \cdot H_{waste}(t) \right] + \\
 & \left. \begin{aligned} & \dots + \left[(-)short_{imp}(t) \cdot M_1 \cdot c_{mcp}(t) + long_{imp}(t) \cdot M_2 \cdot c_{mcp}(t) + \right. \\ & \left. short_{exp}(t) \cdot M_2 \cdot c_{mcp}(t) - long_{exp}(t) \cdot M_1 \cdot c_{mcp}(t) \right] + \dots \end{aligned} \right\} \text{Segment 2:} \\
 & \dots + \sum_{t=24 \cdot \tau^{-1} + 1 - S}^{24 \cdot \tau^{-1}} \left[F(t) \cdot c_{ng} + E_{imp}(t) \cdot c_{mcp}(t) - E_{exp} \cdot c_{mcp}(t) + P \cdot E_{wind_curt}(t) + P \cdot H_{waste}(t) \right] \\
 & \text{Segment 3: Budući koraci do kraja dana (trošak determinističke reference)}
 \end{aligned} \quad (2)$$

5. REZULTATI DETERMINISTIČKOG PRORAČUNA

U determinističkom proračunu promatran je rad mikromreže za 365 dana odabrane godine. Pretpostavka je da su unaprijed poznati opterećenje, proizvodnja OIE i cijene el. energije za sve polusatne periode godine, ukupno 17520 simulacijskih koraka. Parametri simulacije su prikazani tablicom (tablica II).

Tablica II. Parametri simulacije i njihove vrijednosti

Parametar	Jedinica	Vrijednost
Vrijeme simulacije T_{max}	[hour]	8760
Korak simulacije τ	[hour]	0.5
Broj kućanstava K	--	300
Faktor kažnjavanja rasipanja energije P	--	300
Cijena prirodnog plina c_{ng}	[€/kWh]	0.025
Kapacitet spremnika topline C_{hs_max}	[kWh]	6
Udio fleksibilne potrošnje p_{flex}	[%]	15
Maksimalni kapacitet fleks. potrošnje C_{flex_max}	[kWh]	50
Električna učinkovitost CHP jedinice η_{chp_e}	--	0.38
Toplinska učinkovitost CHP jedinice η_{chp_t}	--	0.55
Maksimalna toplinska snaga H_{chp_max}	[kWh]	8
Maksimalna toplinska snaga EHP H_{ehp_max}	[kWh]	10
Udio kućanstava s grijanjem baziranim na CHP	[%]	45
Udio kućanstava s grijanjem baziranim na EHP	[%]	45
Udio kućanstava s grijanjem baziranim na bojleru	[%]	10
Faktor učinkovitosti rada dizalica topline $COP(t)$	--	3.5 ljeto; 3 prijelaz; 2.5 zima
Maksimalna snaga bojlera H_{ab_max}	[kWh]	10
Maksimalni kapacitet spremnika topline C_{hs_max}	[kWh]	6
Učinkovitost spremnika topline η_{hs}	--	0.98
Ograničenje brzine pražnjenja E_{hs_max}	[kWh]	$C_{hs_max} \cdot \tau$

