

Ekonomski dispečing jednostavne pametne mreže s jednim generatorom

Kovačević, Tomislav

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:142646>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-10**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH
TEHNOLOGIJA OSIJEK

Sveučilišni studij

EKONOMSKI DISPEČING JEDNOSTAVNE PAMETNE
MREŽE SA JEDNIM GENERATOROM

Diplomski rad

Tomislav Kovačević

Osijek, 2018.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Osijek, 21.09.2018.

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Ime i prezime studenta:	Tomislav Kovačević
Studij, smjer:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D 1010a, 20.09.2017.
OIB studenta:	04211901452
Mentor:	Doc.dr.sc. Danijel Topić
Sumentor:	Matej Žnidarec
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	Doc.dr.sc. Goran Knežević
Član Povjerenstva:	Matej Žnidarec
Naslov diplomskog rada:	Ekonomski dispečing jednostavne pametne mreže s jednim generatorom
Znanstvena grana rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	U uvodnom dijelu diplomskog rada definirati osnovne pojmove vezane uz pametne mreže. Opisati tehnologije pametnih mreža. Opisati princip rada pametnih mreža uključujući upravljanje opterećenjem, osnove uređaje koje pametna mreža koristi kao i različite vrste distribuirane proizvodnje. Napraviti ekonomski dispečing jednostavne pametne mreže s jednim generatorom. Dati zaključna razmatranja i analize. Sumentor: Matej Žnidarec, mag.ing.
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	21.09.2018.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 27.09.2018.

Ime i prezime studenta:

Tomislav Kovačević

Studij:

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

Mat. br. studenta, godina upisa:

D 1010a, 20.09.2017.

Ephorus podudaranje [%]:

9

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Ekonomski dispečing jednostavne pametne mreže s jednim generatorom**

izrađen pod vodstvom mentora Doc.dr.sc. Danijel Topić

i sumentora Matej Žnidarec

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. DEFINICIJA OSNOVNIH POJMOVA VEZANIH UZ PAMETNE MREŽE	2
2.1. Glavne primjene pametnih mreža.....	5
3. TEHNOLOGIJE I FUNKCIONIRANJE PAMETNIH MREŽA	6
3.1. Funkcioniranje pametne mreže.....	7
3.2. Odgovor na potražnju	8
3.3. Uređaji u pametnim mrežama.....	9
3.4. Distribuirana proizvodnja električne energije	10
3.4.1. Motor s unutrašnjim izgaranjem	11
3.4.2. Fotonaponska elektrana	11
3.4.3. Vjetroelektrane.....	11
3.4.4. Gorivna ćelija.....	12
3.4.5. Mikroturbine	12
3.4.6. Kogeneracija	12
3.4.7. Distribuirano upravljanje energijom	13
3.5. Tehnologija skladištenja energije	13
3.5.1. Baterije.....	13
3.5.2. Spremnici iduktivne energije	14
3.5.3. Zamašnjaci	14
3.5.4. Komprimirani zrak.....	15
3.5.5. Ultrakondenzatori	15
3.5.6. Crpno akumulacijska hidroelektrana	16
3.6. Električna vozila	16
3.7. Pametna brojila.....	17
4. EKONOMSKI DISPEČING JEDNOSTAVNE PAMETNE MREŽE SA JEDNIM GENERATOROM	19

4.1. Proračun jednostavne pametne mreže sa jednim generatorom i jednim sustavom za pohranu energije	24
5. ZAKLJUČAK	33
POPIS LITERATURE I DRUGIH IZVORA INFORMACIJA	34
SAŽETAK.....	36
ŽIVOTOPIS	37

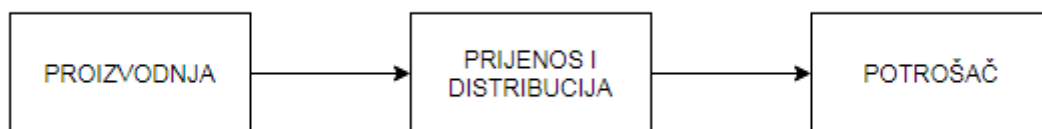
1. UVOD

Infrastruktura trenutne mreže slabo se mijenjala otkako je izgrađena, iako je još uvijek funkcionalna, potrebno ju je unaprijediti. Tehnološki napredak utjecao je na naš način života i samim time potreba za energijom dolazi sve više do izražaja. Činjenica je da se energija još uvijek dobiva iz ograničenih i ekološki neprihvatljivih izvora fosilnih goriva. Stvaranjem nove mrežne infrastrukture, takozvane pametne mreže (engl. *Smart Grid*) integrirali bi obnovljive izvore električne energije u elektroenergetski sustav. Samim time implementacijom pametne mreže došlo bi do unapređenja tako da klasična mreža funkcionira na nešto drugačiji, stabilniji i precizniji način nego što je sada.

U prvom dijelu definirat ćemo osnovne pojmove vezane uz pametnu mrežu, glavne primjene i objasniti osnovnu razliku između trenutne i pametne mreže. U drugom dijelu opisane su tehnologije i funkcioniranje pametnih mreža, uređaji u pametnim mrežama, tehnologije skladištenja energije. U trećem dijelu opisat će se ekonomski dispečing jednostavne pametne mreže sa jednim generatorom te na primjeru prikazati promjenu snage generatora i baterije sa različitim opterećenjima tijekom promatranog perioda.

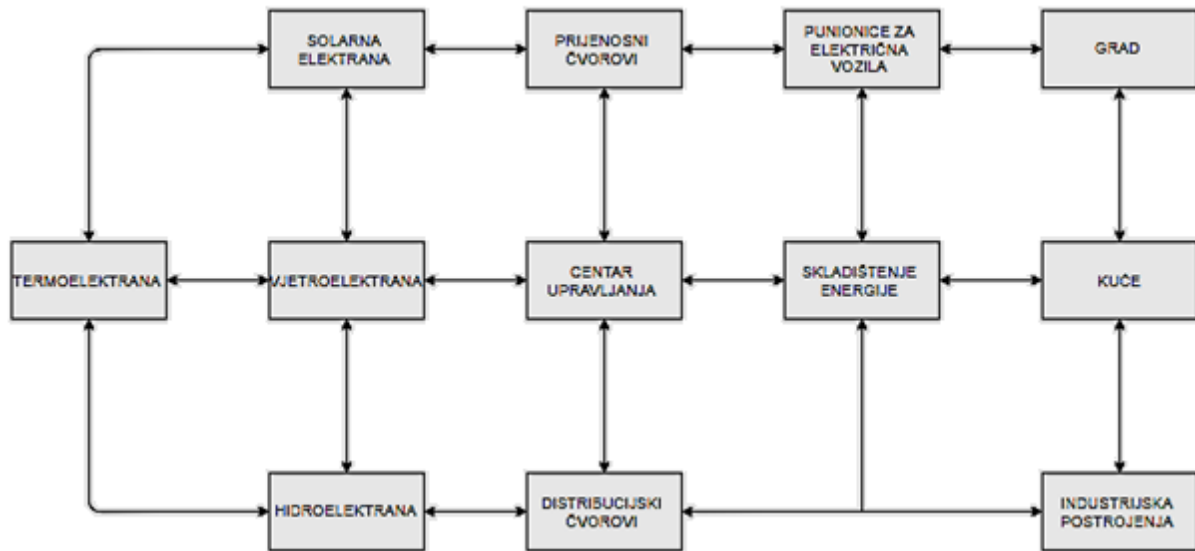
2. DEFINICIJA OSNOVNIH POJMOVA VEZANIH UZ PAMETNE MREŽE

Sam dizajn današnje elektroenergetske mreže karakteriziran je jednosmjernim tokom električne energije i jednostavnim interakcijama. Takav sustav obuhvaća proizvodnju, prijenos i distribuciju prema potrošačima, a sastoji se od elektrana, transformatorskih stanica, vodova za prijenos i distribuciju te uređaja za potrošnju električne energije (slika 2.1.). Glavna zadaća elektroenergetskog sustava je pouzdana i kvalitetna opskrba električnom energijom, što znači da u svakom trenutku ponuda i potražnja električne energije mora biti ujednačena. Zbog vrlo ograničenih mogućnosti za skladištenje većih količina energije, proizvodnja mora biti izjednačena sa potrebama potrošnje u svakom trenutku. Količina potrošnje električne energije varira od najveće koja nastupa u popodnevnim i ranim večernjim satima te najmanje potrošnje u kasnim večernjim satima. Ovisnost snage potrošača u vremenu prikazuje se dnevnim dijagramom opterećenja. Zadaća elektroenergetskog sustava je i osiguranje kvalitete električne energije, što podrazumijeva održavanje frekvencije i električnog napona u određenim granicama. Državna i područna dispečerska središta zadužena su za upravljanje i nadzor elektroenergetskog sustava. Na osnovu prikupljenih podataka izrađuje se “vozni red “ elektrana sa kojim se određuje koje će elektrane biti u pogonu, kako osigurati jednolikost napona, koja će elektrana regulirati frekvenciju, njihov način rada itd. Upravljanje i nadzor sustava su automatizirani te funkcioniraju uz pomoć podsustava telekomunikacije, informatike, električne zaštite i mjerenja. Takva infrastruktura neće biti u mogućnosti zadovoljiti sve većim zahtjevima potrošača [22]. Potrošnja električne energije je sve veća, a samim tim i opterećenje na distribucijskoj mreži. Uslijed tih razloga radi zadržavanja sigurnosti opskrbom i kvalitetom električne energije potreban je napredak tehnologije i način upravljanja mrežom.



Slika 2.1. Prikaz današnjeg elektroenergetskog sustava

S druge strane, na slici 2.2. prikazana je pametna mreža. Infrastrukturu takve mreže karakterizira dvosmjernan tok električne energije sa interakcijama između više vrsta korisnika, pametni mjerni uređaji i uređaji za skladištenje električne energije.



Slika 2.2. *Infrastruktura pametne mreže*

Pametna mreža će i dalje zavisiti od velikih termo, hidro, i nuklearnih elektrana ali će uključiti znatno veći broj uređaja za skladištenje električne energije, integrirati obnovljive izvore energije naročito u distributivnim mrežama i veću primjenu električnih automobila. Sukladno sa tim dobili bi smo puno bolju funkcionalnost elektroenergetskog sustava. U ovakvom sustavu posebno mjesto zauzimaju senzori, komunikacijska podrška i tehnike mjerenja, u stvarnom vremenu što znači da pametna mreža ima mogućnost nadgledanja status napajanja svih uređaja, kontrolira uređaje, i da se prilagodi potrebama tržištu električne energije. Automatizacija omogućuje praćenje i kontrolu svih mrežnih čvorišta i korisnika kako bi se osigurao dvosmjernan protok informacija i električne energije iz elektrane prema svim čvorištima tijekom prijenosa i distribucije. Samim time dolazi do poboljšanja pouzdanosti, sigurnosti, energetske i financijske efikasnosti i pri tome je ekološki prihvatljivije [5].

Temeljne razlike između današnjih distribucijskih i pametnih distribucijskih mreža sažete su u tablici 2.3.

Tablica 2.3. Usporedba današnje distribucijske i pametne distribucijske mreže [16]

	DANAŠNJA DISTRIBUCIJSKA MREŽA	PAMETNA DISTRIBUCIJSKA MREŽA
KOMUNIKACIJA	JEDNOSMJERNA	DVOSJMERNA
INTERACIJA SA KORISNICIMA	OGRANIČENA	OPSEŽNA
MJERENJE	ELEKTROMEHANIČKO	DIGITALNO
UPRAVLJANJE	RUČNO	DALJINSKO
ODRŽAVANJE	PERIODIČNO	PREMA POTREBI
PROIZVODNJA	CENTRALIZIRANA	CENTRALIZIRANA I DISTRIBUIRANA
KONTROLA TOKOVA SNAGA	OGRANIČENA	SVEOBUHVAATNA
POUZDANOST	SKLONA KVAROVIMA I KASKADNIM PREKIDIMA	PROAKTIVNA, PREDVIĐANJA U STVARNOM VREMENU
PONOVNO UKLJUČENJE	RUČNO	SAMOSTALNO

Osim toga, napredna mjeriteljska infrastruktura, (engl. *Advanced Metering Infrastructure* - AMI) također je važna. To je sučelje između doma ili krajnjeg korisnika i pametne mreže. AMI tehnologija koristi daljinsko dvosmjernu bežičnu komunikaciju za preuzimanje informacija o potrošnji električne energije potrošača na čestim intervalima od električnih pametnih brojlara kupaca. Sustav za upravljanje podatkovnim mjerama prima i sprema podatke za analizu i korištenje drugih sustava, kao što su informacije o kupcu i naplate, upravljanja nestancima napajanja, učitavanja i planiranja sustava isporuke. Sve je to povezano s pametnom mrežom [1].