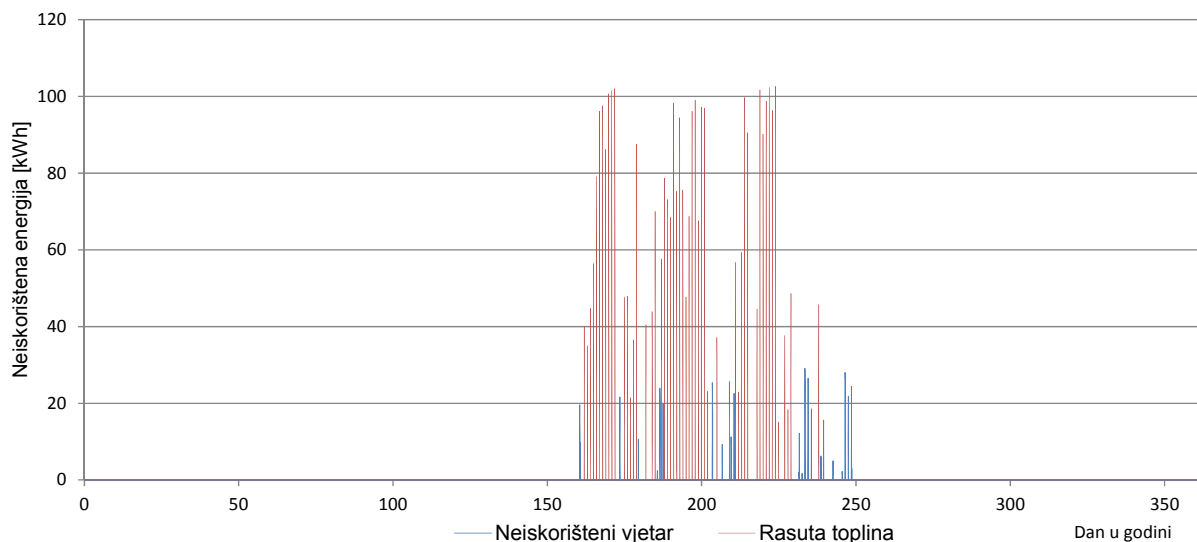
Dio rezultata se može vidjeti u tablici (Tablica III). Pokazuje se da u slučaju paralelnog rada s mrežom ne dolazi do rasipanja energije jer je preko veze s ostatkom distribucijske mreže moguće izvesti višak proizvedene električne energije. S druge strane do rasipanja energije u otočnom radu (Slika 3) dolazi u toplim danima kada nedostaje el. energije te je potrebno podići proizvodnju CHP jedinica. Jednako tako rasipanje vjetra se javlja u trenucima velikog dostupnog vjetra, a male potrošnje električne energije. Također, očekivano, u slučaju otočnog rada mikromreže dimenzioniranje ukupno instaliranih snaga OIE energije ima značajan utjecaj na rasipanje energije i zadovoljavanje potrošnje mikromreže. To nije slučaj u paralelnom načinu rada sa sustavom gdje je energiju lako moguće uvesti/izvesti i sukladno tome lakše uravnotežiti proizvodnju i potrošnju

Tablica III. Usporedba otočnog („off grid“) i paralelnog s mrežom („On grid“) načina pogona

Pokazatelji pogona	„Off-grid“	„On-grid“
Ukupno proizvedeno [kWh]	4.190.934	4.177.944
Potrošena el. energija [kWh _e] ¹	764.926	764.926
Potrošena toplina [kWh _t]	3.559.675	3.413.018
Odbačen vjetar [kWh]	1.301	0,00
Rasuta toplina [kWh]	11.689	0,00
Uvezena el. energija [kWh]	0,00	266.934
Izvezena el. energija [kWh]	0,00	547.112
CO ₂ emisije [kg]	649.345	535.684
Neiskorištena energija [%] ¹	0,31	0,00
Proizvodnja bojlera [kWh]	453.621	87.756
Trošak goriva bojlera [€]	13.341	2.581
Optimalna veličina vjetra [kWh _{inst}]	65	-- ²
Optimalna veličina solara [kWh _{inst}]	112	-- ²
UKUPNI TROŠAK [€]	99.320	78.477