Prema [2] pametna mreža se definira kao:

- Europska tehnološka platforma (engl. *The European Technology Platform*) definira pametnu mrežu kao mrežu električne energije koja može inteligentno integrirati radnje svih korisnika koji su s njom povezani.
- Prema Američkom odjelu za energiju (engl. *Department of Energy* - DOE) predviđa se potpuno automatizirana mreža za isporuku električne energije koju nadzire i kontrolira

svaki kupac i čvor, osiguravajući dvosmjerni protok podataka i električne energije između elektrane, uređaja i svih točaka između.

- Institut za istraživanje potencijala električne energije (engl. *Electric Power Research Institute* - EPRI) u Americi definira pametnu mrežu kao modernizaciju sustava za isporuku električne energije tako da prati štiti i automatski optimizira radne elemente od centralnog i distribuiranog generatora kroz visokonaponsku mrežu i distribucijski sustav prema industrijskim postrojenjima i sustavima za automatizaciju zgrada do uređaja za skladištenje energije i krajnjih potrošača i njihovih termostata, električnih vozila, i drugih kućanskih uređaja.

2.1. Glavne primjene pametnih mreža

Pametne mreže su složeni sustavi, a njihove glavne karakteristike su:

- Sudjelovanje potrošača: omogućava i motivira aktivno sudjelovanje potrošača.
- Prilagođavanje proizvodnje: prilagodit svu proizvodnju i opcije pohrane električne energije.
- Omogućavanje tržišta električne energije: omogućava nove proizvode, usluge i tržišta.
- Povećana učinkovitost u mrežnim operacijama.
- Optimiziranje sustava: djeluje učinkovito i optimizira korištenje postojećih i novih sustava.
- Samoiscjeljivanje: predviđa i odgovara sustavnim poremećajima sa samoiscjeljivanjem.
- Oduprijeti se napadu: djeluje prilagodljivo prema napadu i prirodnim nepogodama.

Pametna mreža podržava uvođenje novih tehnologija s dalekosežnim utjecajima, a to se odnosi na pružanje mogućnosti za sigurniju i kontroliraniju integraciju obnovljivih izvora energije. Kako bi smanjili potrošnju električne energije tijekom vršne potrošnje, komunikacijska i mjerna tehnologija informira pametne uređaje u kući, tvornici ili tvrtki kada je potražnja za energijom visoka i prate koliko se električne energije potroši. Krajnji će korisnik imati tendenciju koristiti energiju kada je najjeftinija, a proizvoditi je i prodavati kada su cijena i potražnja visoki. Kada krajnji korisnici vide izravne ekonomske koristi da postanu energetske učinkovitiji, to je vjerojatnije da će oni donijeti mudre odluke o potrošnji [1].

3. TEHNOLOGIJE I FUNKCIONIRANJE PAMETNIH MREŽA

Izrada pametne mreže zahtijevat će niz pouzdanih tehnologija, koje uključuju integrirane komunikacijske sustave, senzore, napredna mjerila i uređaje za pohranu. Mnogi od njih već postoje, drugi se prilagođavaju za usklađivanje s modernom pametnom mrežom. Američki odjel za energiju (engl. *Department of Energy* - DOE) identificiralo je pet ključnih područja tehnologija za pametnu mrežu kako slijedi:

1. Integrirana komunikacija kako bi se omogućilo da svaki dio mreže "razgovara" i "sluša", to jest dvosmjernu komunikacijsku tehnologiju. Područja za poboljšanje uključuju automatizaciju podcentrale, odgovor na potražnju, automatizaciju distribucije, nadzor, kontrolu i prikupljanje podataka (SCADA), sustave upravljanja energijom, bežičnim mrežama i mrežama druge tehnologije, komunikacijska mreža snage i optička vlakna. Integrirana komunikacija omogućit će kontrolu u stvarnom vremenu, razmjenu informacija i podatka radi optimizacije pouzdanosti sustava, korištenja imovine i sigurnosti.

2. Senzorske i mjerne tehnologije kako bi imali brži i točniji odziv. Tehnologije očitavanja i mjerenja uključuju pametna brojila, oprema za očitavanje brojača, uređaj za mjerenje električnih valova (engl. *Phasor Measurement Units* – PMUs), naprednih prekidača i kabela te digitalnih zaštitnih releja. Posebno, pametna brojila, koja zamjenjuju analogna mehanička brojila, snimaju potrošnju u stvarnom vremenu. Širokopolasni sustav mjerenja (engl. *Wide Area measurement system* – WAMS) je mreža koja može pružiti praćenje u stvarnom vremenu na regionalnoj i nacionalnoj razini.

3. Napredne komponente primjenjuju najnovija istraživanja u supravodljivosti, elektronici, pohrani i dijagnostici. Inovacije u supravodljivosti, tolerancija kvarova, skladištenje, elektronici, i dijagnostičke komponente mijenjaju temeljne sposobnosti i značajke mreža. Slične tehnologije uključuju fleksibilne uređaje za prijenos izmjenične struje, visokonaponskih istosmjernih struja, prve i druge generacije supravodljivih vodiča, distribuirani uređaji za proizvodnju i skladištenje energije, kompozitnih vodiča i "inteligentnih" uređaja.

4. Napredne metode kontrole za praćenje, dijagnosticiranje i rješavanje bilo kojih događaja. Tehnološke kategorije za napredne metode kontrole su distribucijski inteligentni agenti (kontrolni sustavi), analitički alati (softverski algoritmi i računala s velikom brzinom) i operativne aplikacije (SCADA).

5. Poboljšana sučelja i podrška odlučivanju kako bi se unaprijedilo donošenje ljudskih odluka. Tehnologije uključuju vizualizacijske tehnike koje smanjuju velike količine podatka u lako razumljive vizualne formate, softverske sustave koji pružaju više opcije kada su potrebne akcije operatera sustava i simulatori za osposobljavanje i analiza "što-ako"[1].

3.1. Funkcioniranje pametne mreže

Pametna mreža je tipično pouzdana, sigurna, učinkovita, ekonomična, prihvatljiva za okoliš, i sigurna u najvećoj mogućoj mjeri. To je primjena tehnologija za sve aspekte sustava prijenosa i isporuke energije koji omogućuju bolji nadzor i kontrolu, te učinkovito korištenje sustava. Ciljevi upravljanja i rada pametne mreže su:

- za rješavanje izazova koji osiguravaju i omogućuju pouzdani rad pametnih mreža suočenih u budućnosti.
- razviti čvrstu interdisciplinarnu teoretsku osnovu koja podupire razvoj boljeg alata za planiranje, upravljanje i kontrolu mrežnih mreža međusobno povezanih na različitim naponskim razinama.
- inovacije u praćenju i kontroli distribucije električne energije.
- omogućiti potrošačima da reagiraju na mrežne uvjete čineći ih aktivnim sudionicima u njihovoj uporabi energije.
- iskoristiti konvencionalne izvore električne energije i nove tehnologije kada je to moguće uključujući distribuiranu proizvodnju, odgovor na potražnju i pohranu energije, za rješavanje izazova uvođenjem različitih obnovljivih izvora.

Za postizanje gore navedenih ciljeva zahtijeva se, s jedne strane, da se pametna mreža mora prilagoditi s proizvodnjom i mogućim pohranjivanjem uz dostupnost kad god i gdje god se zatraži, mehanizam za samoizlječenje, optimalno korištenje sredstava koja postiže visoku razinu učinkovitosti u radu, dok s druge strane, potrošač bi trebao dobiti kvalitetnu opskrbu električnom energijom. Opsežna uporaba digitalne tehnologije u smislu komunikacijskih i informacijskih tehnologija u stvarnom vremenu bitna je značajka za postizanje uspjeha u tom pitanju s obzirom na scenarij ponude potražnje točno u svakom trenutku.

Ključni čimbenik pametne mrežne operacije bit će distribuirana proizvodnja električne energije (engl. *Distributed Generation* - DG). DG koristi prednosti sustava distribuiranih izvora energije (engl. *Distributed energy resource* - DER) (npr. fotonaponski sustavi i mala vjetroturbina), koji su često generatori malih snaga (obično u rasponu od 3 do 10.000 kW), kako bi se poboljšala kvaliteta

i pouzdanost napajanja. Međutim, provedba DG u praksi nije jednostavna stvar. Ponajprije, distribuirana proizvodnja uključuje velike implementacije za proizvodnju energije iz obnovljivih izvora, kao što su sunce i vjetar. Djelovanje obnovljivih izvora energije podliježe do širokih oscilacija. Potrebna je precizna prognoza vjetra ili sunca. Nadalje, sa današnjim tehnologijama, uobičajeni troškovi rada distribuiranih generatora za stvaranje jedne jedinice električne energije su visoki u usporedbi s onima tradicionalnih velikih centralnih elektrana. Razvoj i implementacija DG dalje dovodi do koncepta, virtualne elektrane (engl. *Virtual Power Plant* - VPP), koji upravlja velikom grupom distribuiranih generatora s ukupnom instaliranom snagom usporedivo s konvencionalnim elektranama. Ovaj skup distribuiranih generatora zajednički upravlja centralni kontroler. Usklađen način rada pruža dodatne prednosti kao što je mogućnost isporuke električne energije pri vršnom opterećenju. Takav VPP može zamijeniti konvencionalnu elektranu pružajući veću učinkovitost i veću fleksibilnost [1].

3.2. Odgovor na potražnju

Odgovor na potražnju (engl. *Demand Response* - DR) obuhvaća mnoge akcije na razini korisnika koji mogu pomoći ujednačiti oblik krivulje potrošnje električne energije i smanjiti potrošnju energije. Postoje dva problema: jedan je smanjenje vršnog opterećenja kako bi sustav radio učinkovitije, i istodobno upotrebljavajući uštedenu energiju postavljanjem potražnje kako bi se smanjila ukupna potražnja za električnom energijom. Stoga, odgovor na potražnju ima dvije komponente. Jedan je komponenta opterećenja ili kilovat komponenta, koja primjenjuje odgovor na potražnju kako bi se smanjilo vršno opterećenje. Drugi je energetska komponenta ili komponenta kilovat sata, koja se primjenjuje na odgovor potražnje za uštedu energije, korištenjem manje energije ili pomoću učinkovitijih uređaja.

Formalna definicija odgovora na potražnju daje „*US Federal Energy Regulatory Commission*“ (*FERC*). Prema *FERC*-u, odgovor potražnje je smanjenje u potrošnji električne energije od strane kupaca iz njihove očekivane potrošnje kao odgovor na povećanje cijene električne energije ili na isplatu poticaja dizajniran da potakne nižu potrošnju električne energije.

Definicija odgovora na potražnju malo je drugačija od one na strani potražnje upravljanja (engl. *Demand Side Management* – DSM). U scenariju DSM, opterećenje je pod kontrolom elektroprivrede. Jednom kada klijent pristane da elektroprivreda kontrolira njihovo opterećenje, klijent gubi kontrolu i oni mogu npr. isključiti vodu na 30 minuta, promijeniti postavku temperature termostata klima uređaja ili isključiti klima uređaj za pola sata ili 10 minuta. Tako kupac nema kontrolu nakon što su dali suglasnost elektroprivrednoj tvrtki da kontrolira

opterećenje. S druge strane, u konceptu odgovora na potražnju, kupac ima punu kontrolu. Oni će odlučiti koje opterećenje će kontrolirati koliko dugo, ovisi o poticaju koji oni dobivaju i kakva je njihova situacija kod kuće ili na poslu kako bi izvršili kontrolu.