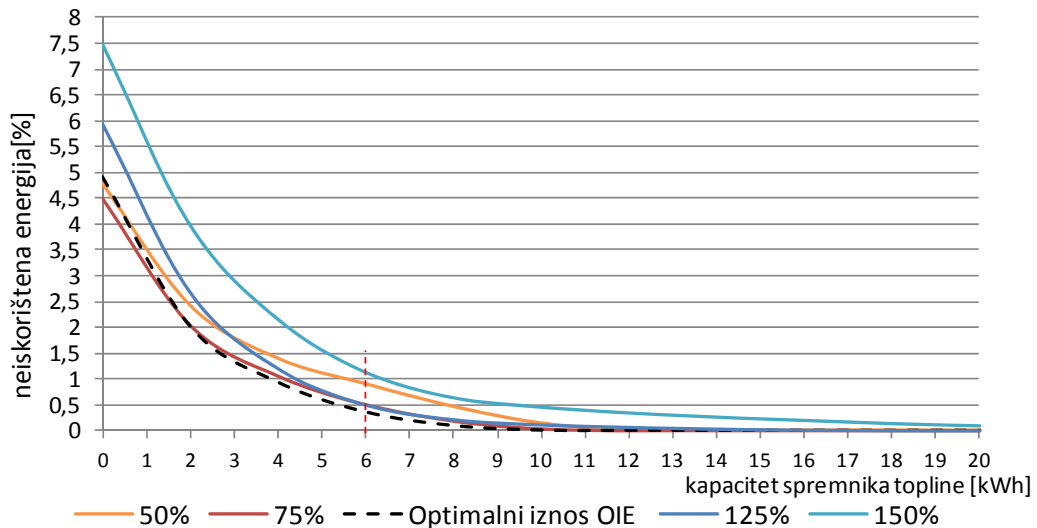
¹ Postotak od ukupno iskorištene energije

² Optimalni iznos su traženi samo za otočni način pogona

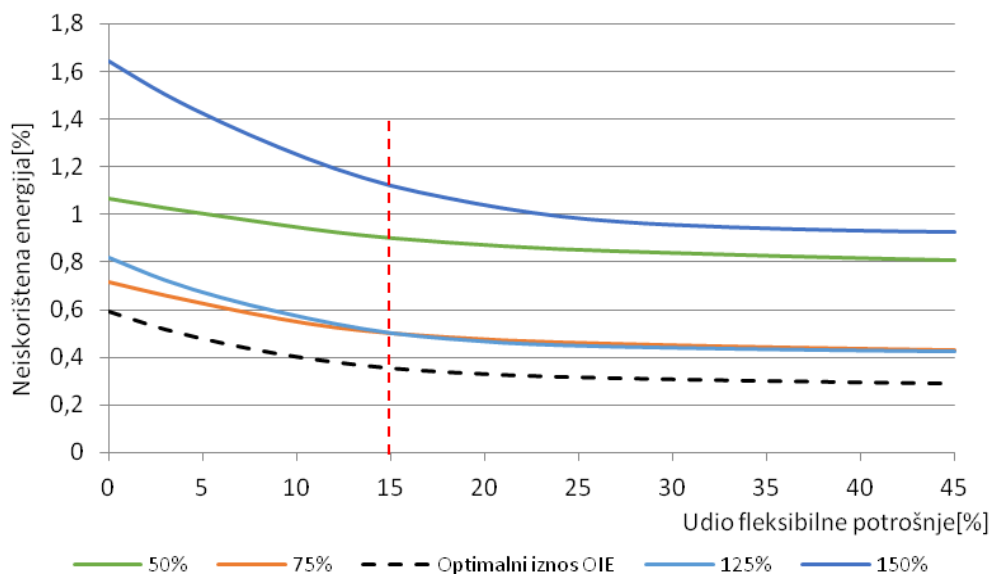


Slika 3 Odbačeni vjetar i rasuta toplina

Provedena analiza osjetljivosti instalirane veličine na mogućnost fleksibilnog pogona mikromreže pokazala je da određeni elementi poput spremnika topline imaju značajniji utjecaj nego primjerice fleksibilni potrošači. Fleksibilnost pogona se promatrala kroz količinu rasute energije. Primjer rezultata prikazan je slikom (Slika 4) na kojoj se vidi da loše odabrane instalirane veličine elemenata mikromreže zahtijevaju više fleksibilnosti pogona. Jednako tako može se primijetiti da se za spremnik topline od 6 kWh_t po kućanstvu postiže značajno smanjenje iznosa rasute energije i ostvaruje osjetna fleksibilnost pogona. Dobiveni rezultati i zaključci korišteni su u sljedećem nizu simulacija gdje se u stohastičkom okruženju promatralo upravljanje radom mikromreže s ciljem postizanja što veće fleksibilnosti rada.



Slika 4 Analiza osjetljivosti povezanosti kapaciteta spremnika topline i neiskorištene energije



Slika 5 Analiza osjetljivosti povezanosti udjela fleksibilne potrošnje i neiskorištene energije

6. REZULTATI PLANIRANJA POGONA U UVJETIMA NESIGURNOSTI PROIZVODNJE I POTROŠNJE

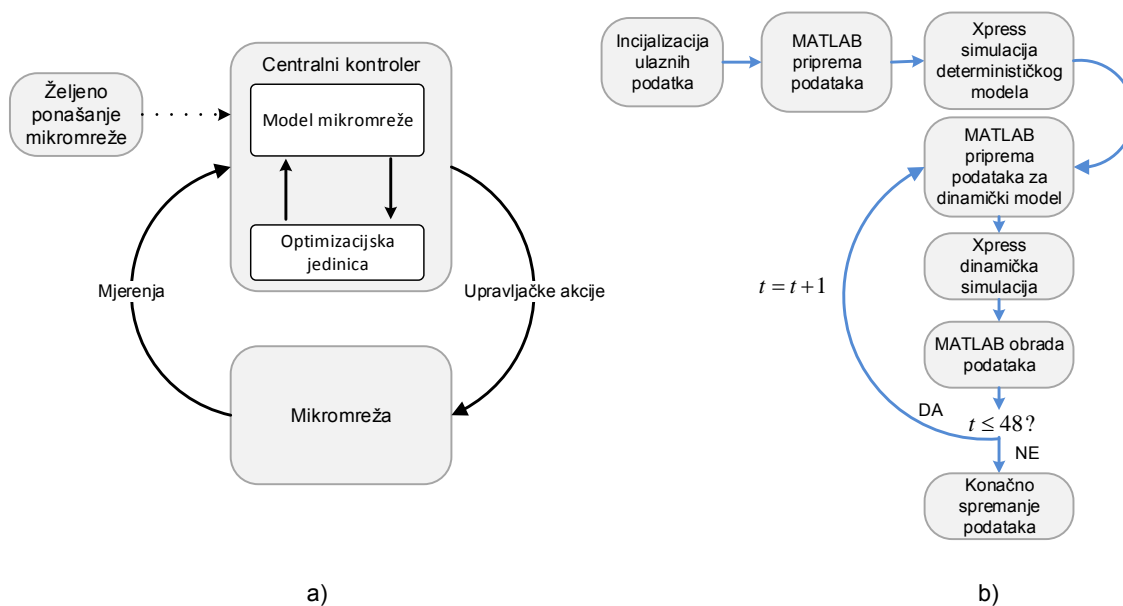
Rezultati determinističke simulacije su pokazali da modelirana mikromreža može raditi u otočnom pogonu uz vrlo male iznose neiskorištene energije. U slučaju sudjelovanja na tržištu koristi se primijenjeni varijabilni klizni upravljački algoritam za optimalnu raspodjelu snaga na agregatima kako bi se smanjilo odstupanje od najavljenih razmjena.

Kako je ranije spomenuto uveden je element nesigurnosti proizvodnje i potrošnje. Pogreška predviđanja danih veličina je na početku horizonta planiranja manja dok maksimalne amplitude doseže na njegovom kraju:

- Potrošnje el. energije $E_d(t,i) \rightarrow \pm 4\%$;
- Potrošnje toplinske energije $H_d(t,i) \rightarrow \pm 2\%$;
- Proizvodnja iz vjetra $E_w(t) \rightarrow \pm 16\%$;
- Proizvodnja iz sunca $E_{pv}(t) \rightarrow -90\%$ s vjerojatnošću tog događaja od 15%.