Potrebe za odgovorima na potražnju su potrebe voznog reda infrastrukture, koje uključuju pametne uređaje i upravljačke sustave koji mogu prikupljati podatke, prezentirati ih korisniku i zatim poslati svoje odluke natrag elektroprivredi. Takve tehnologije su:

- Sustavi automatizacije zgrada – sastoje se od softvera i hardvera potrebnog za praćenje i kontroliranje mehaničkih sustava za grijanje i hlađenje te sustava osvjetljenja u zgradama koji također mogu uzajamno djelovati s pametnim mrežnim tehnologijama.
- kućna mreža – slično kao sa zgradama, osim sto za kuću gdje uređaji komuniciraju s pametnom mrežom za primanje i prikazivanje potrošnje energije i troškova, treba omogućiti korisnicima energije smanjenje ili pomicanje njihove uporabe i priopćiti te odluke dispečerima [1].

3.3. Uređaji u pametnim mrežama

Pametna mreža obećava poboljšanje kvalitete, otpornosti i integriteta mreže kroz optimizaciju postojeće infrastrukture za isporuku energije i integraciju novih obnovljivih izvora energije. Stoga pametna mreža zahtijeva neprimjetno integrirane proizvode i usluge kako bi pružili najviši mogući učinak. Uz sve vrste pametnih uređaja, elektroprivreda može odabrati i pouzdano koristiti proizvode koje žele znajući da će sve djelovati zajedno kako treba. Glavni uređaji koji se koriste u pametnoj mreži uključuju:

- Napredni mjerni uređaji (engl. *Advanced metering devices*) – Pametna brojila se često koriste kao polazište za implementaciju pametne mreže. Napredni mjerni uređaji podržavaju prikupljanje podataka za procjenu ispravnosti, integriteta mreže i podržavaju automatsko očitavanje brojila u svrhu naplate i sprečavanja krađe električne energije.
- Integrirani komunikacijski uređaji (engl. *Integrated communications devices*) – To uključuje prikupljanje podataka, zaštitu, kontrolu i omogućuje korisnicima interakciju s inteligentnim elektroničkim uređajima u integriranom sustavu.
- Uređaji za kućnu mrežu (engl. *Home Area Network - HAN*) - Primarni element pametne mreže je poboljšane komunikacijske mogućnosti koje omogućuju bolje upravljanje potrošačima potrošnjom električne energije i troškovima putem novih pametnih uređaja i uređaja koji se nalazi u prostorijama klijenta.

- Uređaji u kući (engl. *In-home devices*)– Uključuje komuniciranje termostata, prekidače kontrole opterećenja i stanice za punjenje električnih vozila (engl. *Electric Vehicle - EV*) koje pomažu potrošačima upravljati svojim korištenjem energije.
- Mrežna infrastruktura (engl. *Network infrastructure*) - Obuhvaća mreže rutera i signalne repetitore, koji omogućuju korisnicima ekonomski učinkovito povezivanje mrežnih uređaja. Osim toga, kako se pametna mreža proširuje na domove i tvrtke, bežični senzori i mobilni uređaji postaju važni elementi u praćenju i upravljanje potrošnjom električne energije.
- Geografski informacijski sustav (engl. *Geographic Information System - GIS*) – S obećanjima pametne mreže o pouzdanijem, snažnijem sustavu isporuke električne energije dolazi virtualna reprezentacija tog sustava koji se koristi za donošenje operativnih odluka. Izvor baznih podataka za to virtualno predstavljanje je GIS. GIS mora biti u stanju efikasno i učinkovito eksportirati tražene podatke na sustave koji ih trebaju, poželjno u obliku koji se lako importira od tih sustava primanja.
- Uređaji za pohranu energije (engl. *Energy storage devices*) - Skladištenje energije vrši se pomoću uređaja ili fizičkog medija koji pohranjuje energiju za iskorištavanje u kasnijem vremenu[1].

3.4. Distribuirana proizvodnja električne energije

Distribuirana proizvodnja znači da su energetske izvori široko rasprostranjeni i ta se snaga generira blizu mjesta gdje se koristi. Većina obnovljivih izvora kao što su sunčeva energija i energija vjetera koriste se za distribuiranu proizvodnju električne energije. Obnovljiva energija i tehnologije distribuirane proizvodnje vrlo su važni za rad pametne mreže.

Pristup energiji, energetska sigurnost, ublažavanje siromaštva, i razlozi za zaštitu okoliša, u kombinaciji s povećanjem cijena fosilnih goriva, su ključni čimbenici za ubrzanje usvajanja pristupačne i pouzdane distribuirane proizvodnje iz obnovljivih izvora energije.

Općenito, distribuirana proizvodnja povezana je s mrežom kroz distribucijski sustav. Takav sustav koji je povezan s mrežom može učiniti cjelokupnu mrežu sigurnijom jer se manje oslanjanja na bilo koji određeni izvor električne energije u sustavu. Uz nekoliko manjih distribuiranih izvora, ako nešto pođe krivo, lakše je da drugi izvor uskoči i popuni manjak. To je bitno za mnoge tehnologije obnovljive energije kao što su solarna energija i energija vjetera koje proizvode ne kontinuiranu energiju kao i za druge tehnologije koje je možda potrebno isključiti zbog periodičnog održavanja.

Budući da se distribuirana proizvodnja obično nalazi u blizini opterećenja korisnika, to može dovesti do smanjenja broja prijenosnih i distribucijskih vodova koje treba nadograditi ili izgraditi. Očito, samim time može doći i do smanjenja gubitaka kod prijenosa i distribucije. Distribuirana proizvodnja ima potencijal da ublaži zagušenja u prijenosu i smanji utjecaj fluktuacije cijena električne energije, jačanje energetske sigurnosti te pružiti veću stabilnost pametnoj mreži.

Distribuirana proizvodnja obuhvaća širok spektar tehnologija, uključujući fotonaponske sustave, vjetroturbine, gorivne ćelije, mikroturbine, klipne motore, tehnologije smanjenja opterećenja i sustava za pohranu električne energije. Učinkovito korištenje mrežom spojeni distribuirana proizvodnja također može zahtijevati elektronička sučelja i komunikacijske i upravljačke uređaje za učinkovitu otpremu i rad proizvodnih jedinica. Sažete su glavne tehnologije distribuirane proizvodnje u narednom tekstu [1].

3.4.1. Motor s unutrašnjim izgaranjem

Motor s unutrašnjim izgaranjem, također poznat kao klipni motor, je toplinski motor koji koristi jedan ili više klipova za pretvaranje tlaka u rotacijski pokret. Dizelski ili benzinom pogonjeni motori danas spadaju u jedne od najčešćih izvora distribuirane energije, posebice kada treba brzo uskočiti u pogon u slučaju nekog ispada u sustavu. Međutim, stvara značajno onečišćenje u smislu emisije i buke [1].

3.4.2. Fotonaponska elektrana

Posljednjih godina naglo je porasla proizvodnja električne energije iz fotonaponskih sustava zbog rastuće potrebe za obnovljivim izvorima. Fotonaponska elektrana poznata kao i solarni park veliki je fotonaponski sustav koji omogućuje izravnu pretvorbu sunčeve energije putem fotonaponskih modula u električnu. U Europi se koriste mrežni sustavi sa inteligentnim pretvaračem, koji uz veliku pogonsku sigurnost priključuje sustav na električnu mrežu. Karakteristika takvog pretvarača je da usklađuje električnu energiju proizvedenu od fotonaponskog sustava sa parametrima mreže i da u slučaju nestanka električne energije isključuje sustav s mreže [18].

3.4.3. Vjetroelektrane

Vjetroelektrana predstavlja niz vjetroagregata istog tipa smještenih u neposrednoj blizini i priključeni su zajedničkim rasklopnim uređajem na elektroenergetski sustav. Vjetroturbina pretvara kinetičku energiju vjetra u mehaničku, a zatim u električnu posredstvom električnih generatora. Pri tome se rotor električnog generatora i rotor vjetroturbine nalaze na istom vratilu.

Istosmjerni se generatori uglavnom upotrebljavaju u samostalnim vjetroelektranama, a izmjenični u onima koje su spojene na elektroenergetski sustav. Vjetroelektrana predstavlja obnovljiv izvor energije pokretan kinetičkom energijom vjetra. Osnovni dijelovi su rotor s lopaticama, kućište koje štiti generator od utjecaja okoline te radi smanjenja buke, generatorom i drugom opremom koje su uz pomoć okretnog ležaja pričvršćene na vrhu nosivog stupa. Prednosti vjetroelektrana su da koriste vjetar koji je obnovljiv, dostupan i čist izvor energije, ne zagađuju okoliš. Zbog vjetra kojemu brzina često varira vjetroelektrane se ne mogu koristiti kao glavni proizvođač električne energije te je potrebno akumuliranje energije ili dopuna iz drugih elektrana elektroenergetskog sustava [19] [20].

3.4.4. Gorivna ćelija

Gorivna ćelija je elektrokemijski uređaj koji proizvodi električnu struju kroz kemijsku reakciju u gorivu. Stvara električnu energiju unutar ćelije reakcijom između goriva i oksidansa, potaknutog uz prisutnosti elektrolita. Gorivna ćelija može raditi kontinuirano sve dok se održavaju potrebni tok reaktanata i oksidansa. Glavna primjena im je da služe kao izvor energije u svemirskim letjelicama, i istražuju se mogućnosti primjene za pogon automobila te za napajanje kućanskih aparata i elektroničkih uređaja. Većina gorivnih ćelija trenutno koristi prirodni plin, koji se ne može obnoviti. Efikasnost gorivnih ćelija doseže do 60% [17].

3.4.5. Mikroturbine

Mikroturbina je mala turbina (oko veličine hladnjaka, općenito snage manje od 300 kW), koja proizvodi i električnu i toplinsku energiju. One su jedna od obećavajućih tehnologija za napajanje hibridnih električnih vozila. Same veličine mikroturbina kreću se od manjih jedinica koje proizvode manje od kilovata, do komercijalnih sustava koji proizvode desetke ili stotine kilovata. One mogu raditi na neobnovljivim gorivima kao što je prirodni plin, ali isto tako mogu koristiti otpadna goriva [1].

3.4.6. Kogeneracija

Kogeneracija (engl. *Combined Heat and Power* – CHP) je istovremena proizvodnja toplinske i električne energije. Konvencionalna proizvodnja električne energije je neučinkovita, koristeći samo jednu trećinu potencijala energije goriva. U primjenama gdje je potrebno grijanje ili hlađenje, ukupna učinkovitost zasebnih toplinskih i energetske sustava i dalje je samo oko 45%, usprkos većoj učinkovitosti opreme za pretvorbu topline.

Kogeneracijski sustavi hlađenja, grijanja i električne energije su značajno učinkovitiji. CHP tehnologije proizvode i električnu energiju i toplinsku energiju iz jednog izvora energije. Ti sustavi oporavljaju toplinu koja bi inače bila izgubljena u generatoru električne energije, a zatim ju iskoriste za izradu sljedećeg: pare, vruće vode, grijanja prostora, kontrole vlage ili hlađenja. Nedavni tehnološki napredci rezultirali su razvojem dometa učinkovitih i raznovrsnih sustava za industrijske i druge primjene. Posebno, uz široku primjenu obnovljivih izvora danas, CHP tehnologije postaju sve važnije [1].

3.4.7. Distribuirano upravljanje energijom

Distribuirane tehnologije upravljanja energijom uključuju uređaje za pohranu energije i različite metode za smanjenje ukupnog električnog opterećenja. Tehnologije skladištenja energije ključne su za postizanje razina kvalitete energije i pouzdanost *high-tech* industrije. Skladištenje energije je važno za ostale distribuirane energetske uređaje dajući im više mogućnosti opterećenja, te također podržavaju obnovljive tehnologije kao što su vjetar i solarna energija. U pametnoj mreži, smanjenje električnog opterećenja može se postići poboljšanjem učinkovitosti opreme i uređaja ili prijelazom na alternativni izvor energije - grijanje vode ili zgrade interijera sa toplinom iz zemlje ili sunca [1].

3.5. Tehnologija skladištenja energije

Skladištenje električne energije je vrlo stari koncept, iako nije prepoznat kao takav. Odnosi se na postupke kod spremanja električne energije unutar elektroenergetskog sustava. Glavni problem kod skladištenja energije je ta da proizvedena energija mora biti odmah iskorištena ili pretvorena u drugi oblik energije. Upravljanje elektroenergetskim sustavom bilo bi znatno jednostavnije ukoliko bi se omogućilo ekonomsko, sigurno i pouzdano skladištenja električne energije no zbog visokih troškova skladištenja i tehnoloških ograničenja takvi sustavi su još u razvijanju.

3.5.1. Baterije

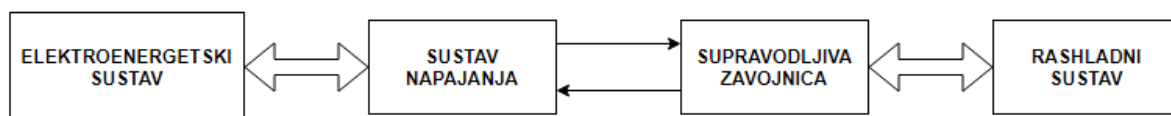
Baterije (slika 3.1.) su se za spremanje energije koristile u počecima istosmjernih mreža, a sada se ponovno uvode u upotrebu. Imaju mnoštvo primjena kao pomoćni sustavi napajanja i pri upravljanju elektroenergetskim i prijenosnim sustavom, kao i u transportnim sustavima. Korisnost im je 90% ali su relativno skupe, potrebno im je mnogo održavanja i vijek trajanja im je ograničen, zbog stvaranja kristala u ćelijama tijekom čestih punjenja i pražnjenja [21].



Slika 3.1. *Primjer baterijskih spremnika*

3.5.2. Spremnici induktivne energije

Spremnici induktivne energije (slika 3.2.) pohranjuju energiju magnetskog polja koja se stvara zbog toka istosmjerne struje u supravodljivoj zavojnici. Zavojnica se hladi ispod svoje supravodljive kritične temperature. Sustav se sastoji od tri dijela: dvosmjernog AC/DC pretvarača, supravodljive zavojnice i kriogenog hladnjaka. Jednom kada zavojnicom počne teći struja, stvara se magnetsko polje a energija može biti pohranjena beskonačno dugo. Korisnost doseže i više od 95% no cijena takve tehnologije je vrlo visoka zbog supravodljivih vodiča i energije potrebne za hlađenje. Glavna namjena ovakvog sustava je smanjenje tereta tijekom vršnih opterećenja [2].

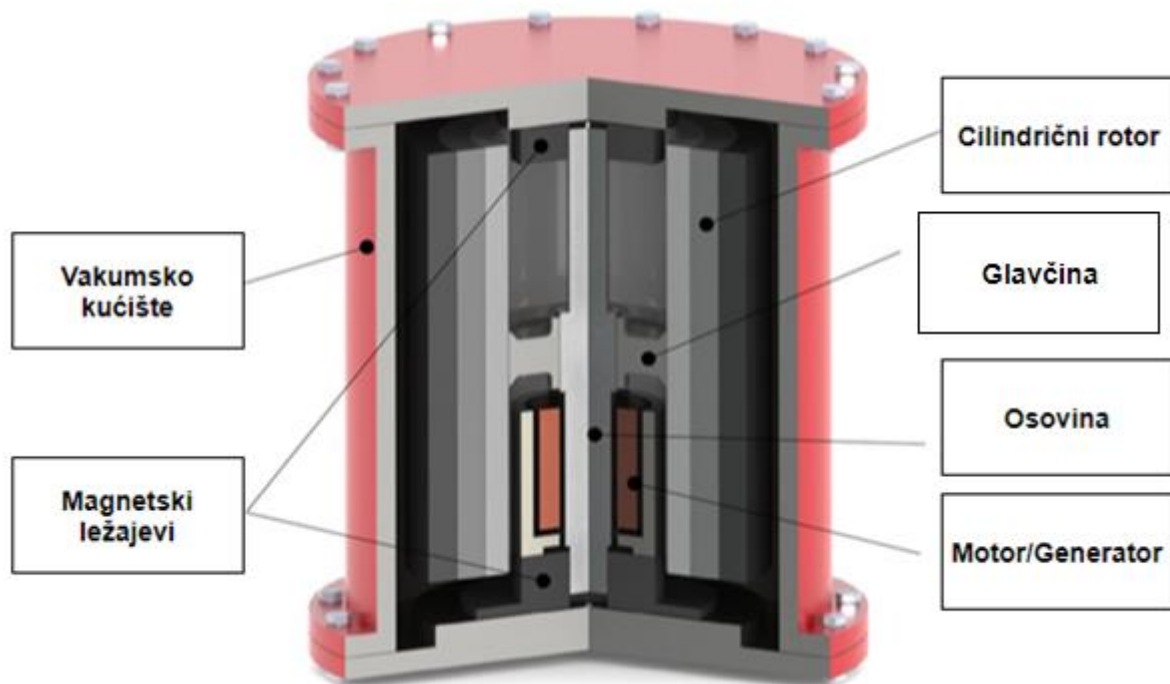


Slika 3.2. *Primjer spremnika induktivne energije*

3.5.3. Zamašnjaci

Zamašnjak (slika 3.3.) je rotirajući mehanički uređaj koji se koristi za pohranu energije u obliku kinetičke energije diska. Trenje mora biti što manje kako bi se produžilo vrijeme očuvanja energije. Tipični zamašnjak se sastoji od rotora (koji je vratilom spojen s električnim motorom/generatorom) kojeg drže ležajevi u vakumskoj komori kako bi se smanjilo trenje.

Usporavanjem diska radi kao generator proizvodeći struju. Koristi se u sustavima kojima treba velika količina energije u kratkim vremenskim periodima i u sustavima s obnovljivom energijom.



Slika 3.3. Zamašnjak [10]

3.5.4. Komprimirani zrak

Postoje tri načina skladištenja energije vjetra: adijabatskim, dijabatskim i izotermnim procesom. Adijabatskom pohranom zadržavamo toplinu koja se proizvela kompresijom, i vraćamo ju zraku kada je potrebno širenje radi proizvodnje energije. Dijabatskom pohranom dolazi do disipacije određene količine topline. Kada se višak topline oslobodi iz spremnika, zrak je potrebno ponovno dogrijati prije ekspanzije u turbini koja pogoni generator. Izotermnom pohranom održavamo radnu temperaturu pomoću konstantne zamjene topline s okolišem. Prednost je taj što kapacitet pohrane energije komprimiranim zrakom vrlo velik te su pouzdane, a nedostaci su niska učinkovitost koja iznosi 50%. [2].

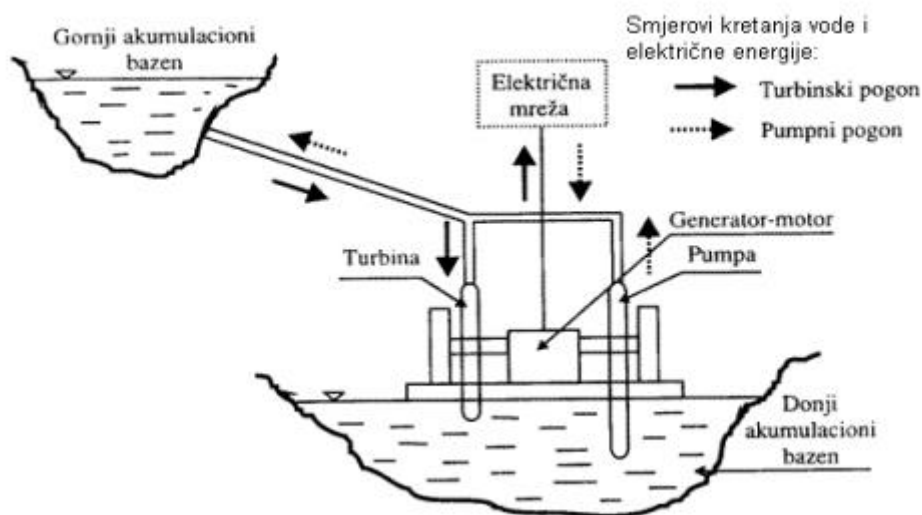
3.5.5. Ultrakondenzatori

Ultrakondenzatori su uređaji za pohranu istosmjerne energije, koji se pomoću dvosmjernog AC/DC pretvarača spajaju na mrežu. Zbog brzog vremena pražnjenja i punjenja, koriste se samo tijekom kratkih prekida i naponskih propada. U odnosu na baterije, koje pohranjuju energiju u kemijskoj reakciji, ultrakondenzatori pohranjuju elektrostatički. Sastoji se od dvije kolektorske ploče koje su uronjene u elektrolit. Potencijalna razlika između dvije kolektorske

ploče uzrokuje da negativni ioni u elektrolitu budu privučeni prema pozitivnoj kolektorskoj ploči a pozitivni ioni u elektrolitu budu privučeni prema negativnoj kolektorskoj ploči. Unatoč velikom napretku ultrakondenzatori se još uvijek ne mogu mjeriti sa baterijama po pitanju skladištenja energije kroz duži period. [2].

3.5.6. Crpno akumulacijska hidroelektrana

Ovaj sustav pohranjuje energiju u obliku gravitacijske potencijalne energije vode. Crpno akumulacijska hidroelektrana u razdoblju niske potražnje električne energije crpi vodu iz nižeg u viši spremnik vode. Tokom razdoblja visoke potražnje za električnom energijom voda se propušta kroz turbinu i pritom se generira električna struja. Reverzibilna turbina/generator može se ponašati i kao pumpa i kao turbina. Ova tehnologija je trenutno najisplativija u smislu spremanja velikih količina električne energije [8].



Slika 3.4. Primjer crpno akumulacijske hidroelektrane [11]

3.6. Električna vozila

Razvojem tehnologije i sve većom proizvodnjom električnih vozila elektroprivredne organizacije se pripremaju za dolazak električnih vozila na tržište i priključenje na elektroenergetski sustav. Najveći pozitivan utjecaj na sustav koji električna vozila mogu pružiti kroz usluge pomoćne regulacije frekvencije i povratom dijela energije iz baterija u mrežu. Punjenje električnih vozila može predstavljati značajan problem elektroenergetskom sustavu. Najveća opasnost predstavlja da se veći broj vozila punit tijekom vršnog opterećenja nakon povratka sa

radnog mjesta i parkiranja vozila, koje bi uzrokovalo potrebe za izgradnjom dodatnih vršnih elektrana. Stoga se razmatraju modeli po kojima bi se punjenje električnih vozila tokom vršnog opterećenja premjestilo u noćni period i time izbjeci negativan utjecaj po sustav i mrežu. Jedan od načina da se vozači motiviraju da pune električna vozila tokom noći je definiranje novih tarifa električne energije [3].

Vozila se relativno malo koriste za prijevoz, prosječno samo 4% vremena, što ih čini dostupnim za korištenje u druge svrhe 96% preostalog vremena. Ukoliko se na lokacijama punjenja automobila ugrade punionice s mogućnošću daljinske komunikacije i dvosmjernog obračuna toka energije, bilo bi moguće energiju koja je uskladištena u baterijama vratiti natrag u mrežu. S obzirom da je kapacitet baterija ograničen, električna energija iz vozila pogodna je samo za visokotarifni i kratkoročni plasman električne energije. Vozači bi dobivali naknadu radi ustupljenog prava regulacije nad procesom punjenja vozila kojima bi pružali pomoćne usluge regulacije frekvencije. Električna vozila mogu doprinijeti većoj integraciji obnovljivih izvora električne energije u elektroenergetski sustav, preuzimajući električnu energiju kad je energija iz obnovljivih izvora dostupna i vraćajući dio energije u mrežu kada je umanjena isporuka energije iz obnovljivih izvora [3].

3.7. Pametna brojila

Pametna brojila predstavljaju novu generaciju elektronička brojila sa mikropocesorom, koja očitavaju potrošnju električne energije, sadrže komunikacijsko sučelje kako bi komunicirali sa elektroprivredom i okolinom. Takva brojila će ubrzo zamijeniti stara elektromehanička brojila koja rade na principu broja okreta aluminijskog diska koji se rotira brzinom ovisno o jakosti struje koja prolazi kroz brojilo. Pametna brojila omogućuju dvosmjernu komunikaciju između potrošača i elektroprivrede slanjem podataka komunikacijskom mrežom. Samim time došlo bi do poboljšanja funkcionalnosti koje uključuju lakše određivanje mjesta kvarova, praćenje kvalitete napajanja, mogućnost daljinskog povezivanja ili prekida napajanja, informacije o potrošnji u stvarnom vremenu. Sustav pametnog mjerenja omogućuje praćenje mnoštvo parametara kao što su trenutno opterećenje, kvaliteta napona, frekvencija, $\cos \phi$, otkrivanje nedopuštene radnje.