Ponašanje mikromreže se promatra sljedećim algoritmom (Slika 6):

1. Središnje upravljanje sakuplja sva predviđanja ($E_d, H_d, E_{pv}, E_{wind}$) i određuje optimalni rad mikromreže prema determinističkom proračunu. Planirana razmjena energije (za dan unaprijed) se šalje operatoru distribucijskog sustava i dalje služi kao referenca.
2. U prvom satu tekućeg dana centralni upravljački algoritam sakuplja osvježene prognoze za horizont planiranja (24 sata) i sukladno tome pokreće varijabilni klizni upravljački algoritam kako bi pronašao nove optimalne radne točke fleksibilnih jedinica mikromreže i minimizirao troškove. Pri tome se odstupanje od najavljenih razmjena u funkciji cilja kažnjava.
3. U sljedećem koraku simulacije optimizacija pomoću kliznog varijabilnog upravljanja se vrši ponovno sukladno najnovijim prognozama i ostvarenjima. Horizont planiranja se pomiče unaprijed.
4. Koraci 2 i 3 se iteriraju dok se ne dođe do kraja tekućeg dana $S = 24$, odnosno ne prođe 48 simulacijskih koraka/polusatnih perioda.



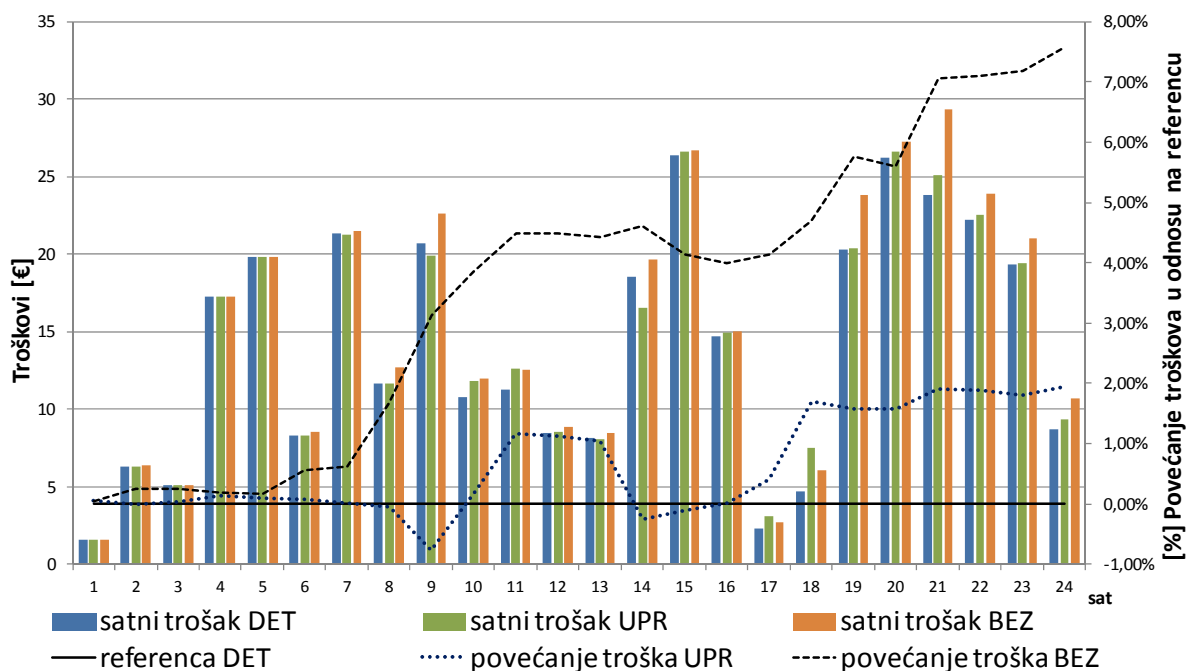
Slika 6 Varijabilni klizni upravljački algoritam: a) koncepcija upravljanja b) dijagram toka algoritma

Povećani troškovi u odnosu na determinističku referencu gdje su prognoze savršeno točne javljaju se zbog kažnjavanja odstupanja od najavljenih razmjena te zbog povećanih troškova pogona mikromreže (primjerice veći troškovi goriva bojlera i μ CHP jedinica).