Pametna brojila bi omogućila i veću fleksibilnost, tako da bi cijene varirale tijekom dana u odnosu na potrošnju. Potrošači bi imali tendenciju da električne uređaje koriste u vrijeme kada je cijena električne energije najjeftinija. Istraživanjima je dokazano da ovim pristupom dolazi do smanjenja potrošnje električne energije za 7%, a tijekom vršnog opterećenja za 15%. Takvim pristupom

potrošač bi smanjio svoje račune za 10% na godišnjem nivou i distributerima omogućili veću stabilnost elektroenergetskog sustava. [5].



Slika 3.5. Prikaz elektromehaničkog i pametnog brojila [12]

4. EKONOMSKI DISPEČING JEDNOSTAVNE PAMETNE MREŽE SA JEDNIM GENERATOROM

Problem ekonomskog dispečinga (engl. *Economic dispatch – ED*) jedan je od temeljnih problema elektroenergetskog sustava. Cilj ED-a je smanjiti ukupni trošak proizvodnje električne energije, ovisno o sigurnosnim ograničenjima sustava. Dodavanjem obnovljivih izvora električne energije i sustava za spremanje električne energije u pametnu mrežu problem ekonomskog dispečinga postaje sve složeniji. Prema [1] opisat ćemo ekonomski dispečing jednostavne pametne mreže (engl. *Smart Grid Economic Dispatch – SGED*) bez razmatranja ograničenja sigurnosti mreže.

Problem ekonomskog dispečinga jednostavne pametne mreže je opterećenje jednog generatora sa jednim sustavom za pohranu električne energije. Funkcija troška generatora je kvadratna i može se jednostavno izraziti kako slijedi.

$$f(P_g) = \frac{1}{2}\alpha P_g^2 + \beta P_g + \gamma \quad (4.1)$$

Funkcija troškova baterije može se izraziti na sljedeći način.

$$h(P_b) = \eta(P_{bmax} - P_b) \quad (4.2)$$

Za pojednostavljenje analize, pretpostavimo da je opterećenje konstantno za svako vremensko razdoblje.

$$P_d(t) = D \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (4.3)$$

Dakle, problem ekonomskog dispečinga jednostavne pametne mreže možemo izraziti na sljedeći način.

$$\min J = \sum_{t=1}^T [f(P_g(t)) + h(P_b(t))] \quad (4.4)$$

Tako da

$$P_b(t) = P_b(t-1) + P_g(t) - D \quad (4.5)$$

$$0 \leq P_b(t) \leq P_{bmax} \quad (4.6)$$

$$0 \leq P_g(t) \leq P_{gmax} \quad (4.7)$$

gdje je :

P_g : snaga generatora na izlazu

P_{gmax} : maksimalna snaga generatora na izlazu

P_b : snaga baterije

P_{bmax} : maksimalan kapacitet baterije

D : konstantna vrijednost opterećenja

T : vremenski period djelovanja pametne mreže

α, β, γ : koeficijenti funkcije troška proizvodnje

η : koeficijent funkcije troška baterije

Ukoliko zanemarimo ograničenja baterija i generatora iz objektivne funkcije i jednadžbe ravnoteže snaga, možemo dobiti sljedeće stanje optimalnosti:

$$\propto P'_g(t) + \beta = \eta[T - (t - 1)] \quad (4.8)$$

Ili

$$\propto P'_g(t) + \beta = \eta[T + 1 - t] \quad (4.9)$$

Iz gornje jednadžbe dobivamo

$$P'_g(t) = \frac{\eta}{\alpha}(T + 1 - t - \beta) \quad (4.10)$$

Ukoliko je funkcija troškova generatora pojednostavljena kako slijedi,

$$f(P_g) = \frac{1}{2} \propto P_g^2 \quad (4.11)$$

Zatim optimalna proizvodnja postaje

$$P'_g(t) = \frac{\eta}{\alpha}(T + 1 - t) \quad (4.12)$$

Promjena snage baterije može se dobiti kao

$$P'_b(t) = P_b(t - 1) + \frac{\eta}{\alpha}(T + 1 - t) - D \quad (4.13)$$

Iz jednadžbe (4.12) možemo utvrditi kako će se optimalna proizvodnja linearno smanjiti tijekom vremena. Iz jednadžbe (4.13) vidimo kako se baterija na početku puni a zatim prazni. Baterija prelazi iz stanja punjenja u stanje pražnjenja kada

$$\frac{\eta}{\alpha}(T + 1 - t) - D = 0 \quad (4.14)$$

Tj.

$$P'_b(t) = P_b(t - 1) \quad (4.15)$$

Kada je

$$t_D = T + 1 - \frac{\alpha}{\eta}D \quad (4.16)$$

Gdje je t_D vrijeme kada se baterija počinje prazniti.

Uzimajući u obzir ograničenja generatora i baterije, iz jednadžbe (4.12) može se primijetiti da se maksimalni učinak proizvodnje pojavljuje u početnom vremenu, a minimalna izlazna snaga na kraju vremena T .

$$\frac{\eta}{\alpha} \leq P_g^*(t) \leq \frac{\eta}{\alpha}T \quad (4.17)$$

To znači da sljedeća jednadžba treba zadovoljiti kako bi ispunili uvjete ograničenja proizvodnje (4.17.):

$$\frac{\eta T}{\alpha} \leq P_{gmax} \quad (4.18)$$

Prema (4.18) vidimo da nema problema ograničenja proizvodnje. Budući da generator opskrbljuje opterećenje i bateriju, kapacitet generatora mora biti veći od opterećenja. Dakle ekonomski dispečing jednostavne pametne mreže će postati ograničeni problem kada se kapacitet generatora zada kao

$$D \leq P_{gmax} \leq \frac{\eta T}{\alpha} \quad (4.19)$$

Ako optimalna proizvodnja prekorači kapacitet generatora u početnom vremenu t_g , proizvodnja će biti postavljena na graničnu vrijednost generatora.

$$P'_g(t) = \frac{\eta}{\alpha}(T + 1 - t) = P_{gmax} \quad (4.20)$$

$$t_g = T + 1 - \frac{\alpha}{\eta}P_{gmax} \quad (4.21)$$

Optimalna proizvodnja tijekom vremena bit će

$$P_g^*(t) = \begin{cases} P_{gmax}, & \text{ako je } t \leq tg \\ \frac{\eta}{\alpha}(T + 1 - t), & \text{ako je } t > tg \end{cases} \quad (4.22)$$

Isto tako, optimalna vrijednost baterije bit će

$$P_b^*(t) = \begin{cases} P_b(t - 1) + P_{gmax} - D, & \text{ako je } t \leq tg \\ P_b(t - 1) + \frac{\eta}{\alpha}(T + 1 - t) - D, & \text{ako je } t > tg \end{cases} \quad (4.23)$$

Ako se uzme u obzir ograničenje napajanja baterija (4.7) i izračunata optimalna vrijednost premašuje kapacitet baterije u trenutku t_B , stvarna snaga punjenja mora biti postavljena na maksimalnu granicu.

$$P_b(t_B) = P_{bmax}, \quad \text{ako je } P_b(t_B) > P_{bmax} \quad (4.24)$$

Zbog smanjenja punjenja baterije, optimalna snaga na izlazu generatora će se smanjiti i izračunavamo na sljedeći način:

$$P_b(t_B) = P_{bmax} = P_b(t_B - 1) + P_b(t_B) - D \quad (4.25)$$

$$P_b(t_B) = P_{bmax} - P_b(t_B - 1) + D \quad (4.26)$$

Prema tome, optimalna proizvodnja sa ograničenjem kapaciteta baterije tijekom vremena bit će

$$f(x) = \begin{cases} P_{bmax} - P_b(t_B - 1) + D, & \text{ako je } t = t_B \\ \frac{\eta}{\alpha}(T + 1 - t), & \text{ako je } t \neq t_B \end{cases} \quad (4.27)$$

Isto tako optimalna vrijednost baterije bit će

$$P_b^*(t) = \begin{cases} P_{bmax}, & \text{ako je } t = t_B \\ P_b(t - 1) + \frac{\eta}{\alpha}(T + 1 - t) - D, & \text{ako je } t \neq t_B \end{cases} \quad (4.28)$$

Međutim, ako se uzme u obzir ograničenje napajanja baterije (4.7), a izračunata snaga baterije je negativna za vrijeme pražnjenja t_b , stvarna snaga mora biti podešena na nulu.

$$P_b(t_b) = 0, \quad \text{ako je } P_b(t) < 0 \quad (4.29)$$

Budući da baterija ne može otpustiti dovoljno energije, snaga na izlazu generatora će se povećati kako bi se zadovoljila ravnoteža snage pametne mreže. To izračunavamo na sljedeći način:

$$P_b(t_b) = 0 = P_b(t_b - 1) + P_g(t_b) - D \quad (4.30)$$

$$P_g(t_b) = D - P_b(t_b - 1) \quad (4.31)$$

U tom će slučaju optimalna proizvodnja tijekom vremena biti

$$P_g^*(t) = \begin{cases} P_g(t_b) = D - P_b(t_b - 1), & \text{ako je } t = t_b \\ \frac{\eta}{\alpha}(T + 1 - t), & \text{ako je } t \neq t_b \end{cases} \quad (4.32)$$

Optimalna vrijednost baterije biti će

$$P_b^*(t) = \begin{cases} 0, & \text{ako je } t = t_b \\ P_b(t - 1) + \frac{\eta}{\alpha}(T + 1 - t) - D, & \text{ako je } t \neq t_b \end{cases} \quad (4.33)$$

Optimalni ekonomski dispečing pametne mreže s ograničenjem kapaciteta baterije može biti izraženo kako slijedi.

$$P_b^*(t) = \begin{cases} P_{bmax}, & \text{ako je } P_b(t) > P_{bmax} \\ 0, & \text{ako je } P_b(t) < 0 \\ P_b(t - 1) + \frac{\eta}{\alpha}(T + 1 - t) - D, & \text{ako je } 0 \leq P_b(t) \leq P_{bmax} \end{cases} \quad (4.34)$$

$$P_g^*(t) = \begin{cases} P_{bmax} + D - P_b(t - 1), & \text{ako je } P_b(t) > P_{bmax} \\ D - P_b(t - 1), & \text{ako je } P_b(t) < 0 \\ \frac{\eta}{\alpha}(T + 1 - t), & \text{ako je } 0 \leq P_b(t) \leq P_{bmax} \end{cases} \quad (4.35)$$

4.1. Proračun jednostavne pametne mreže sa jednim generatorom i jednim sustavom za pohranu energije

Jednostavna pametna mreža se sastoji od jednog generatora i sustava baterija za pohranu električne energije. Opterećenje mijenjamo od 1-10 MW uz pretpostavku da je konstantno tokom vremena promatranja. Funkcija troška generatora je kvadratna te iznosi

$$f(P_g) = \frac{1}{2} \alpha P_g^2 = \frac{1}{2} (0.04 P_g^2)$$

Početna snaga baterije iznosi 2 MW a koeficijent pohrane baterije iznosi $\eta=0.08$. Kapacitet generatora iznosi 25 MW te ćemo proračunati optimalnu snagu generatora i baterije u periodu od 7 sati. Prvo možemo izračunati ključnu vremensku točku u kojoj baterija prelazi iz stanja punjenja u stanje pražnjenja.