Slika 8 prikazuje rezultate usporedbe troškova pogona za:

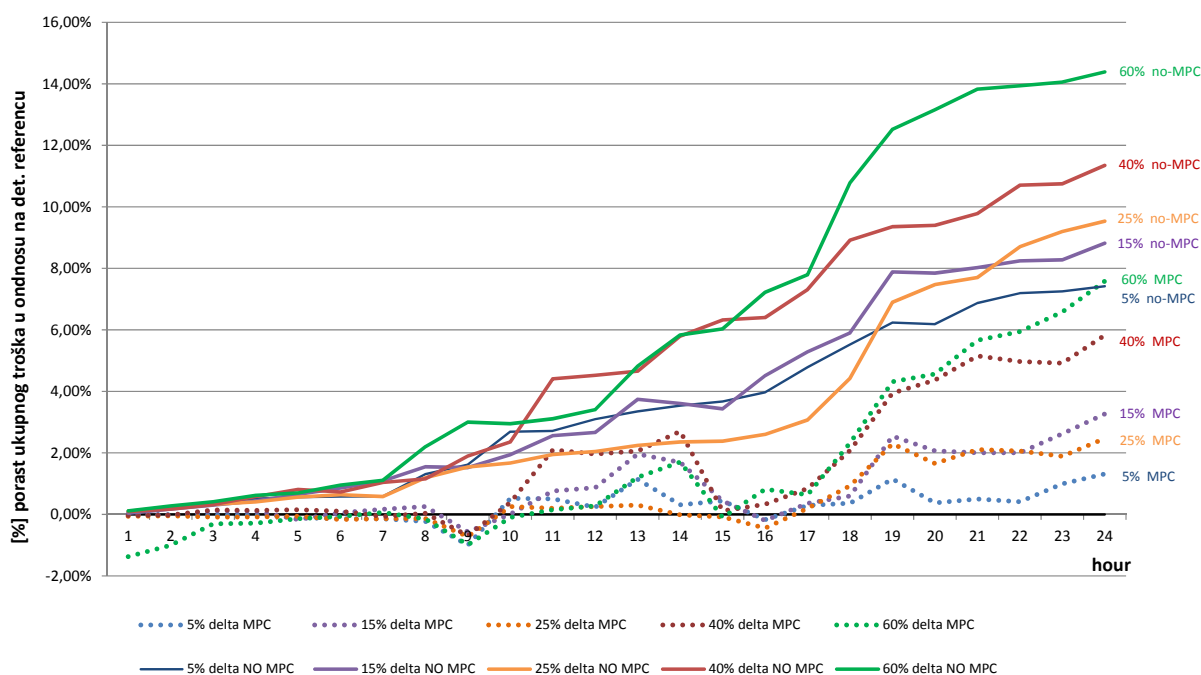
1. *Deterministički (DET)* – referentni slučaj;
2. *Bez upravljanja (BEZ)* – mikromreža radi kako je isplanirano dan unaprijed. Svaka promjena od prognoziranih vrijednosti uzrokuje odstupanje od najavljenih razmjena energije s ostatkom sustava;
3. *Varijabilni klizni upravljački algoritam (UPR)* – Mikromreža unutar jednoga dana prilagođava svoj rad svim odstupanjima

Primijenjeni upravljački algoritam smanjuje povećanje troškova pogona u odnosu na determinističku referencu. Troškovi su povećani za 2%, dok bi bez upravljanja porasli 8% (Slika 7). Za veće iznose ukupne pogreške u predviđanju i veće amplitude pogreške, razlike u troškovima su još izraženije.



Slika 7 Usporedba satnih troškova za jednostavno satno upravljanje (*BEZ*) i predloženi varijabilni klizni upravljački algoritam (*UPR*) za ukupnu dnevnu pogrešku od 1,5%

Nemogućnost točnog predviđanja vjetrova manifestira se kao značajni zahtjev za brzom promjenom snage te značajna potreba za proizvedenom energijom rezerve sustava. Robusni i fleksibilni odziv stoga može značajno smanjiti troškove pogona. Jednako tako, povećanjem maksimalne pogreške predviđanja vjetrova povećavaju se potencijalni benefiti predloženog algoritma (Slika 8)

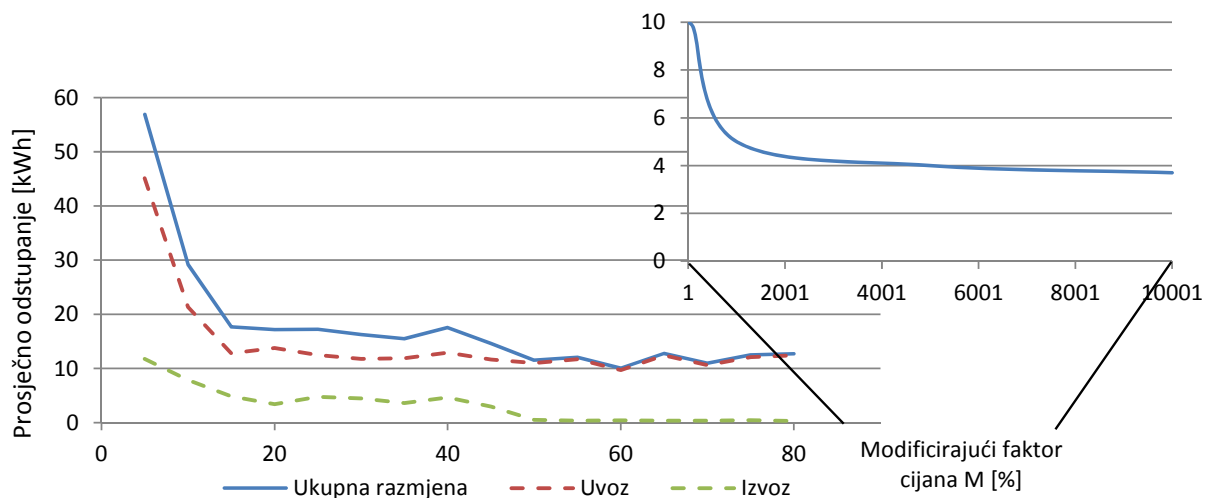


Slika 8 . Ponašanje varijabilnog kliznog upravljačkog algoritma za različite magnitude maksimalne pogreške u predviđanju vjetrova ($\pm 5\%$, $\pm 15\%$, $\pm 25\%$, $\pm 40\%$ and $\pm 60\%$)

Kako je već spomenuto u tekstu u slučaju odstupanja od najavljenih rasporeda razmjena trgovanje se odvija prema modificiranim cijenama u odnosu na tržišnu cijenu. Ako su razlike u cijeni male mikromreža kao entitet koji nastupa na tržištu neće biti dovoljno stimulirana kako bi pružila potrebne usluge. Analiza osjetljivost (Slika 9) mogućnosti praćenja najavljenih uvoza/izvoza u ovisnosti o širokom rasponu modificirajućeg faktora cijene koji utječe na cijenu na način prikazan formulom (3) pokazuje da

mikromreža može značajno smanjiti odstupanje (na razinu ispod 0,01% ukupno potrebne električne energije) iako u postojećoj konfiguraciji ga ne može u potpunosti ukloniti.

$$COST = \dots + \left[\begin{aligned} &(-)short_{imp}(t) \cdot (100\% - M) \cdot c_{mcp}(t) + long_{imp}(t) \cdot (100\% + M) \cdot c_{mcp}(t) + \\ &short_{exp}(t) \cdot (100\% + M) \cdot c_{mcp}(t) - long_{exp}(t) \cdot (100\% - M) \cdot c_{mcp}(t) \end{aligned} \right] + \dots \quad (3)$$



Slika 9 . Prosječno odstupanje od najavljenih razmjena u ovisnosti u modificirajućem faktoru M

7. ZAKLJUČAK

U referatu je ukratko objašnjena ideja integracije obnovljivih izvora energije pomoću mikromreža. Preduvjet za to je ostvarivanje određene razine fleksibilnosti u pogonu te su stoga ukratko opisani elementi koji omogućavaju takvo pozitivno djelovanje. Ostvarivanje fleksibilnosti pogona nije moguće bez učinkovitog upravljanja. U općenitom konceptu upravljanja ovdje razmatrani model spada pod upravljanje viših razina na kojima se obavlja optimizacija rada cjelovite mikromreže te na kojima se upravljanja sudjelovanjem na tržištu električne energije.