$$t_{D1} = T + 1 - \frac{\alpha}{\eta} \cdot D_1 = 7 + 1 - \frac{0.04}{0.08} \cdot 1 = 7.5 \text{ h}$$

$$t_{D2} = T + 1 - \frac{\alpha}{\eta} \cdot D_2 = 7 + 1 - \frac{0.04}{0.08} \cdot 2 = 7 \text{ h}$$

$$t_{D3} = T + 1 - \frac{\alpha}{\eta} \cdot D_3 = 7 + 1 - \frac{0.04}{0.08} \cdot 3 = 6.5 \text{ h}$$

$$t_{D4} = T + 1 - \frac{\alpha}{\eta} \cdot D_4 = 7 + 1 - \frac{0.04}{0.08} \cdot 4 = 6 \text{ h}$$

$$t_{D5} = T + 1 - \frac{\alpha}{\eta} \cdot D_5 = 7 + 1 - \frac{0.04}{0.08} \cdot 5 = 5.5 \text{ h}$$

$$t_{D6} = T + 1 - \frac{\alpha}{\eta} \cdot D_6 = 7 + 1 - \frac{0.04}{0.08} \cdot 6 = 5 \text{ h}$$

$$t_{D7} = T + 1 - \frac{\alpha}{\eta} \cdot D_7 = 7 + 1 - \frac{0.04}{0.08} \cdot 7 = 4.5 \text{ h}$$

$$t_{D8} = T + 1 - \frac{\alpha}{\eta} \cdot D_8 = 7 + 1 - \frac{0.04}{0.08} \cdot 8 = 4 \text{ h}$$

$$t_{D9} = T + 1 - \frac{\alpha}{\eta} \cdot D_9 = 7 + 1 - \frac{0.04}{0.08} \cdot 9 = 3.5 \text{ h}$$

$$t_{D10} = T + 1 - \frac{\alpha}{\eta} \cdot D_{10} = 7 + 1 - \frac{0.04}{0.08} \cdot 10 = 3 \text{ h}$$

Vidimo da se povećanjem opterećenja smanjuje vrijeme punjenja baterije. Optimalna snaga generatora se može izračunati kroz jednadžbu (4.22)

$$P'_{g}(t) = \frac{\eta}{\alpha} \cdot (T + 1 - t) = \frac{0.08}{0.04} \cdot (7 + 1 - t) = 16 - 2t$$

Promjenu snage baterije dobijemo na temelju jednadžbe (4.23)

$$P'_{b1}(t) = P_b(t - 1) + \frac{\eta}{\alpha}(T + 1 - t) - D_1 = P_b(t - 1) + 15 - 2t$$

$$P'_{b2}(t) = P_b(t - 1) + \frac{\eta}{\alpha}(T + 1 - t) - D_2 = P_b(t - 1) + 14 - 2t$$

$$P'_{b3}(t) = P_b(t - 1) + \frac{\eta}{\alpha}(T + 1 - t) - D_3 = P_b(t - 1) + 13 - 2t$$

$$P'_{b4}(t) = P_b(t - 1) + \frac{\eta}{\alpha}(T + 1 - t) - D_4 = P_b(t - 1) + 12 - 2t$$

$$P'_{b5}(t) = P_b(t - 1) + \frac{\eta}{\alpha}(T + 1 - t) - D_5 = P_b(t - 1) + 11 - 2t$$

$$P'_{b6}(t) = P_b(t - 1) + \frac{\eta}{\alpha}(T + 1 - t) - D_6 = P_b(t - 1) + 10 - 2t$$

$$P'_{b7}(t) = P_b(t - 1) + \frac{\eta}{\alpha}(T + 1 - t) - D_7 = P_b(t - 1) + 9 - 2t$$

$$P'_{b8}(t) = P_b(t - 1) + \frac{\eta}{\alpha}(T + 1 - t) - D_8 = P_b(t - 1) + 8 - 2t$$

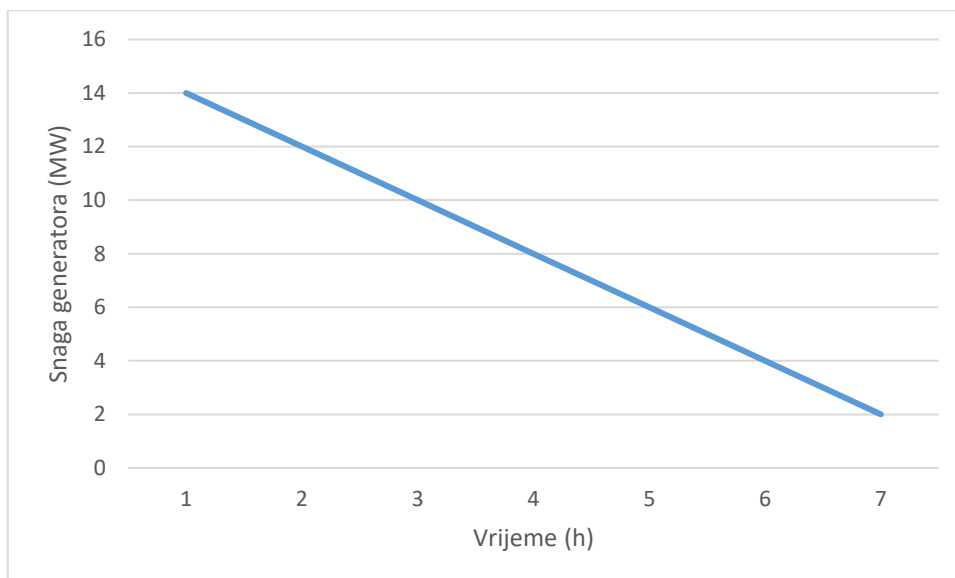
$$P'_{b9}(t) = P_b(t - 1) + \frac{\eta}{\alpha}(T + 1 - t) - D_9 = P_b(t - 1) + 7 - 2t$$

$$P'_{b10}(t) = P_b(t - 1) + \frac{\eta}{\alpha}(T + 1 - t) - D_{10} = P_b(t - 1) + 6 - 2t$$

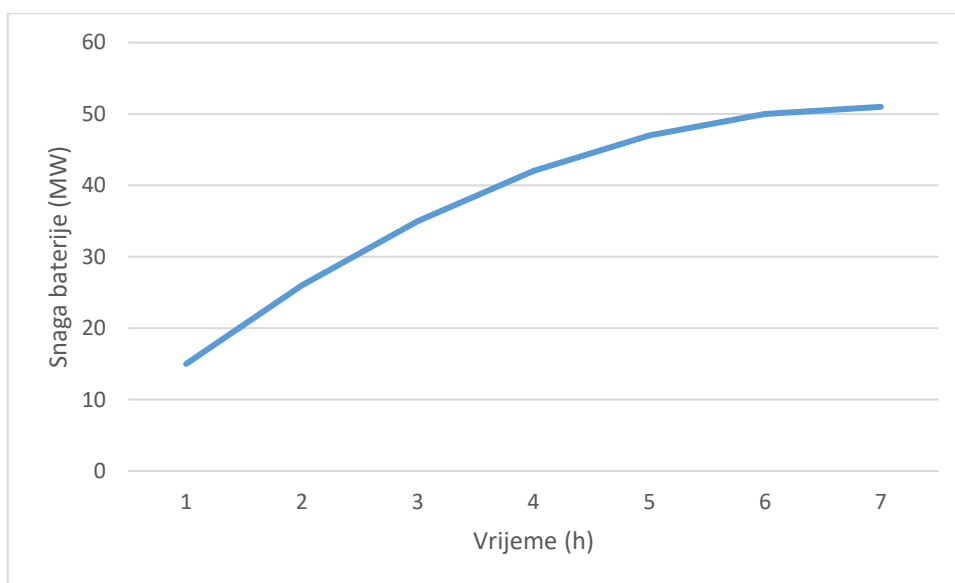
Nakon postavljenih jednadžbi izračunavamo vrijednosti snage generatora i baterije za različita opterećenja.

Tablica 4.1. Rezultati izračuna snage generatora i baterije za $D=1$ MW

vrijeme (h)	1	2	3	4	5	6	7
snaga generatora (MW)	14	12	10	8	6	4	2
snaga baterije (MW)	15	26	35	42	47	50	51



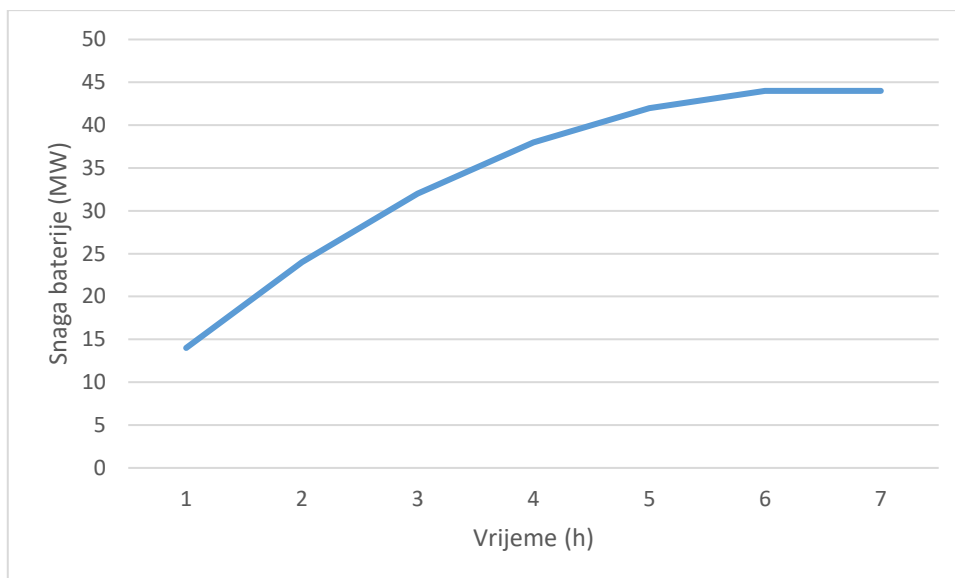
Slika 4.2. Grafički prikaz promjene snage generatora u promatranom vremenu



Slika 4.3. Grafički prikaz promjene snage baterije u promatranom vremenu za $D=1$ MW

Tablica 4.4. Rezultati izračuna snage generatora i baterije za $D=2$ MW

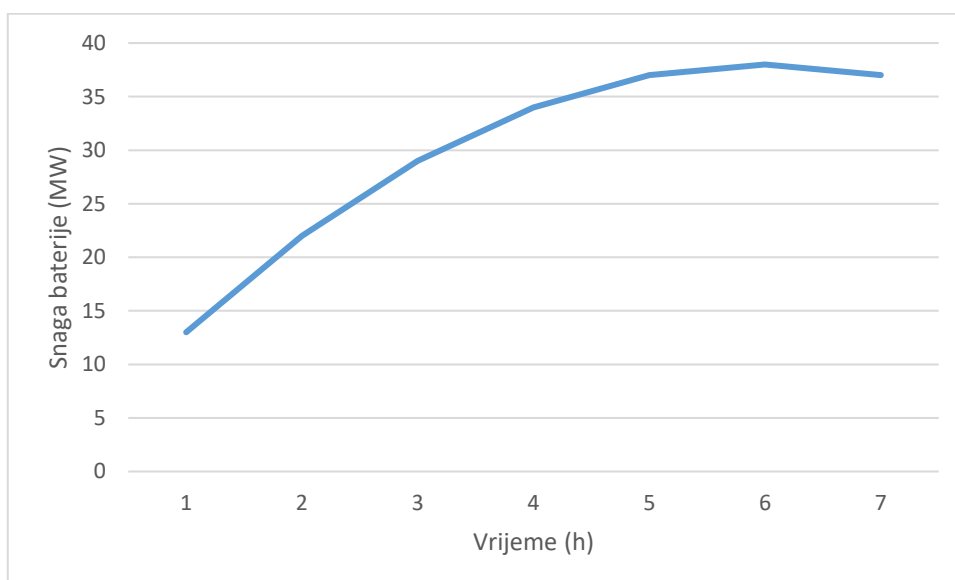
vrijeme (h)	1	2	3	4	5	6	7
snaga generatora (MW)	14	12	10	8	6	4	2
snaga baterije (MW)	14	24	32	38	42	44	44



Slika 4.5. Grafički prikaz promjene snage baterije u promatranom vremenu za $D=2$ MW

Tablica 4.6. Rezultati izračuna snage generatora i baterije za $D=3$ MW

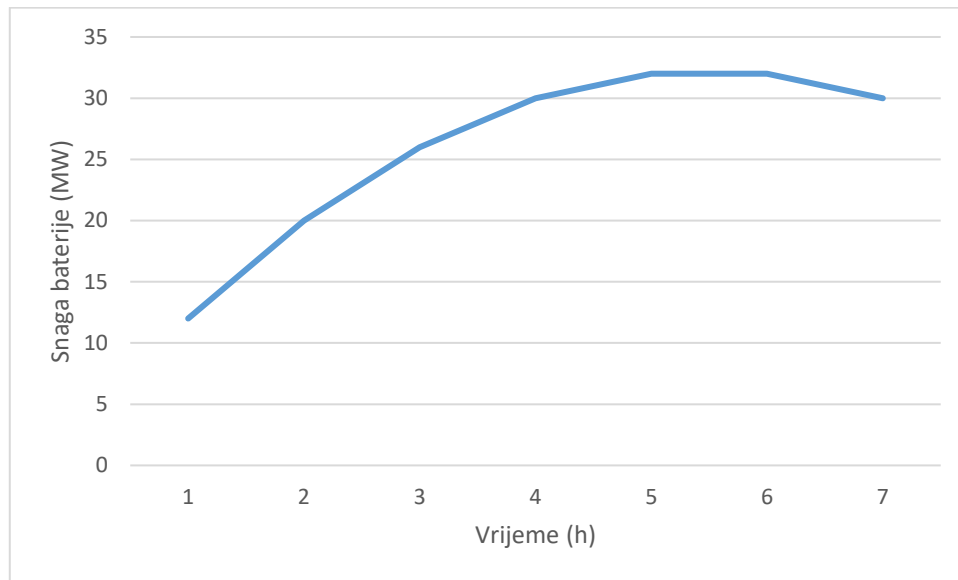
vrijeme (h)	1	2	3	4	5	6	7
snaga generatora (MW)	14	12	10	8	6	4	2
snaga baterije (MW)	13	22	29	34	37	38	37



Slika 4.7. Grafički prikaz promjene snage baterije u promatranom vremenu za $D=3$ MW

Tablica 4.8. Rezultati izračuna snage generatora i baterije za $D=4$ MW

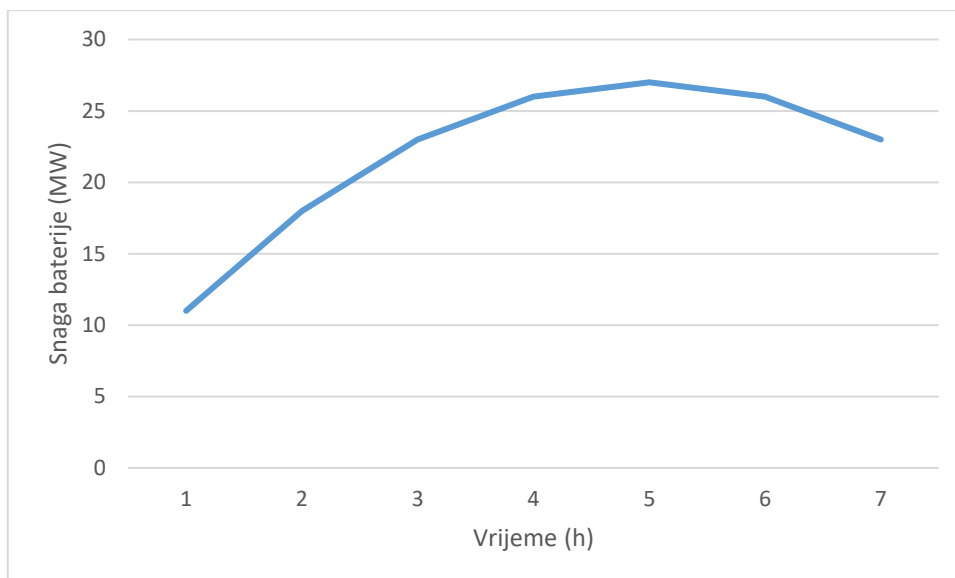
vrijeme (h)	1	2	3	4	5	6	7
snaga generatora (MW)	14	12	10	8	6	4	2
snaga baterije (MW)	12	20	26	30	32	32	30



Slika 4.9. Grafički prikaz promjene snage baterije u promatranom vremenu za $D=4$ MW

Tablica 4.10. Rezultati izračuna snage generatora i baterije za $D=5$ MW

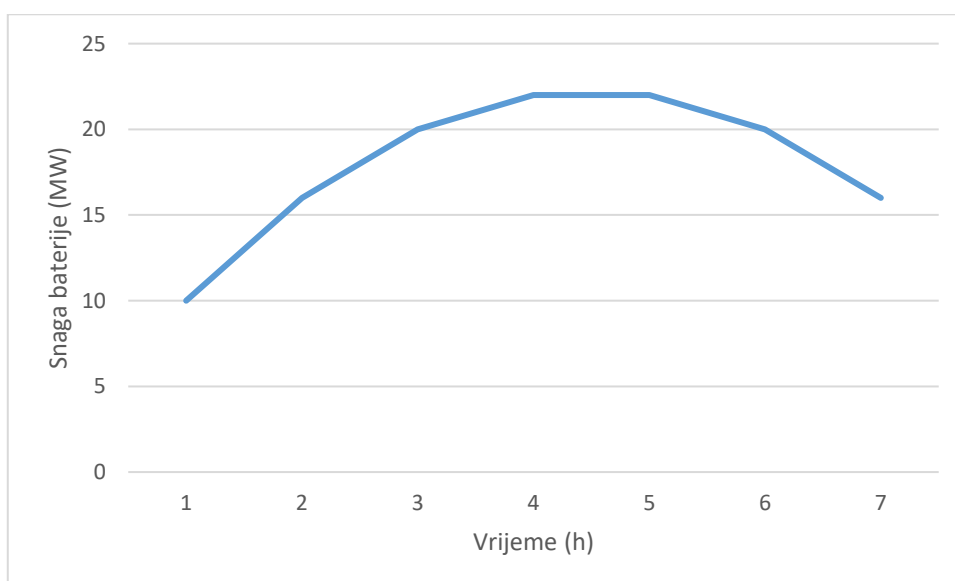
vrijeme (h)	1	2	3	4	5	6	7
snaga generatora (MW)	14	12	10	8	6	4	2
snaga baterije (MW)	11	18	23	26	27	26	23



Slika 4.11. Grafički prikaz promjene snage baterije u promatranom vremenu za $D=5$ MW

Tablica 4.12. Rezultati izračuna snage generatora i baterije za $D=6$ MW

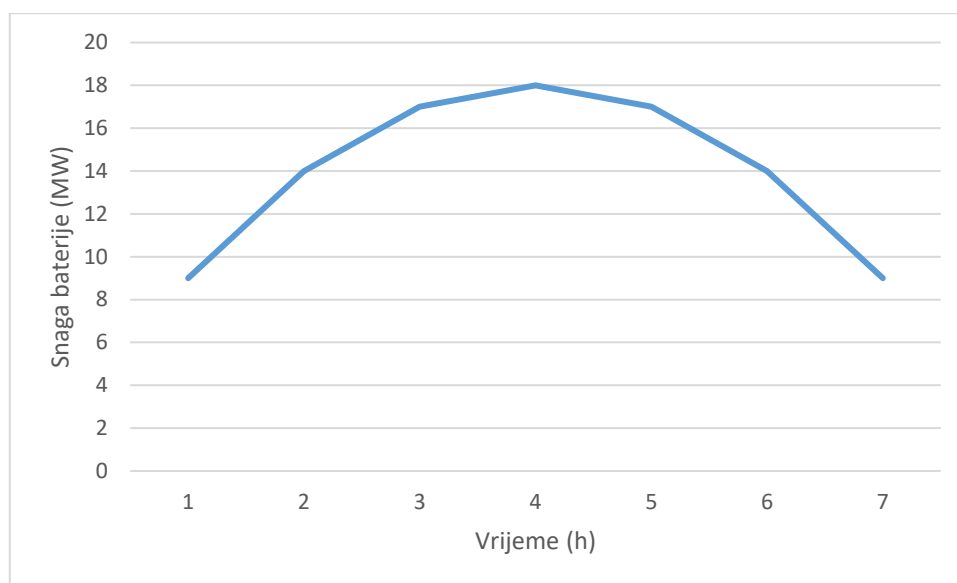
vrijeme (h)	1	2	3	4	5	6	7
snaga generatora (MW)	14	12	10	8	6	4	2
snaga baterije (MW)	10	16	20	22	22	20	16



Slika 4.13. Grafički prikaz promjene snage baterije u promatranom vremenu za $D=6$ MW

Tablica 4.14. Rezultati izračuna snage generatora i baterije za $D=7$ MW

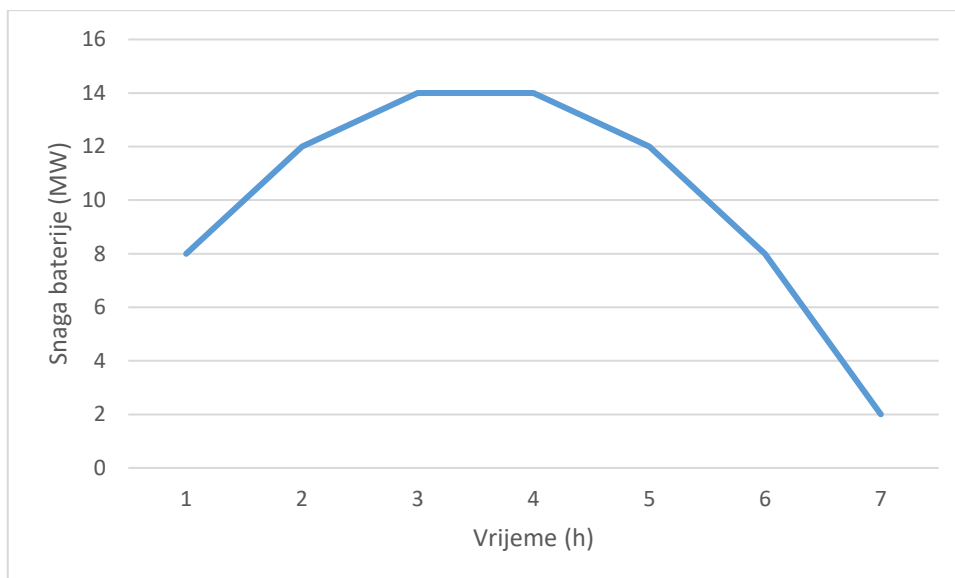
vrijeme (h)	1	2	3	4	5	6	7
snaga generatora (MW)	14	12	10	8	6	4	2
snaga baterije (MW)	9	14	17	18	17	14	9



Slika 4.15. Grafički prikaz promjene snage baterije u promatranom vremenu za $D=7$ MW

Tablica 4.16. Rezultati izračuna snage generatora i baterije za $D=8$ MW

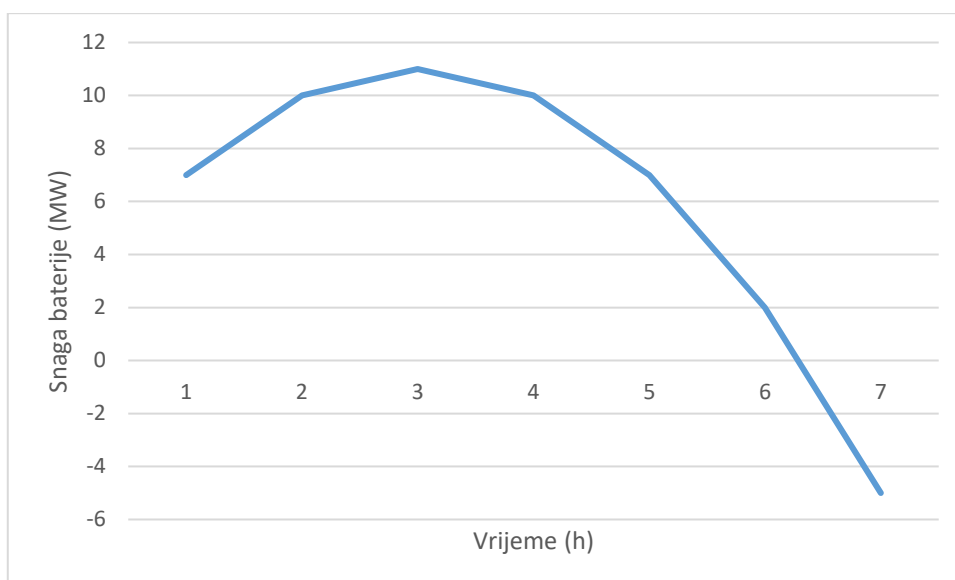
vrijeme (h)	1	2	3	4	5	6	7
snaga generatora (MW)	14	12	10	8	6	4	2
snaga baterije (MW)	8	12	14	14	12	8	2