Unutar opisanih okvira izrađen je mješovito cjelobrojni linearni model koji za cilj ima pronaći optimalnu konfiguraciju mikromreže, odnosno istražiti kako instalirane veličine pojedinih elemenata mikromreže utječu na mogućnost ostvarivanja fleksibilnog pogona. U konačnici je istraženo na koji način element nesigurnosti ostvarenja prognoziranih iznosa potrošnje/proizvodnje utječe na pogon mikromreže. Kako bi se taj utjecaj smanjio razvijeni model je upotpunjen varijabilnim kliznim upravljačkim algoritmom koji ima za cilj optimirati rad mikromreže u takvom stohastičkom okruženju.

8. LITERATURA

- [1] M. G. Pollit, "The future of electricity (and gas) regulation in a lowcarbon policy world," Energy J., vol. 29, pp. 63–94, 2008
- [2] P. Siano, "Assessing the Impact of Incentive Regulation for Innovation on RES Integration" IEEE Transactions on Power Systems., vol. 29, pp. 2499–2508, 2014.
- [3] L. Baringo and A. J. Conejo, "Wind power investment within a market environment," Appl. Energy, vol. 88, no. 9, pp. 3239–3247, 2011
- [4] A. Piccolo and P. Siano, "Evaluating the impact of network investment deferral on distributed generation expansion," IEEE Trans. Power Syst., vol. 24, no. 3, pp. 1559–1567, 2009.
- [5] S. J. Kazempour, A. J. Conejo, and C. Ruiz, "Strategic generation investment using a complementarity approach," IEEE Trans. Power Systems., vol. 26, no. 2, pp. 940–948, 2011.
- [6] R. Hidalgo, C. Abbey and G. J. Joos, "Technical and economic assessment of active distribution network technologies", IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-6, 2011.
- [7] R. Cossent, T. Gómez, and P. Frías, "Towards a future with large penetration of distributed generation: Is the current regulation of electricity distribution ready? Regulatory recommendations under a European perspective," Energy Policy, vol. 37, no. 3, pp. 1145–1155, 2009

- [8] K. Dietrich, J. M. Latorre, L. Olmos and A. Ramos, "SDemand Response in an Isolated System With High Wind Integration," IEEE Trans. Power Systems., vol. 27, no. 1, pp. 20–29, 2012.
- [9] C. Weber, N. Shah, "Optimization based design of a distric energy system for an eco-town in the Unitited Kingdom", Energy, vol. 36, pp. 1292-1308, 2011.
- [10] N. Hatziaergyriou, H. Asano, R. Iravani, and C. Marnay, , "Microgrids", IEEE Power & Energy Magazine, 2007.
- [11] B. Lasseter, "Microgrids [distributed power generation]", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, pp. 146-149, 2001.
- [12] B. Kroposki, T. Basso, R. De Blasio, "Microgrid standards and technologies", IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2008
- [13] K. Heussen, S. Koch, A. S. Ulbig, G. Andersson. "Energy Storage in Power System Operation: The Power Nodes Modeling Framework", Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), Gothenburg, Sweden, 2010, pp. 1-8
- [14] E. Lannoye, D. Flynn and M. O'Malley, "Evaluation of power system flexibility", IEEE Trans. Power Systems, vol. 27, pp. 922-931, 2012.
- [15] N. Holjevac; T. Capuder; I. Kuzle, „Adaptive Control for Evaluation of Flexibility Benefits in Microgrid Systems“, Energy, vol. 92, Part 3, December 2015, pp. 487-504
- [16] "FICO Xpress", Siječanj 2016, [online - <http://www.fico.com/>]
- [17] „MATLAB“, Siječanj 2016, [online - www.mathworks.com /]
- [18] "Electricity Balancing Significant Code Review - Final Policy Decision", November 2014, [online-
https://www.ofgem.gov.uk/publications-and_updates/electricity-balancing-significant-code-review-final-policy-decision]