Slika 4.17. Grafički prikaz promjene snage baterije u promatranom vremenu za $D=8$ MW

Tablica 4.18. Rezultati izračuna snage generatora i baterije za $D=9$ MW

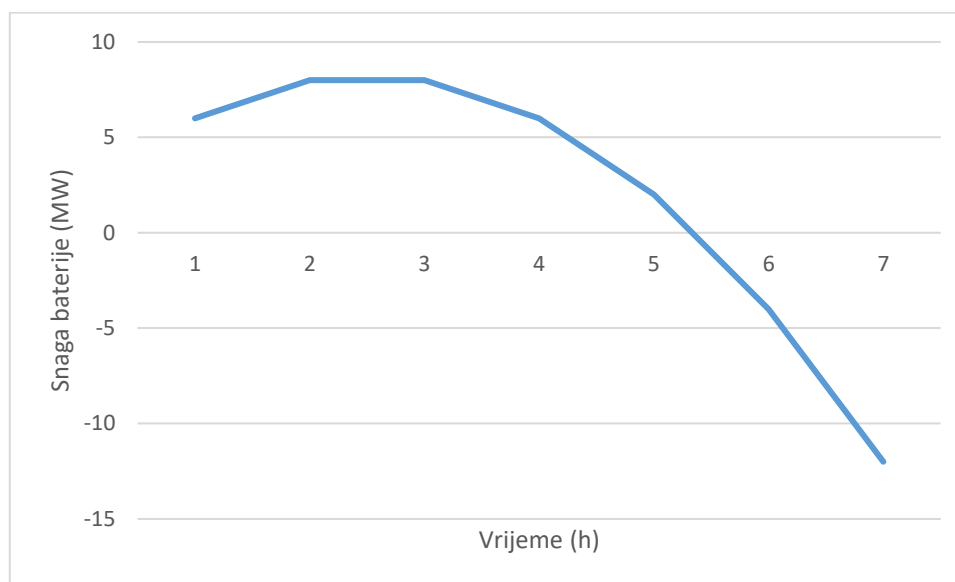
vrijeme (h)	1	2	3	4	5	6	7
snaga generatora (MW)	14	12	10	8	6	4	2
snaga baterije (MW)	7	10	11	10	7	2	-5



Slika 4.19. Grafički prikaz promjene snage baterije u promatranom vremenu za $D=9$ MW

Tablica 4.20. Rezultati izračuna snage generatora i baterije za $D=10\text{MW}$

vrijeme (h)	1	2	3	4	5	6	7
snaga generatora (MW)	14	12	10	8	6	4	2
snaga baterije (MW)	6	8	8	6	2	-4	-12



Slika 4.21. Grafički prikaz promjene snage baterije u promatranom vremenu za $D=10\text{ MW}$

Iz dobivenih rezultata vidimo kako je snaga generatora linearno opadala za sva opterećenja jednako, dok se vrijeme u kojem baterija prelazi iz faze punjenja u fazu pražnjenja smanjivalo. Kod opterećenja od 1 MW baterija je imala maksimalnu snagu od 51 MW, dok je sa teretom od 10 MW maksimalna snaga je iznosila 8MW. Kako bi se nadoknadila razlika snage koju generator nije u stanju predati, baterija predaje svoju energiju u mrežu kako bi sustav nastavio normalno funkcionirati. Sa sve većim rastom opterećenja baterija nije u stanju nadoknaditi proizvodnju generatora te bi trebali povećati izlaznu snagu generatora ili bi neki dodatni izvor trebao uskočiti kako bi se zadovoljila ravnoteža pametne mreže.

5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog diplomskog rada je bio objasniti pametnu mrežu, njene prednosti i razloge unapređenja trenutnog elektroenergetskog sustava, tehnologije i uređaje koji se koriste u pametnim mrežama te tehnologije skladištenja električne energije. Implementacijom pametnih mreža uvodimo nove tehnologije koje bi omogućile sigurniju i kontroliraniju integraciju različitih obnovljivih izvora. Infrastruktura takve mreže karakterizira dvosmjernan protok električne energije i dvosmjerna komunikacija u realnom vremenu koju bi ostvarili implementacijom informacijskih i komunikacijskih tehnologija na trenutnu mrežu koje imaju jednosmjernan protok podatka kao i jednosmjernan tok energije. Samim time osigurali bi poboljšanje pouzdanosti, sigurnosti, energetske i financijske učinkovitosti elektroenergetskog sustava. Pametnom mrežom korisnici bi postali aktivni sudionici koji će moći pratiti cijenu i potrošnju električne energije tijekom 24 sata tako da bi koristili energiju kad je najjeftinija, a prodavali je kada su cijena i potražnja visoka. Samim time bi ujednačili oblik krivulje potrošnje električne energije i smanjili potrošnju energije pri vršnom opterećenju. Ukoliko bi došlo do nekog kvara na mreži, distributeri lakše mogu odrediti mjesto nastanka kvara. Time više neće biti potrebno slati djelatnike kako bi utvrdili mjesto kvara ili uključili isključili nekog potrošača sa mreže. Povećanjem distribuirane proizvodnje koja se obično nalazi u blizini opterećenja korisnika, dovelo bi do smanjenja broja prijenosnih i distribucijskih vodova koje treba nadograditi ili izgraditi i manjih gubitaka kod prijenosa i distribucije. Distribuirana proizvodnja ima potencijal da ublaži zagušenja u prijenosu, poveća energetske sigurnost te pruža veću stabilnost pametnoj mreži. Sa sve većom proizvodnjom električnih vozila korisnik će biti u mogućnosti vratiti dio energije iz baterije u mrežu i time ostvariti određenu naknadu od elektroprivrede. Pametnom mrežom omogućiti će se kvalitetnija opskrba i ušteda električne energije i poticati će prihvaćanje svih oblika obnovljivih tehnologija, uključujući solarne panele, vjetroelektrane, električna vozila.

POPIS LITERATURE I DRUGIH IZVORA INFORMACIJA

- [1] Jizhong Zhu: Optimization of Power System Operation, drugo izdanje, izdano od Jhon Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey 2015.
- [2] Stuart Borlase: Smart Grids Advanced Technologies and Solutions, drugo izdanje, Taylor & Francis Group 2018.
- [3] Preparing distribution networks for electric vehicle charging, url: https://www.researchgate.net/publication/305748471_Priprema_distributivnih_mreza_za_punjenje_elektromobila *Preparing the distribution networks for electric vehicle charging* (pristup ostvaren 10.06.2018.)
- [4] Punjenje električnog vozila, url: <http://elen.hep.hr/Punjenje-punjenje.aspx> (pristup ostvaren 10.06.2018.)
- [5] Zorica Delić: Pametna mreža- automatizacija i integracija novih tehnologija, url: <http://infoteh.etf.unssa.rs.ba/zbornik/2017/radovi/STS/STS-3.pdf> (pristup ostvaren 18.05.2018.)
- [6] prof. Dr. Sc . Davor Škrlec članak o masovnoj implementaciji naprednih mreža, url: <http://www.energetika-net.com/specijali/intervju-mjeseca/masovna-implementacija-naprednih-mreza-za-nekoliko-godina-postaje-obaveza-u-eu-16173> (pristup ostvaren 07.05.2018.)
- [7] Hera znanje, Smart Grids- napredne elektroenergetske mreže, url: <https://heraznanje.com/hrvatska/#> (pristup ostvaren 07.05.2018.)
- [8] Reverzibilne hidroelektrane, url: https://hr.wikipedia.org/wiki/Reverzibilne_hidroelektrane (pristup ostvaren 16.06.2018.)
- [9] Bhagyashree Mishra, Study of power Conditioning System of Superconducting Magnetic Energy Storage System, url: <http://ethesis.nitrkl.ac.in/5914/1/E-88.pdf> (pristup ostvaren 16.06.2018.)
- [10] Energy storage, url: https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_storage (datum pristupa 18.06.2018.)
- [11] dr. Sc. Damir Rajković, Proizvodanja i Pretvorba Energije, url: http://rgn.hr/~drajkovi/nids_damirrajkovic/skripta/Skripta_PiPE.pdf (datum pristupa 25.06.2018.)

- [12] Mreža tv članak o pametnim bojilima, url: <http://mreza.tv/pametno-brojilo-stedi-struju/> (datum pristupa 25.06.2018.)
- [13] Ivan Novosel, Dubravko Žigman, Smart Grids- Advanced Electric Power Network, 2016.
- [14] Solarna Fotonaponska Energija, [url:https://hr.wikipedia.org/wiki/Solarna_fotonaponska_energija](https://hr.wikipedia.org/wiki/Solarna_fotonaponska_energija) (pristup ostvaren 27.06.2018.)
- [15] Wind Farm, url: https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_farm (pristup ostvaren 27.06.2018.)
- [16] Željko Tomašić, Marijana Ponrašić, Ekonomska Analiza Dobiti i Troškova Implementacije Naprednih Mreža, url: http://fenisg.org/deliverables/FORUM_TomsicPongracic.pdf (datum pristupa 08.05.2018.)
- [17] Enciklopedija, gorivni članak, url: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=22730> (pristup ostvaren 07.07.2018.)
- [18] Fotonaponska elektrana, url: https://hr.wikipedia.org/wiki/Fotonaponska_elektrana (pristup ostvaren 07.07.2018.)
- [19] Vjetroelektrana, url: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=64999> (pristup ostvaren 07.07.2018.)
- [20] Vjetroelektrana, url: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Vjetroelektrana> (pristup ostvaren 07.07.2018.)
- [21] Skladištenje energije, url: https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/spremanje_energije_dio.pdf (pristup ostvaren 07.07.2018.)
- [22] Elektroenergetski sustav, url: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=17604> (pristup ostvaren 07.07.2018.)

SAŽETAK

Svrha ovog diplomskog rada je bilo objasniti pojam pametne mreže, razlog nadogradnje trenutnog elektroenergetskog sustava, glavne primjene pametnih mreža. Nakon definicija osnovnih pojmova slijede tehnologije i funkcioniranje pametne mreže, objašnjenje odgovora na potražnju i koji se uređaji koriste u pametnim mrežama. Zatim slijedi distribuirana proizvodnja električne energije te opis glavnih tehnologija distribuirane proizvodnje. Nadalje, spominje se tehnologija skladištenja električne energije u kojemu će dodatno biti opisani uređaji za skladištenje. Nakon toga dolazi opis utjecaja električnih automobila i pametnih brojlara na samu mrežu. U zadnjem poglavlju računskim postupkom smo prikazali promjenu snage generatora i baterije sa različitim opterećenjima u 7 sati.

KLJUČNE RIJEČI:

pametna mreža, distribuirana proizvodnja, odgovor na potražnju, pametna brojila, skladištenje energije.

ABSTRACT

The purpose of this Master's thesis was to explain the concept of smart grid, the reason for the upgrading of the current power system, the main application of the smart grids. Following the definition of basic concepts follows the technology and functioning of the smart grid, explaining the demand response, and which devices are used in smart grids. Next, it follows distributed generation and a description of the main technologies of distributed generation. Furthermore, an energy storage technology is proposed, in which storage devices will be further described. This is followed by a description of the impact of electric cars and smart meters on the grid. In the last chapter of the computational process, we showed the change in generator power and battery with different loads in 7 hours.

KEY WORDS:

smart grid, distributed generation, demand response, smart meters, energy storage.

ŽIVOTOPIS

Tomislav Kovačević rođen je 11. srpnja 1992. u Osijeku. U Valpovu 2011. godine završava srednju školu smjer elektrotehničar. Stručni studij elektrotehnike upisuje 2012. godine kojeg završava 2015. godine. Iste godine upisuje Razlikovne obaveze koje završava te 2016. godine upisuje diplomski studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika.