

Optimizacija rada mikromreže u laboratoriju za OIE

Hanžek, Kristijan

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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:200:062438>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**

Repository / Repozitorij:

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



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

OPTIMIZACIJA RADA MIKROMREŽE U
LABORATORIJU ZA OIE

Diplomski rad

Kristijan Hanžek

Osijek, 2017.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. FOTONAPONSKI SUSTAV	2
3. BATERIJA KAO SPREMNIK ENERGIJE	17
4. IZMJENJIVAČ	22
5. MIKROMREŽA.....	30
6. SIMULACIJA U PROGRAMSKOM PAKETU HOMER.....	33
6.1. OSNOVNI SUSTAV	33
6.2. DODAVANJE GORIVNE ČELIJE	39
6.3. DODAVANJE MALE HIDROELEKTRANE	43
6.4. ANALIZA SLUČAJEVA	45
7. ZAKLJUČAK	47
LITERATURA.....	48
SAŽETAK.....	50
ABSTRACT	50
ŽIVOTOPIS	51

1. UVOD

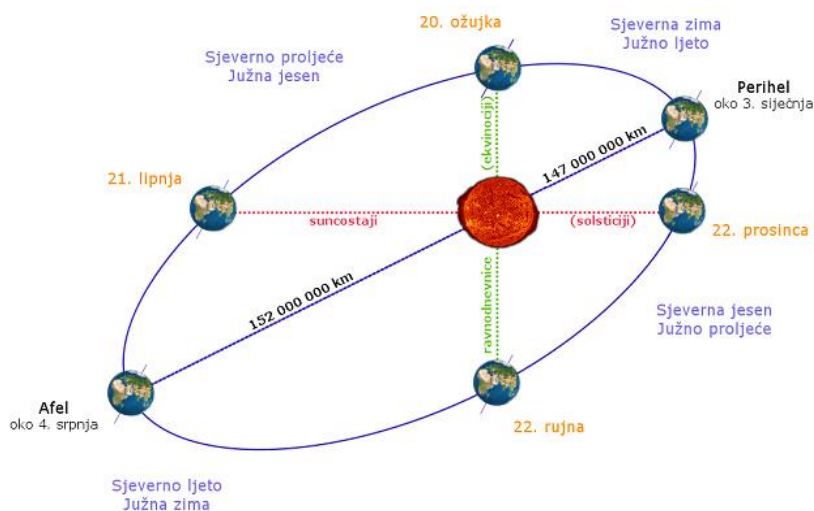
Električna energija oblik je energije bez kojeg je život u ovom razdoblju evolucije nezamisliv. Rad motora, generatora, računala, mobitela i ostalih kućanskih aparata bio bi nemoguć kada bi ona nestala na trenutak. Razvojem ljudske rase i unaprjeđenjem tehnologije povećavaju se zahtjevi za kvalitetom električne energije, ali se također povećava efikasnost njezine proizvodnje.

Obnovljivi izvori energije predstavljaju ekološki čist izvor energije koji još uvijek nije postigao svoj potencijal, ali poboljšanjem tehnologije efikasnost proizvodnje električne energije postepeno se povećava. Povećana potreba za električnom energijom sa sobom dovodi i pojam distribuirane proizvodnje koja izvore električne energije lokalizira na mjestima gdje je ta električna energija najpotrebnija, a ne na mjestima koja su poprilično udaljena. Mikromreže su pojam koji može odgovoriti na pitanje kako pametno gospodariti električnom energijom i kako efikasno i optimalno zadovoljiti potrebe kupaca uz što manju cijenu proizvodnje električne energije.

U ovom će radu biti objašnjen pojam mikromreže, njenih osnovnih dijelova i kako oni funkcioniraju. Također, izvest će se i simulaciju na postojećem sustavu i pokušat će se pronaći optimalno rješenje dodavanjem obnovljivih izvora električne energije u svrhu povećanja samostalnosti sustava koji radi priključen na mrežu u slučaju većeg kvara koji se može dogoditi na većem dijelu mreže.

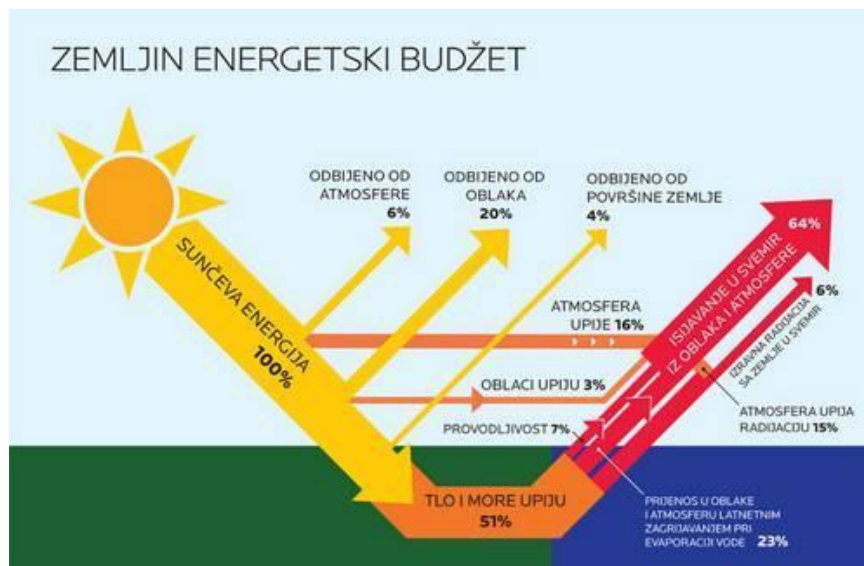
2. FOTONAPONSKI SUSTAV

Sunce je zvijezda Sunčevog sustava koja omogućava život na zemlji. Energija koju Sunce emitira prema svim planetima sustava rezultat je nuklearne fuzije unutar jezgre Sunca. U procesu fuzije više se atomskih jezgri spaja u jednu težu atomsku jezgru pri čemu se oslobađa velika količina energije. Na ovaj način do Zemlje svake sekunde dolazi velika količina energije, koju ipak i uz najnoviju opremu nemoguće je u potpunosti iskoristiti. Razlozi tome su slabo razvijena tehnologija, promjene jakosti zračenja tijekom sata i dana, ovisnost zračenja o klimatskim uvjetima, nemogućnost skladištenja energije. Zbog ovih se razloga Sunčeva energija u velikoj mjeri koristi za dobivanje toplinske energije, ali velika ulaganja u poboljšanje tehnologije dovode do povećanja broja izgrađenih fotonaponskih sustava u svijetu. Sunčevo zračenje koje dolazi do Zemlje ovisi o satu tijekom dana i godišnjim dobima. Na slici 2.1. moguće je vidjeti pozicije u kojima se Zemlja nalazi tijekom godine. Sunčevo zračenje najveće je kada je Zemlja najdalje od Sunca, a najmanje je kada je Zemlja najbliže Suncu.



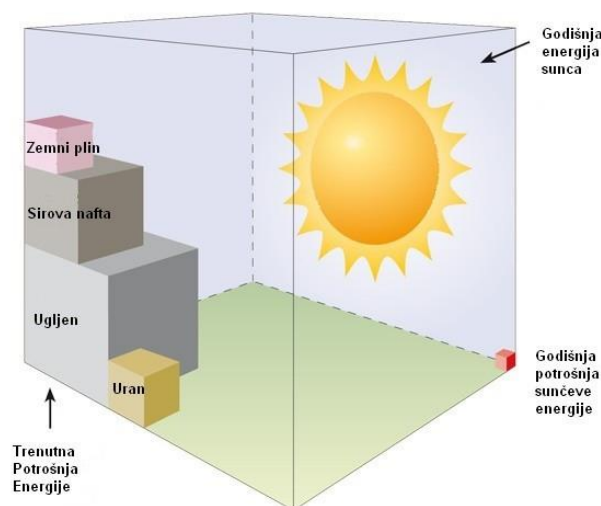
Slika 2.1. Put Zemlje oko Sunca tijekom godine [6]

Sunčevo zračenje koje dolazi do Zemlje ne apsorbira se u potpunosti, nego se dio odbija od atmosfere i odlazi nazad u svemir, dok dio zračenja prolazi atmosferski plašt. Dio zračenja koji prođe atmosferu zagrijava površinu zemlje dok se ostatak odbija od nje. Odbijeni dio zračenja prilikom izlaska iz atmosfere ponovno se odbija od stakleničkih plinova te se tako stvara efekt staklenika koji kao posljedicu ima dodatno zagrijavanje zemljine površine. Ukupnu bilancu Sunčevog zračenja moguće je vidjeti na slici 2.2.



Slika 2.2. Bilanca Sunčevog zračenja na Zemlji [7]

Prirodni potencijal energije Sunčeva zračenja veći je od zbroja svih zaliha fosilnih i nuklearnih goriva. Tehnički potencijal energije Sunčevog zračenja je još uvijek veći od ukupne svjetske potrošnje energije. Na slici 2.3. moguće je vidjeti koliki je potencijal Sunčevog zračenja u usporedbi sa svjetskom potrošnjom fosilnih goriva.



Slika 2.3. Potencijal Sunčevog zračenja [8]

U tablici 1. moguće je vidjeti kako se potreba za energijom u svijetu utrostručila. Također moguće je vidjeti kako se udio korištenja nafte u proizvodnji električne energije smanjio te kako ugljen drži prvo mjesto kao najkorišteniji izvor za dobivanje električne energije. Vodne snage u koje se ubrajaju sve hidroelektrane neovisno o snazi zauzimaju prvo mjesto u obnovljivim izvorima električne energije.

Tablica 1. *Udjeli izvora energije u bruto proizvodnji električne energije u svijetu [1]*

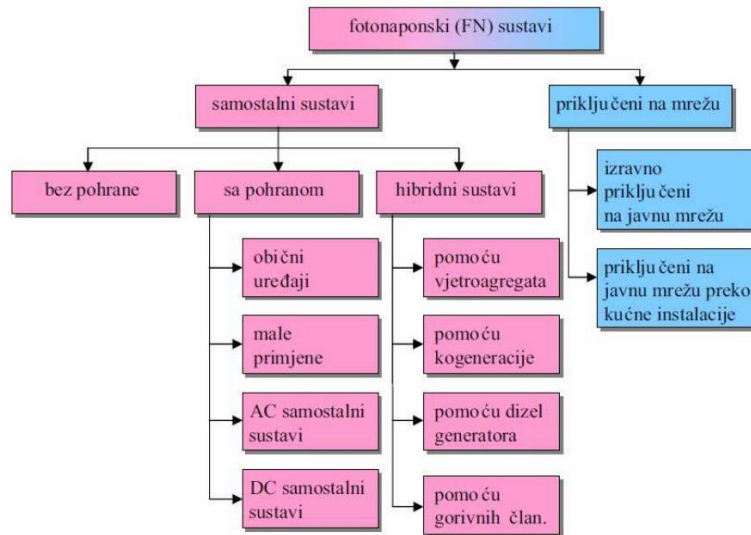
Izvor energije	1973.		2009.		rast, %
	TWh	udio, %	TWh	udio, %	
Nafta	1510	24,7	1023	5,1	-1,08
Ugljen	2342	38,3	8142	40,6	3,52
Prirodni plin	740	12,1	4292	21,4	5,00
Nuklearno gorivo	202	3,3	2687	13,4	7,46
<i>Neobnovljivi izvori</i>	4794	78,4	16144	80,5	3,43
Vodne snage	1284	21,0	3294	16,2	2,61
Ostali OIE	37	0,6	662	3,3	8,37
<i>Obnovljivi izvori</i>	1321	21,6	3911	19,5	3,06
Ukupno	6115	100	20055	100	3,35

Fotonaponska pretvorba je izravno dobivanje električne energije iz energije Sunčevog zračenja. Fotonaponska pretvorba odvija se na fotonaponskoj ćeliji koja tako postaje strujni izvor. Sunčeva se svjetlost sastoji od fotona čija energija ovisi o frekvenciji fotona koja je obrnuto proporcionalna valnoj duljini fotona što se može prikazati formulom:

$$E = h \cdot \nu \quad (2.1)$$

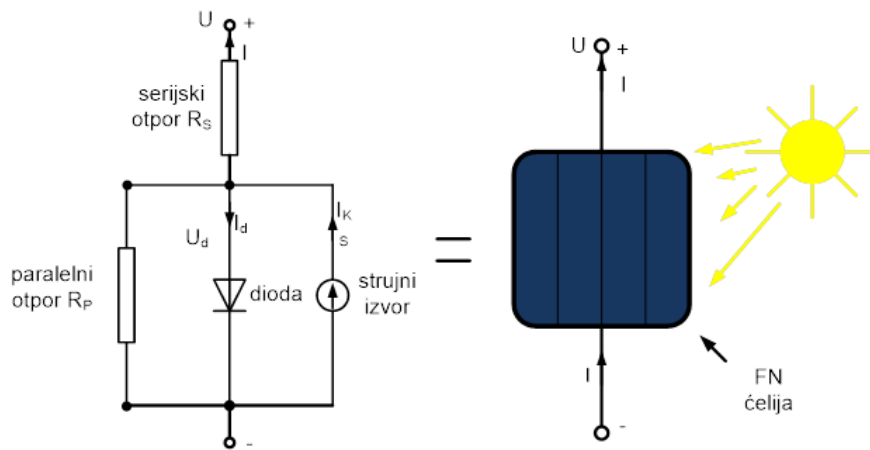
gdje je h – Planckova konstanta koja iznosi $6,625 \cdot 10^{-34}$ Js.

Fotoni će uspjeti osloboditi elektron samo ako imaju energiju koja je veća od energije vezanja elektrona. Ova se pojava naziva fotoelektrični efekt. Slobodni elektroni putuju na površinu materijala dok na svom mjestu ostavljaju šupljinu. Ovakav razmještaj elektrona i šupljina stvara razliku potencijala odnosno napon. Ukoliko se površine izvana spoje vodljivim materijalom (kao kod baterije) poteći će struja. Fotonaponska ćelija poluvodički je sklop koji pretvara Sunčevu energiju u električnu. Budući da su napon i struja generirani na ćeliji vrlo mali, ćelije se vežu u seriju i paralelu što čini fotonaponski modul. Fotonaponski moduli se dalje vežu u nizove, također, serijski i paralelno. Na slici 2.4. moguće je vidjeti podjelu fotonaponskih sustava.



Slika 2.4. Podjela fotonaponskih sustava [9]

Fotonaponska ćelija poluvodički je element koji zbog fotoelektričnog efekta izravno pretvara Sunčevu energiju u električnu energiju. Metalni kotnakti se nalaze s obje strane ploče te se tako prikuplja inducirana struja. Gornja površina ćelije ima i antirefleksirajuću površinu kako bi se što veći dio Sunčevog zračenja iskoristio i pretvorio u električnu energiju. Nadomjesnu shemu fotonaponske ćelije moguće je vidjeti na slici 2.5.



Slika 2.5. Nadomjesna shema fotonaponske ćelije [10]

Struja fotonaponske ćelije određena je izrazom:

$$I = I_{fs} - I_d - I_p = I_{fs} - I_0 \left[e^{\frac{e(U+IR_s)}{mkT}} - 1 \right] - \frac{U}{R_p} \quad (2.2)$$

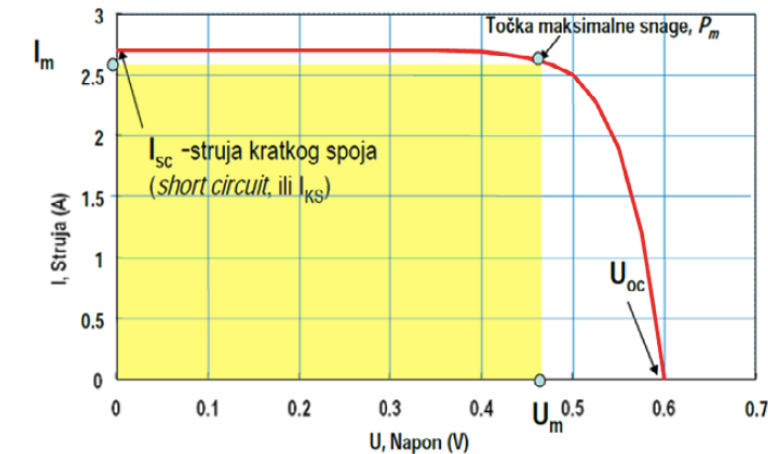
gdje su:

- I – struja ekvivalentnog sklopa prema slici 2.5.
- I_{fs} – foto struja
- I_d – struja diode
- I_p – struja kroz paralelni otpor
- U – napon
- R_p – paralelni otpor FN ćelije
- I_0 – struja zasićenja
- e – elementarni naboj, $e=1,602176462 \cdot 10^{-19}$ As
- R_s – serijski otpor FN ćelije
- m – parametar FN ćelije, $m=1$
- k – Boltzmanova konstanta, $k=1,3806 \cdot 10^{-23}$ J/K
- T – apsolutna temperatura

Ukoliko se zanemari serijski i paralelni otpor, tada vrijedi:

$$I = I_{fs} - I_0 \left[e^{\frac{e(U+IR_s)}{mkT}} - 1 \right] \quad (2.3)$$

Strujno-naponska karakteristika može se vidjeti na slici 2.6.



Slika 2.6. Strujno-naponska karakteristika fotonaponske ćelije [10]

Strujno naponska karakteristika fotonaponske ćelije ima 3 karakteristične točke:

- Struja kratkog spoja
- Točka maksimalne snage
- Napon praznog hoda

Parametri pomoću kojih se može opisati fotonaponska ćelija su:

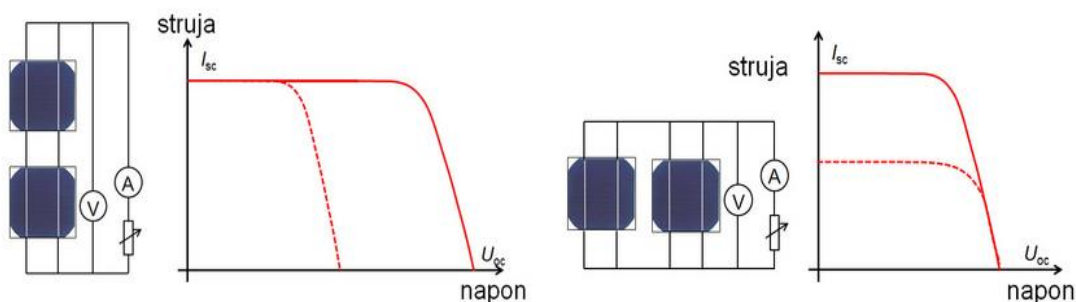
- Struja kratkog spoja (struja koja poteče kada je $U=0$, a struja kratkog spoja jednaka foto struji $I_{ks}=I_{fs}$)
- Napon praznog hoda (napon kada su stezaljke slobodne, bez tereta)
- Učinkovitost (ovisi o Sunčevom zračenju, snazi u točki maksimalne snage i površini ćelije)

$$\eta_{FNC} = \frac{P_{MPP}}{G \cdot A_{FNC}} \cdot 100 \quad (2.4)$$

- Faktor ispune (koeficijent koji pokazuje koliki je omjer maksimalne snage te umnoška struje kratkog spoja i napona praznog hoda)

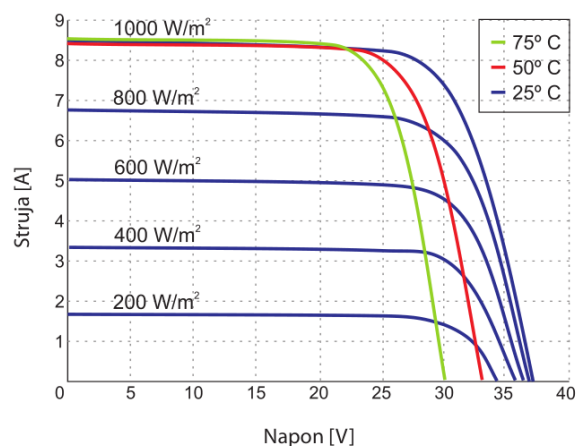
$$F = \frac{P_{MPP}}{U_{PH} \cdot I_{KS}} = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{PH} \cdot I_{KS}} \quad (2.5)$$

Jedna ćelija daje napon od oko 0,5 V što je mali iznos te se iz tog razloga ćelije povezuju i tako povezane se nazivaju fotonaponski modul. Fotonaponske se ćelije izvede u obliku: monokristalnog i polikristalnog silicija, trakastog silicija ili tehnologiji tankog filma. Tipični moduli se sastoje od oko 60 ćelija i imaju izlazni napon od oko 30 V. Dodatno se moduli međusobno povezuju kako bi se povećala izlazna struja odnosno napon. Dodavanje modula u seriju povećava ukupni napon niza modula, a dodavanje ćelija u paralelu povećava struju. Na slici 2.7. moguće je vidjeti rezultat povezivanja više modula u seriju odnosno u paralelu.

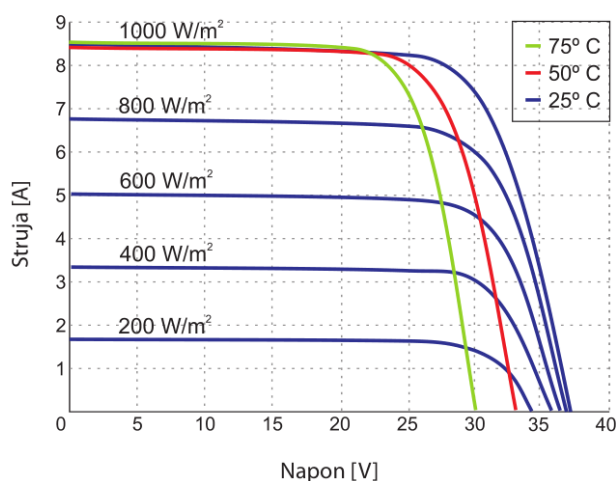


Slika 2.7. Rezultat serijskog i paralelnog povezivanja modula [11]

U kasnijim promatranjima i mjerenjima će se koristiti dva modula: BISOL BMO 250 i BISOL BMU 250. Teoretske strujno naponske karakteristike moguće je vidjeti na slikama 2.8. i 2.9.



Slika 2.8. *U-I karakteristika modula BISOL BMO 250[12]*



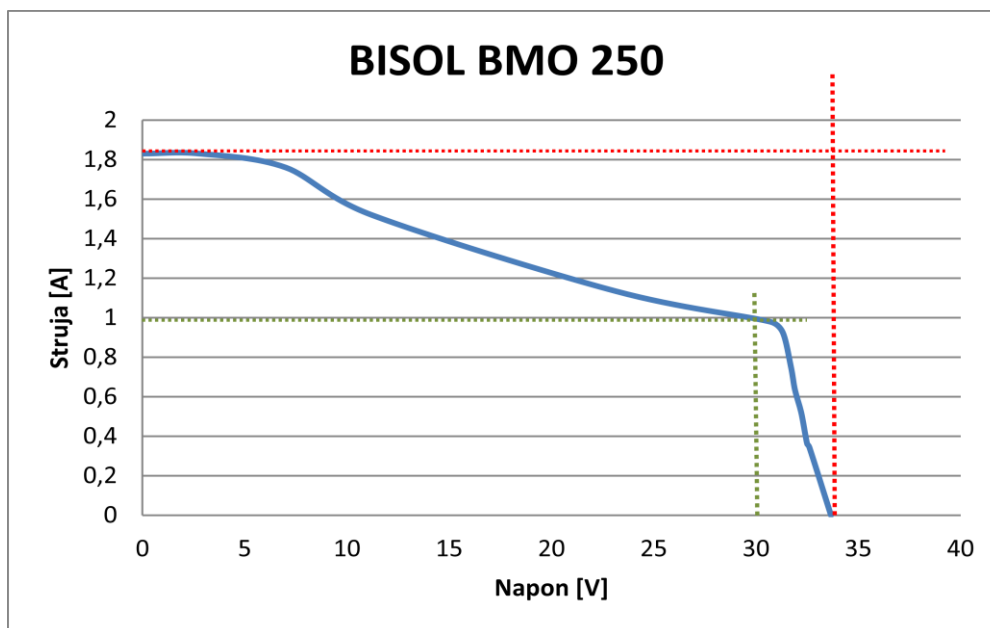
Slika 2.9. *U-I karakteristika modula BISOL BMU 250[13]*

Tablice 2 i 3 prikazuju rezultate mjerenja na fotonaponskim modulima BISOL BMO 250 i BISOL BMU 250 koja su izvršena u sklopu mjerenja iz laboratorijske vježbe 'Uvod u fotonaponske sustave' iz kolegija 'Obnovljivi izvori energije'. Budući da moduli nisu osvijetljeni dnevnim svjetlošću, već laboratorijskim izvorom svjetla, moduli nisu ravnomjerno osvijetljeni te se zbog toga krivulja razlikuje od teoretske. Neravnomjerna osvijetljenost teoretski je jednaka zasjenjenju jednog dijela modula te se na slikama 2.10. i 2.11. može vidjeti što se u praksi dogodi sa strujno naponskom karakteristikom modula ako dođe do zasjenjenja. BISOL BMO 250 je modul koji je monokristalne izvedbe dok je BMU 250 polikristalne izvedbe. Polja u tablici koja su obojena predstavljaju točke maksimalne snage.

Tablica 2. Rezultati mjerenja za modul BISOL BMO 250

BISOL BMO 250															
Redni broj		PH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	KS
P	W	0	11,25	11,7	13,32	16,81	20,22	23,84	28,98	30,06	26,22	17,02	12,32	5,12	0
U	V	33,66	32,6	32,5	32,4	32,2	31,9	31,7	31,3	30,7	23,1	11,2	7	2,8	0
I	A	0	0,35	0,36	0,41	0,52	0,63	0,75	0,93	0,98	1,14	1,52	1,76	1,83	1,83

Slika 2.10. predstavlja grafički prikaz rezultata mjerenja za modul BISOL BMO 250.

**Slika 2.10.** U-I karakteristika modula BISOL BMO 250

Snaga Sunčevog zračenja u mjerenjima je bila $G = 196,6 \text{ W/m}^2$, a površina modula $A = 1,634 \text{ m}^2$. Uvrštavanjem ovih vrijednosti i izmjerenih rezultata u (2.4) za učinkovitost se dobije:

$$\eta = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{G \cdot A}$$

$$\eta = \frac{30,7 \cdot 0,979}{196,6 \cdot 1,634}$$

$$\eta = 9,3\%$$

Ukoliko se rezultati mjerenja uvrste u (2.5) za faktor ispune, dobije se:

$$F = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{OC} \cdot I_{SC}}$$

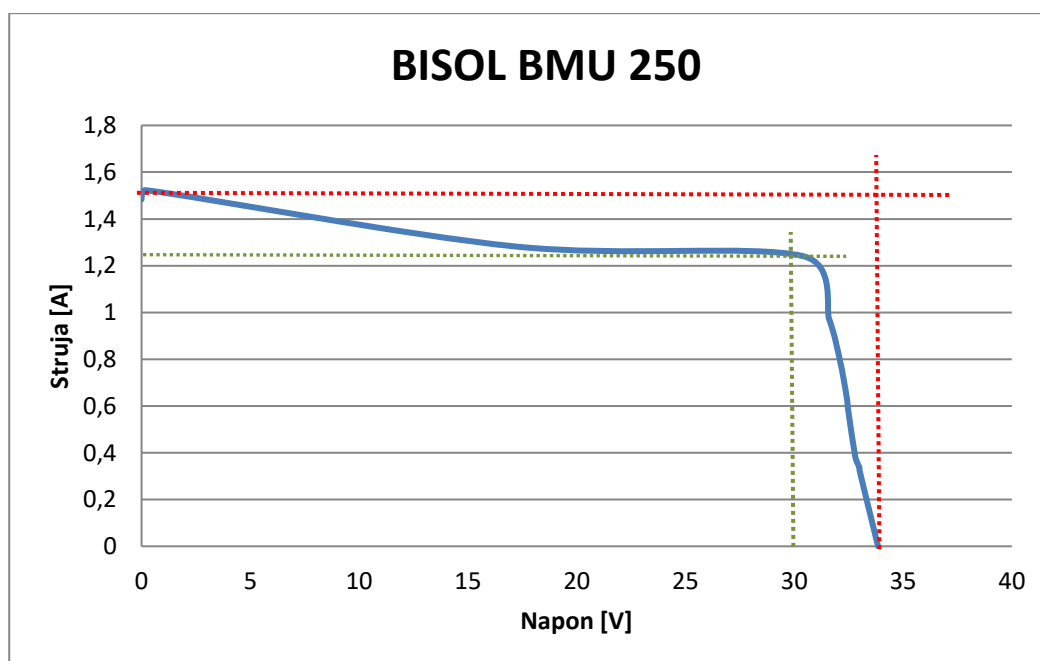
$$F = \frac{30,7 \cdot 0,979}{33,66 \cdot 1,83}$$

$$F = 0,488$$

Tablica 3. Rezultati mjerenja za modul BISOL BMU 250

BISO BMU 250														
Redni broj		PH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	KS
P	W	0	10,69	11,09	11,71	12,59	18,43	20,83	25,49	30,72	37,73	22,05	0,31	0
U	V	33,9	33	33	32,9	32,8	32,5	32,4	32,1	31,6	30,4	17,2	0,2	0
I	A	0	0,32	0,34	0,36	0,38	0,57	0,64	0,79	0,97	1,24	1,28	1,52	1,48

Analogno prethodnom primjeru dobiju se strujno-naponska karakteristika modula te učinkovitost i faktor ispunje.



Slika 2.11. U-I karakteristika modula BISOL BMU 250

Uvrštavanjem ovih ranije navedenih vrijednosti i izmjerenih rezultata u (2.4) za učinkovitost se dobije:

$$\eta = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{G \cdot A}$$

$$\eta = \frac{30,4 \cdot 1,241}{233,2 \cdot 1,634}$$

$$\eta = 9,9\%$$

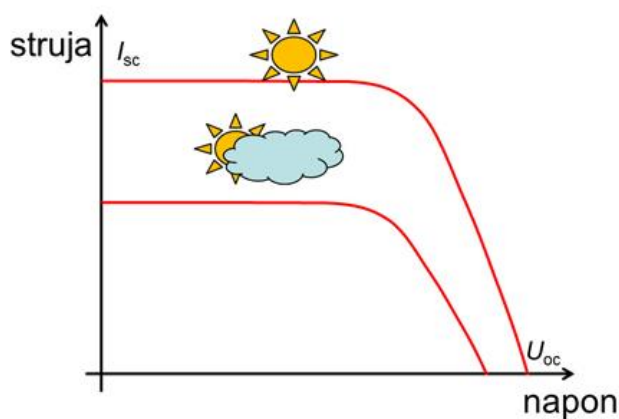
Ukoliko se rezultati mjerenja uvrste u (2.5), za faktor ispune se dobije:

$$F = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{OC} \cdot I_{SC}}$$

$$F = \frac{30,4 \cdot 1,241}{33,85 \cdot 1,484}$$

$$F = 0,751$$

Osim o broju modula koji su spojeni u seriju ili paralelu strujno-naponska karakteristika ovisi i o intenzitetu Sunčevog zračenja odnosno osvjetljenosti te o temperaturi. Slika 2.12. prikazuje kako izgleda karakteristika fotonaponskog sustava ukoliko se povećaju temperatura i Sunčevo zračenje.



Slika 2.12. Ovisnost U-I karakteristike o ozračenosti i temperaturi [11]

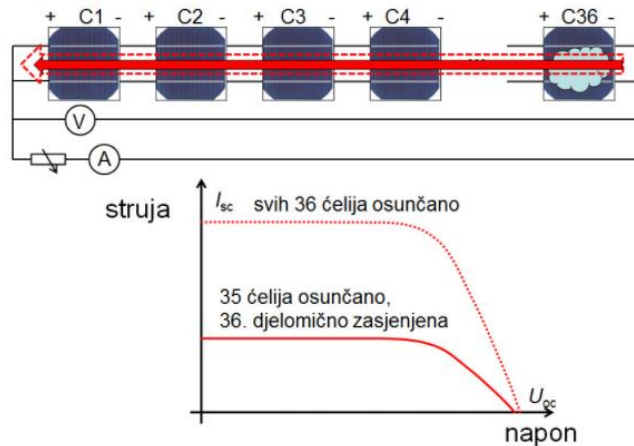
Nominalna radna temperatura ćelije ili *NOCT* podatak je koji daje izvođač, a vrijedi kada je temperatura okoline 20°C , Sunčevo zračenje $0,8 \text{ kW/m}^2$ i brzina vjetra 1 m/s . Temperatura ćelije za druge vanjske uvjete može se odrediti prema sljedećem izrazu:

$$T_{\text{cel}} = T_{\text{okoline}} + \left(\frac{NOCT - 20^0}{0,8} \right) \cdot G \quad (2.6)$$

gdje su:

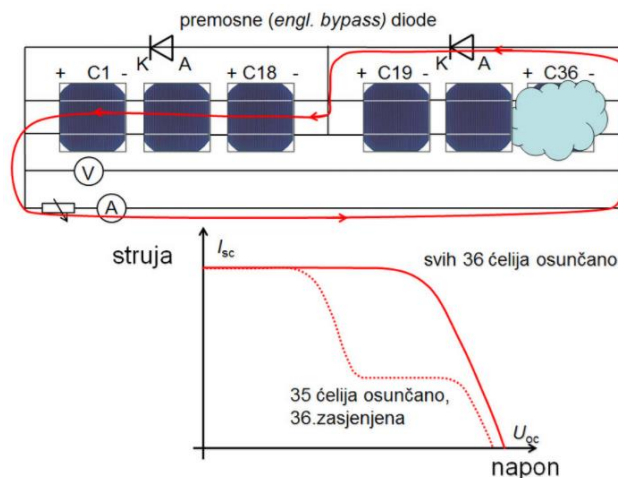
- T_{cel} – temperatura ćelije [$^{\circ}\text{C}$]
- T_{okoline} – temperatura okoline [$^{\circ}\text{C}$]
- G – Sunčevo zračenje [kW/m^2].

Budući da je vremenske uvjete nemoguće kontrolirati, u bilo koje doba dana moguće je da oblak zasjeni jedan od modula u nizu. Osim oblaka, to može biti i nakupina lišća tijekom jeseni ili veća količina snijega tijekom zime. U tom slučaju cijelom je nizu modula smanjena izlazna struja kako je prikazano na slici 2.13. Kao što se vidi na slici niz se sastoji od 36 modula te je jedan od njih zasjenjen utjecajem atmosferskih događanja.



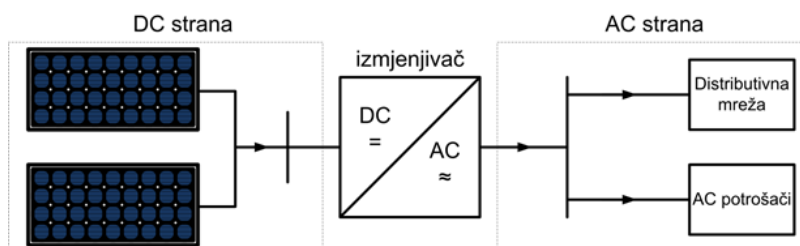
Slika 2.13. Utjecaj zasjenjenja modula na U - I karakteristiku [11]

Ovakva pojava za posljedicu ima pregrijavanje modula i njegovo uništavanje. Dodavanjem bypass diode ovaj se gubitak uvelike smanjuje jer ako je modul zasjenjen, dioda provodi i stvara na sebi pad napona od oko 0,6 V što je puno manje nego kada je nema. Idealno rješenje bilo bi kada bi svaki modul imao svoju bypass diodu, no to se u praksi ne radi jer je ekonomski neisplativo. Umjesto toga se na veći broj modula, njih 15 do 20, stavlja po jedna bypass dioda što je u praksi sasvim dovoljno. Na slici 2.14. moguće je vidjeti prethodni primjer s dodanim dvjema bypass diodama, jedna na svakih 18 modula.



Slika 2.14. Smanjenje utjecaja zasjenjenja modula na U - I karakteristiku pomoću bypass diode [11]

Veliki se broj fotonaponskih modula povezuje i tako povezani moduli čine fotonaponske elektrane koje mogu biti spojene na mrežu ili autonomne. Mrežne fotonaponske elektrane ne zahtijevaju spremnik energije odnosno bateriju jer se sva proizvedena električna energija troši na mjestu, a višak se isporučuje u mrežu. Ako postoji manjak električne energije, on se nadoknađuje iz mreže na koju je elektrana spojena. Fotonaponske elektrane spojene su na mrežu preko uzemljivača koji mijenja električnu struju iz istosmjerne u izmjeničnu te ju potom filtrira. Slika 2.15. prikazuje osnovnu shemu fotonaponske elektrane spojene na mrežu.



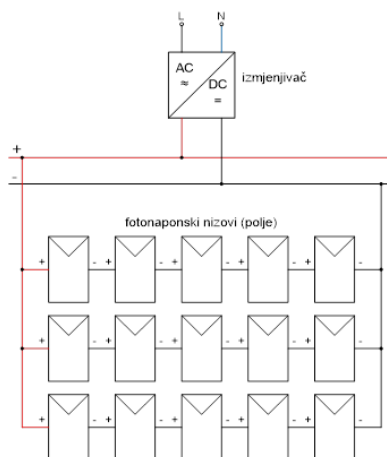
Slika 2.15. FN sustav spojen na mrežu [2]

Mrežne fotonaponske elektrane se po broju izmjenjivača dijele na:

- izvedbe s jednim izmjenjivačem
- izvedbe s jednim izmjenjivačem za svaki niz
- izvedbe s više izmjenjivača

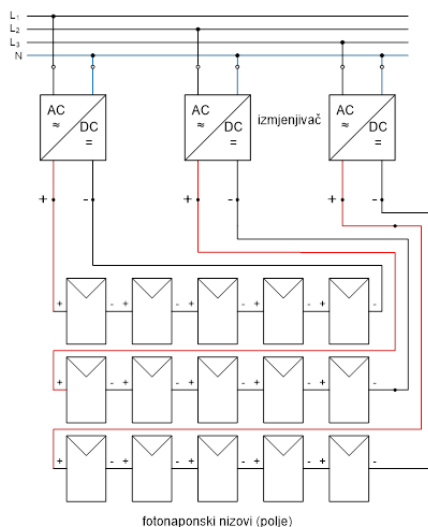
Na slikama 2.16., 2.17. i 2.18. moguće je vidjeti svaku od navedenih izvedbi.

Izvedba s jednim izmjenjivačem se u većini slučajeva koristi za elektrane manjih snaga. Svi nizovi koji čine elektranu spojeni su na jedan izmjenjivač. Zahtjev koji se stavlja pred ovu izvedbu je da su svi moduli u nizovima jednakih karakteristika te da se unutar nizova nalazi jednak broj modula. Prednost ovakve izvedbe su manji troškovi i jednostavnije održavanje. Veliki je nedostatak isključenje cijele elektrane ukoliko je jedan od modula zasjenjen ili je van funkcije uslijed tehničkog kvara.



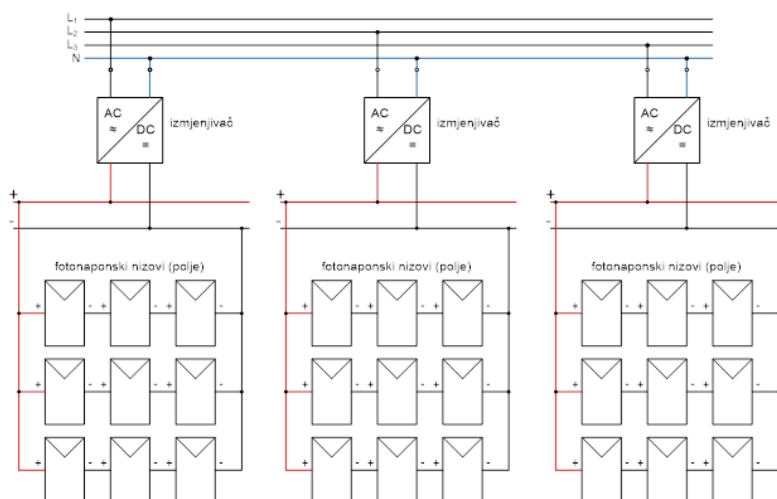
Slika 2.16. Mrežna FN elektrana s jednim izmjenjivačem [2]

Izvedbe s jednim izmjenjivačem za svaki fotonaponski niz koriste se kod elektrana srednjih snaga. U ovakvoj se izvedbi povećava učinkovitost i pouzdanost same elektrane zbog činjenice da svaki izmjenjivač prati svoju točku maksimalne snage. U slučaju kvara jednog izmjenjivača ili jednog fotonaponskog modula ostali nizovi nastavljaju neometano proizvoditi električnu energiju. U ovakvoj izvedbi ne moraju svi moduli imati iste karakteristike.



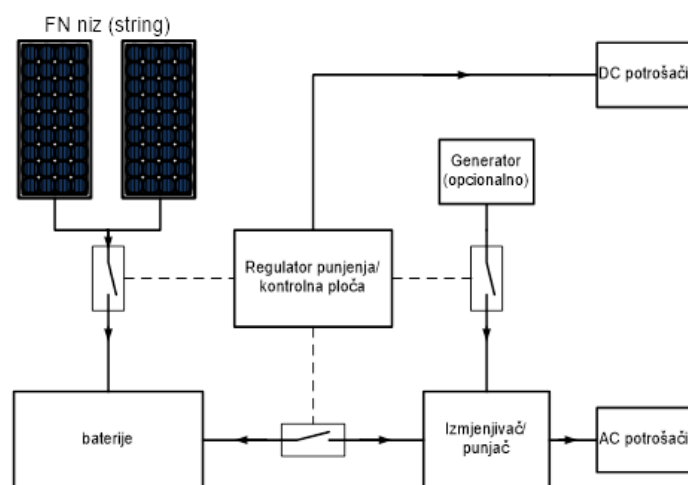
Slika 2.17. Mrežna FN elektrana s jednim izmjenjivačem za svaki niz [2]

Izvedbe s više izmjenjivača koriste se kod elektrana većih snaga. Kod ovakvih izvedbi fotonaponsko polje podijeljeno je u više podpolja i to tako da svako podpolje ima svoj izmjenjivač na koji je paralelno spojeno više fotonaponskih nizova. Prednost ovakve izvedbe je da u slučaju kvara jednog izmjenjivača neće doći do isključivanja cjelokupne elektrane, nego će ostatak elektrane moći nastaviti proizvodnju električne energije.



Slika 2.18. Mrežna FN elektrana s više izmjenjivača [2]

Autonomne fotonaponske elektrane vrsta su elektrana koje samostalno opskrbljuju potrošače bez spoja na mrežu. Zadaća je ovakvih elektrana da u potpunosti pokriju potrošnju električne energije sustava na koji su spojene. Autonomne fotonaponske elektrane, za razliku od mrežnih, trebaju spremnik energije odnosno bateriju. Razlog za to su promjenjivi atmosferski uvjeti odnosno sunčeva osvjetljenost koja tijekom dana nije stalna. Još jedan od razloga zbog kojih je baterija potrebna je taj što se krivulja proizvodnje električne energije ne podudara s dnevnim dijagramom potrošnje nekog kućanstva. Ovakvom izvedbom je višak energije koji se proizvede tijekom dana moguće spremiti te ga iskoristiti kasnije kada je vrhunac potrošnje električne energije. Autonomne fotonaponske elektrane mogu biti i bez baterija, ali tada takve elektrane napajaju potrošača koji koriste električnu energiju onda kada je ona dostupna. Slika 2.19. prikazuje načelnu shemu autonomne fotonaponske elektrane.

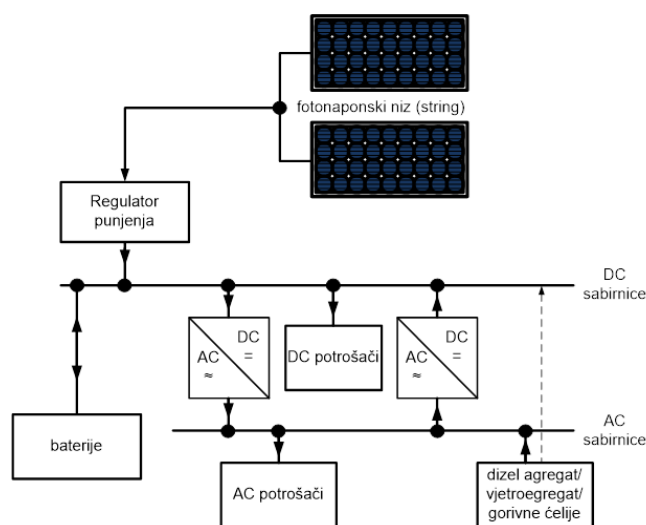


Slika 2.19. Shema autonomne FN elektrane [2]

Osnovni dijelovi autonomne FN elektrane su:

- Tragač maksimalne snage: stalno prilagođava točku rada da bi povećao vršnu snagu pod danim uvjetima. Izlaz uređaja vodi do izmjenjivača koji pretvara istosmjernu struju u izmjeničnu struju.
- Regulator punjenja je obično istosmjerni (DC-DC) pretvarač. Kada sunce nije na raspolaganju, baterija se prazni preko pretvarača kako bi napajala potrošače.
- Modul nadzora sakuplja signale sustava, kao što su struje i napon uređaja i baterije te uključuje i gasi punjače po potrebi.
- Modul upravljanja je središnji upravljač za čitav sustav.

Fotonaponske elektrane čak i uz spremnik energije nisu dovoljne za pokrivanje potrošnje kućanstva zbog stalne promjenjivosti Sunčevog zračenja tijekom dana i godine. U obzir treba uzeti i da tijekom noći uopće ne postoji proizvodnja električne energije. Jedno je od mogućih rješenja dodavanje još nekoliko izvora električne energije. Mogući izvori mogu biti agregat na biodizel, vjetroelektrana ili gorivna ćelija. Fotonaponske elektrane koje osim fotonaponskih modula sadrže i neki drugi izvor energije nazivaju se hibridnim fotonaponskim elektranama. Izvedba s vjetroelektranom moguća je jer tijekom noći kada nema Sunčevog zračenja postoji određena vjerojatnost da će biti vjetra. U realizaciji s dizel agregatom treba voditi računa da se agregat opterećuje s oko 80 % nazivne snage. Kada se kao dodatni izvor koristi gorivna ćelija, u slučaju viška električne energije, moguća je proizvodnja vodika kako bi se sva energija iskoristila. Na slici 2.20. moguće je vidjeti shemu hibridne fotonaponske elektrane.



Slika 2.20. Shema hibridne FN elektrane [2]

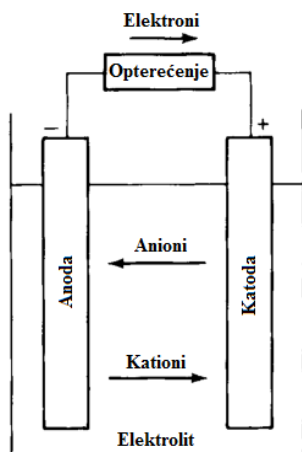
3. BATERIJA KAO SPREMNIK ENERGIJE

Baterija je uređaj koji izravno pretvara kemijsku energiju u električnu. Baterija se sastoji od više ćelija koje su spojene serijski i paralelno kako bi izlazna električna energija bila što veća. Baterija se sastoji od tri dijela, a to su:

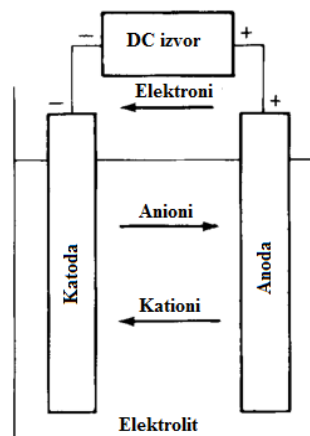
- Anoda – negativna elektroda koja tijekom reakcije daje elektrone u strujni krug i pritom oksidira
- Katoda – pozitivna elektroda koja tijekom reakcije prima elektrone s anode i pritom se reducira
- Elektrolit – tekući ili kruti medij koji omogućava prijelaz elektrona s anode na katodu

Cink i litij su metali koji se najčešće koriste za izradu anode zbog jeftine i jednostavne izrade i dobre vodljivosti. Metalni oksidi su materijali koji se najčešće koriste za izradu anode, a moraju ostati stabilni pri kontaktu s elektrolitom. Elektrolit mora biti dobar vodič slobodnih elektrona, ali sam ne smije biti vodič električne struje kako ne bi došlo do unutarnjeg kratkog spoja. Elektrolit mora očuvati svoja svojstva pri promjeni temperature, ne smije reagirati s anodom i katodom te njegova izrada mora biti jeftina. Većina elektrolita su vodene otopine različitih soli. Elektrode su međusobno odvojene i izolirane kako bi se spriječio kratki spoj, no okružene su elektrolitom. Baterije mogu biti izrađene u raznim oblicima kao što su valjak, ploča, kugla ili prizma te moraju imati osigurano odvođenje plina koji može nastati u kemijskoj reakciji.

Primarne su baterije vrsta baterija koje se ne mogu puniti, te se nakon pražnjenja odlaze na za to predviđeno mjesto. Ovakve su baterije uglavnom jeftine i jednostavne za korištenje te imaju široku upotrebu u kućanstvu. Koriste se u fotoaparatom, elektroničkim i električnim uređajima te raznim igračkama. Sekundarne ili punjive baterije su one koje se mogu puniti nakon što su jednom ispražnjene prolaskom struje u suprotnom smjeru od struje pražnjenja. Ovakve baterije se najčešće koriste kao akumulatori. Za njih je karakteristično da imaju veliku stopu pražnjenja te da dobro podnose niske temperature. Na slikama 3.1. i 3.2. moguće je vidjeti osnovni princip punjenja i pražnjenja baterije.



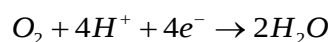
Slika 3.1. Pražnjenje baterije [15]



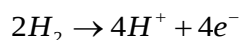
Slika 3.2. Punjenje baterije [15]

Gorivne ćelije su posebna vrsta baterija koje koriste gorivo za proizvodnju električne energije. Gorivo je materijal koji se mora unositi u ćeliju kako bi se odvijala proizvodnja električne energije. Razlika u radu gorivne ćelije i ostalih vrsta baterija je ta što se elektrode u gorivnoj ćeliji za vrijeme reakcije ne troše već su katalizatori, odnosno ubrzavaju kemijsku reakciju. Kao katoda odnosno katodni element se koristi kisik. Kao anodni element se koriste plinovi ili tekućine, najčešće vodik. Gorivna ćelija se, osim po svojoj izvedbi anode i katode, razlikuje od standardnih baterija po tome što se kao produkt kemijske reakcije dobije voda.

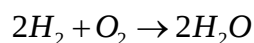
Kemijska reakcija koja se odvija na katodi:



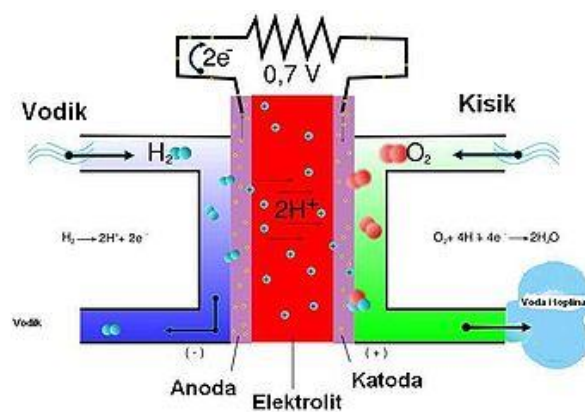
Kemijska reakcija koja se odvija na anodi:



Kao što je ranije rečeno, u sumarnoj reakciji se kao produkt dobiva voda:



Na slici 3.3. moguće je vidjeti osnovni model gorivne ćelije.



Slika 3.3. Gorivna ćelija [16]

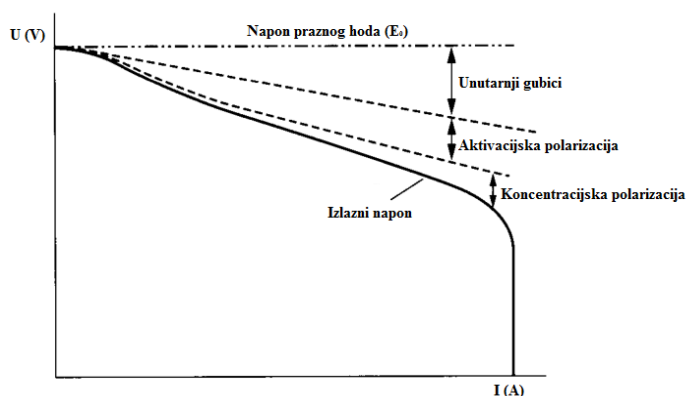
Napon baterije ovisi o materijalima koji se koriste za izradu elektroda. Taj se napon može odrediti eksperimentalno ili iz energije slobodnih elektrona koji se oslobađaju tijekom reakcije. Kapacitet baterije je količina naboja koji sudjeluje u kemijskoj reakciji, a izražava se u [C] (kulon) i [Ah] (ampersati). Energija baterije je umnožak napona i kapaciteta baterije. U idealnom slučaju sva bi se raspoloživa energija pohranjena unutar baterije pretvorila u električnu, ali to nimoguće je zbog gubitka energije na polarizaciju elektroda. Budući da baterija ima unutarnji otpor, napon se zbog protjecanja struje dodatno smanjuje. Ukupni napon baterije može se iskazati kao:

$$E = E_0 - (\eta_{ct,a} + \eta_{c,a}) - (\eta_{ct,c} + \eta_{c,c}) - iR_i \quad (3.1)$$

gdje su:

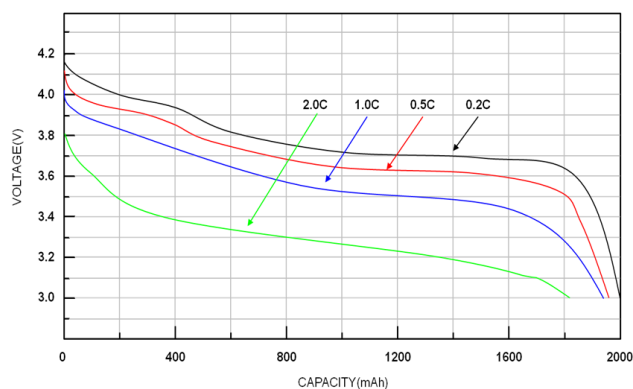
- E_0 – napon praznog hoda
- $\eta_{ct,a}$, $\eta_{ct,c}$ – aktivacijska polarizacija anode i katode
- $\eta_{c,a}$, $\eta_{c,c}$ – koncentracijska polarizacija anode i katode
- i – struja baterije
- R_i – unutarnji otpor baterije

Aktivacijska polarizacija se može objasniti kao gubici koji su uzrokovani sporim odvijanjem elektrokemijske reakcije na površini elektrode, odnosno barijera koju je potrebno nadvisiti kako bi reakcija započela. Koncentracijska polarizacija su gubici koji su uzrokovani razlikom između koncentracije iona na elektrodama i koncentracije iona u ostatku elektrolita. Unutarnji gubici ili ohmska polarizacija su gubici koji su uzrokovani otporom strujanja iona kroz elektrolit i elektrona kroz materijal elektroda. Na slici 3.4. moguće je vidjeti izlazni napon baterije koji je jednak razlici napona praznog hoda te polarizacije i unutarnjeg pada napona.



Slika 3.4. Izlazni napon baterije [15]

Kao što se može vidjeti na slici 3.4. izlazni napon baterije manji je od napona praznog hoda odnosno teoretski maksimalnog napona. Taj teoretski maksimalni napon umanjen je za unutarnji pad napona i aktivacijsku i koncentracijsku polarizaciju. Kada bi izlazni napon baterije bio jednak teoretskom, baterija bi radila dok se elektrode ne bi istrošile i tada bi napon pao na nulu. U praksi je ipak izlazni napon sličniji krivulji sa slike 3.4. Na slici 3.5. moguće je vidjeti krivulje pražnjenja baterije u ovisnosti o naponu i brzini pražnjenja za Li-ion bateriju.



Slika 3.5. Krivulje pražnjenja za Li-ion baterije [17]

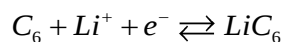
Baterije su pražnjene od 4,2 V do 3,0 V brzinama pražnjenja koje su prikazane kao udio ukupnog kapaciteta baterije. U kasnijim mjerenjima bit će korištene Li-ion baterije te je potrebno objasniti građu, funkcionalnost i karakteristiku istih. Za katodu ovih baterija se koriste slojeviti oksidi metala kao što su litij-kobalt oksid (LiCoO_2) ili litij-mangan oksid (LiMn_2O_4). Za anodu Li-ion baterija koristi se grafitni ugljik. Prednosti Li-ion baterija su dug životni vijek, veliki opseg radne temperature, dug životni vijek vanjske ljuske baterije, mala

brzina pražnjenja, velika brzina punjenja i visoka gustoća energije. Ove prednosti su dovele do toga da se potražnja za ovim baterijama povećala u zadnjih deset godina. Glavni nedostaci su cijena koja je za iste karakteristike veća nego kod Ni (Nikal) baterija te veliki gubici pri visokim temperaturama. Tijekom punjenja Li-ion baterije slobodni ioni litija usađuju se između slojeva ugljika na anodi bez da mijenjaju strukturalna svojstva anode, odnosno ugljika. Prilikom usađivanja dolazi do prelaska slobodnih elektrona s katode na anodu. Ovi slobodni elektroni nastaju zajedno sa slobodnim ionima litija. Ovaj slijed događaja može se opisati kemijskim reakcijama:

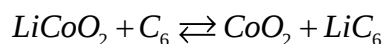
Kemijska reakcija koja se odvija na katodi:



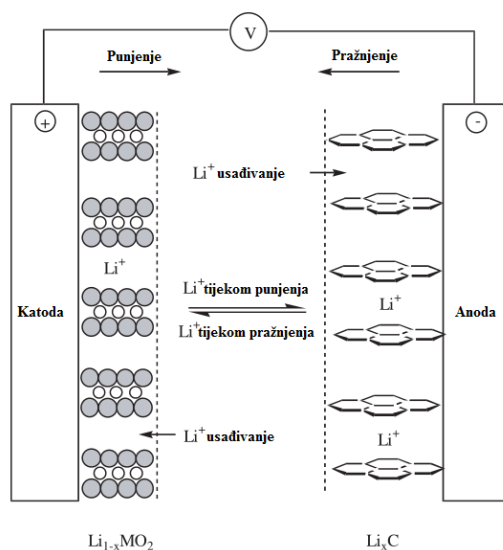
Kemijska reakcija koja se odvija na anodi:



Sumarna reakcija je:



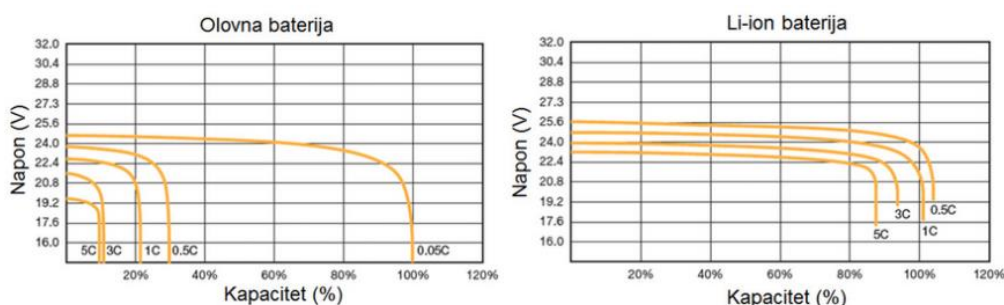
Punjenje je označeno desnim smjerom kretanja, a pražnjenje kretanjem ulijevo. Ovu kemijsku reakciju moguće je vidjeti na slici 3.6.



Slika 3.6. Elektrokemijski proces unutar Li-ion baterije [15]

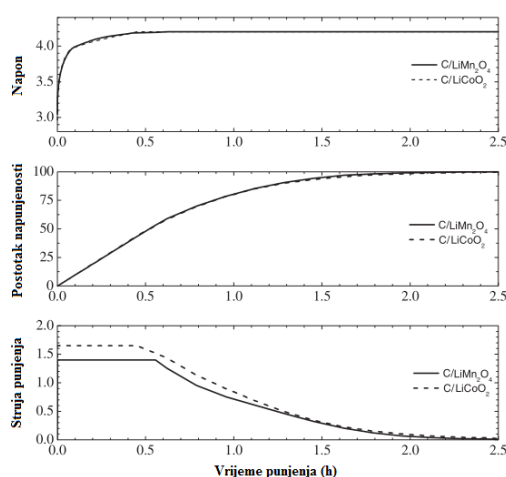
Najčešći elektroliti koji se koriste u ovoj vrsti baterija su u obliku tekućina (i to otopine litija), u obliku gela (otopljene litij) ili čvrste litijeve soli. Kao što je ranije navedeno elektrode

moraju biti međusobno razdvojene, a to se radi pomoću separatora koji je debljine (10-30) μm . Separator mora ostati stabilan u kontaktu s elektrolitom te mu se debljina ne smije smanjivati. Također, ne smije doći do mehaničkog probijanja separatora kako ne bi došlo do unutarnjeg kratkog spoja. U usporedbi s olovnim baterijama, litijska se smije isprazniti puno više, a da se i dalje može napuniti i normalno koristiti. Olovna baterija se smije isprazniti do 50 % svog kapaciteta, dok se litijska može isprazniti do 80 % kapaciteta. Također, za isti kapacitet i isti izlazni napon, litijska baterija ima 4 puta veću masu. Izlazni napon litijske baterije, za razliku od olovne, manje opada povećanjem struje pražnjenja. Ovu pojavu prikazuje slika 3.7.



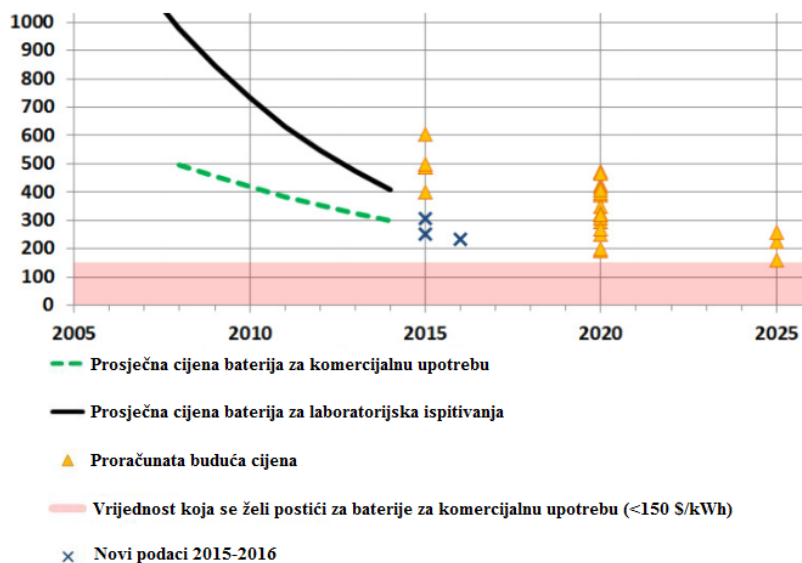
Slika 3.7. Ovisnost izlaznog napona o struji pražnjenja [19]

Prilikom punjenja litijskih baterija, napon punjenja mora biti (4,1-4,2) V. Punjenjem pri višem naponu iskorištava se veći kapacitet anode, ali se pritom smanjuje životni vijek baterije. Najčešće vrijeme punjenja litijskih baterija je oko 2,5 sati. Na slici 3.8. moguće je vidjeti napon, stanje napunjenosti i struju punjenja tijekom procesa punjenja litijske baterije.



Slika 3.8. Napon, stanje napunjenosti i struja punjenja litijske baterije [15]

Na slici 3.9. moguće je vidjeti cijenu baterija za laboratorijska ispitivanja i za komercijalnu upotrebu tijekom godina.

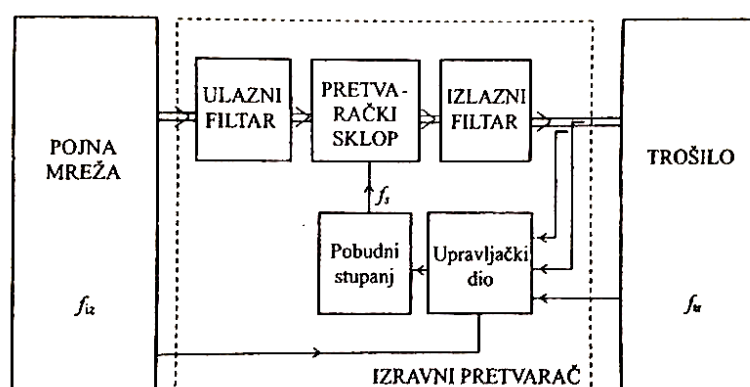


Slika 3.9. Cijena baterija kroz godine [27]

Moguće je uočiti kako cijena baterija drastično pada u posljednjih 10 godina te kako one postaju pristupačne komercijalnoj upotrebi. Sve većim razvojem tehnologije smanjuje se i cijena baterija, a konačni je cilj da cijena baterija bude ispod 150 \$ za energiju 1 kWh.

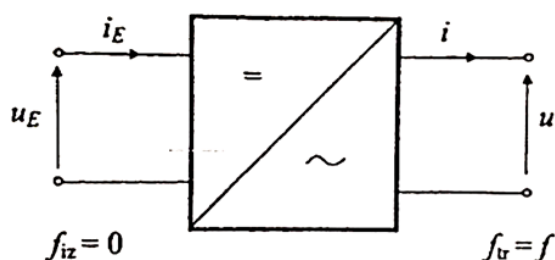
4. IZMJENJIVAČ

Svaki električki energetski sustav može se podijeliti na pojnu mrežu i trošilo. Pojna mreža je onaj dio sustava u kojemu se proizvodi električna energija, a trošilo je onaj dio sustava u kojemu se ta energija pretvara u neki drugi oblik. Osnovne karakteristike sustava su frekvencija, valni oblici napona i struje te broj faza. Karakteristike trošila nisu uvijek prilagođene karakteristikama pojne mreže. Mrežna pravila zahtijevaju određene parametre električne energije koju će izvor dati u mrežu. Slično tome, trošila zahtijevaju sebi svojstvene valne oblike struje i napona te njihove iznose. Iz ovih razloga se između pojne mreže i trošila moraju ugraditi uređaji koji će omogućiti povezivanje dva sustava različitih karakteristika. Ovakvi uređaji se nazivaju energetski pretvarači. S obzirom na vrstu procesa pretvorbe pretvarači se mogu podijeliti na izravne i neizravne. U neizravnim pretvaračima se električna energija pretvara u neki drugi oblik energije, a zatim ponovno u električnu energiju. U izravnim pretvaračima se proces pretvorbe odvija izravno i to u pasivnim električnim mrežama. Komponente koje se koriste u ovom procesu pretvorbe nazivaju se pretvaračke komponente. Izravni pretvarači mogu se podijeliti na transformatore i sklopne pretvarače. Sklopni pretvarači za svoje komponente koriste disipativne komponente, dok transformatori svoj rad baziraju na induktivno vezanim zavojnicama. Prema ranije navedenim karakteristikama pretvarači se mogu podijeliti na pretvarače frekvencije i pretvarače napona. Kako im i ime kaže, pretvarači frekvencije povezuju dva sustava različitih frekvencija dok pretvarači napona povezuju dva sustava različitih naponskih razina. Slika 4.1. prikazuje pretvarački sklop i njegove sastavne dijelove. Ulazni i izlazni filter su sklopovi za prilagodbu sklopa pojnoj mreži i trošilu. U upravljačkom se dijelu formira upravljački signal za pobudni stupanj.

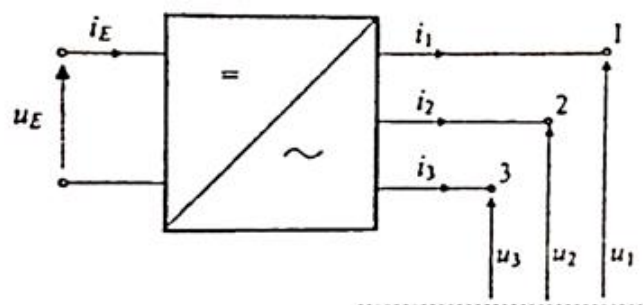


Slika 4.1. Sastavni dijelovi izravnog pretvarača [3]

Ako izmjenjivači sami diktiraju frekvenciju koja je generirana unutar sklopa, oni se nazivaju autonomnim izmjenjivačima. Ako frekvencija ovisi o postojanju aktivne izmjenične mreže, onda se nazivaju neautonomnim izmjenjivačima. Ovisno o trošilu, izmjenjivači mogu biti jednofazni i trofazni. Osim na jednofazne i trofazne, izmjenjivači se mogu podijeliti i na one u mosnom i polumosnom spoju.

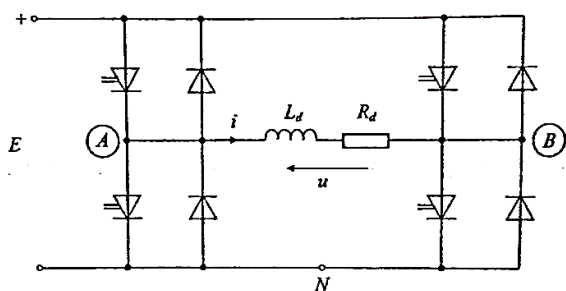


Slika 4.2. Simbol jednofaznog izmjenjivača [3]

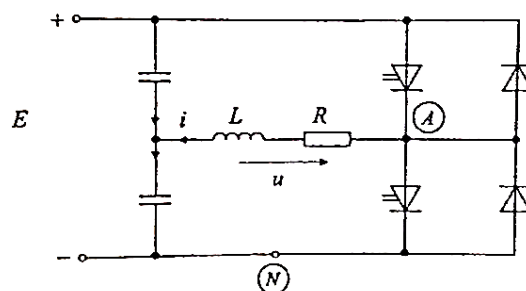


Slika 4.3. Simbol trofaznog izmjenjivača [3]

Promatrajući jednofazne izmjenjivače, mosni spoj je najčešće upotrebljavani spoj. U svakom trenutku struju trošila vode dva poluvodička ventila. U polumosnom spoju struju trošila u svakom trenutku vodi samo jedan ventil. Na slikama 4.4. i 4.5. moguće je vidjeti sheme spojeva izmjenjivača u mosnom i polumosnom spoju.

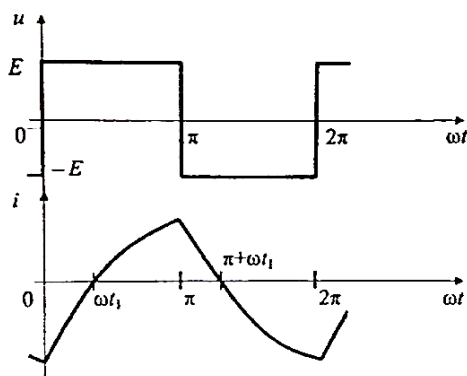


Slika 4.4. Jednofazni izmjenjivač u mosnom spoju [3]



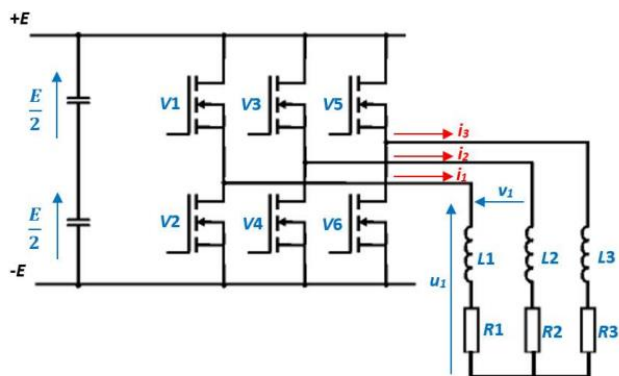
Slika 4.5. Izmjenjivač u polumosnom spoju [3]

Valni oblici napona i struje na trošilu su rezultat periodičke promjene vođenja parova ventila. Valne oblike struje i napona na trošilu moguće je vidjeti na slici 4.6.

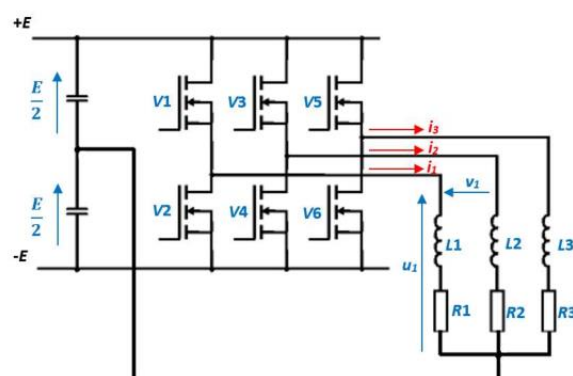


Slika 4.6. Valni oblici struje i napona trošila[3]

Na slikama 4.7. i 4.8. moguće je vidjeti sheme trofaznog izmjenjivača u mosnom i polumosnom spoju.

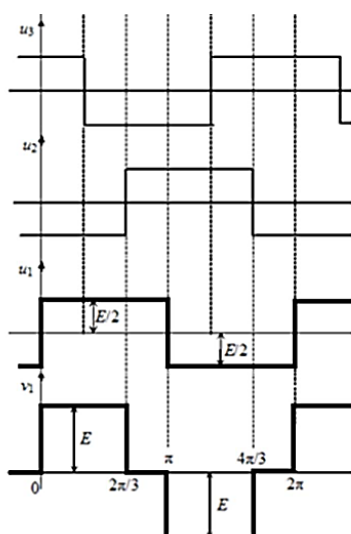


Slika 4.7. Trofazni izmjenjivač u mosnom spoju [4]

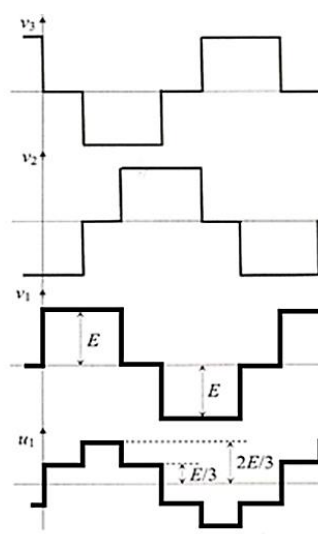


Slika 4.8. Trofazni izmjenjivač u polumosnom spoju [4]

Na slikama 4.8. moguće je vidjeti karakteristične valne oblike napona trošila izmjenjivača u mosnom i polumosnom spoju.

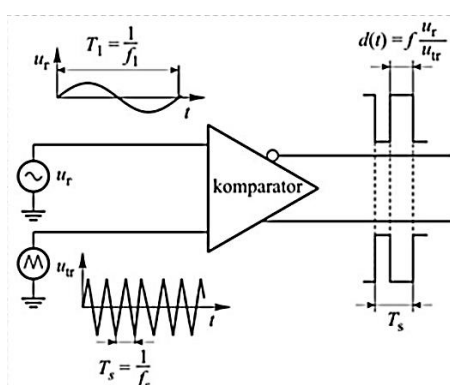


Slika 4.9. Valni oblici napona trošila izmjenjivača u mosnom spoju[4]



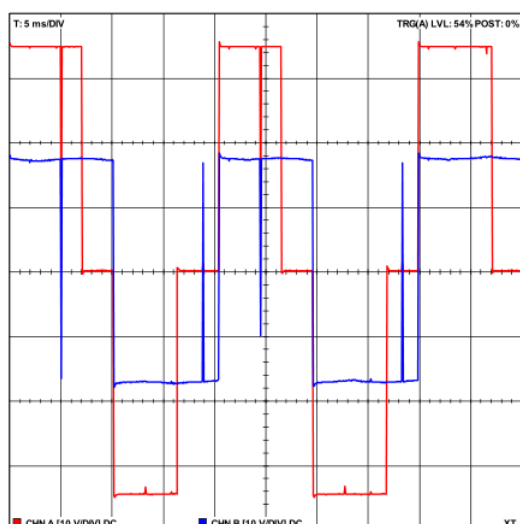
Slika 4.10. Valni oblici napona trošila izmjenjivača u polumosnom spoju [4]

Kao što moguće je vidjeti na slikama 4.6., 4.9. i 4.10. valni oblici struje i napona na trošilu nisu sinusni. Ovakvi nesinusni oblici sadrže više harmonike koji povećavaju temperaturu opreme što smanjuje životnu dob trošila. Zbog ovog se razloga primjenjuju razne tehnike kojima se pokušavaju filtrirati viši harmonici. Najčešće korištena metoda je sinusna pulsno širinska modulacija. Upravljački dio sinusne pulsno širinske modulacije sastoji se od oscilatora kojim se generira referentni sinusni napon, oscilatora kojim se generira ispravljeni trokutasti napon te dva komparatora. Uspoređivanjem napona sinusnog i trokutastog signala formiraju se upravljački signali za pojedine upravljive ventile izmjenjivača. Na slici 4.11. moguće je vidjeti osnovnu shemu upravljačkog dijela izmjenjivača.

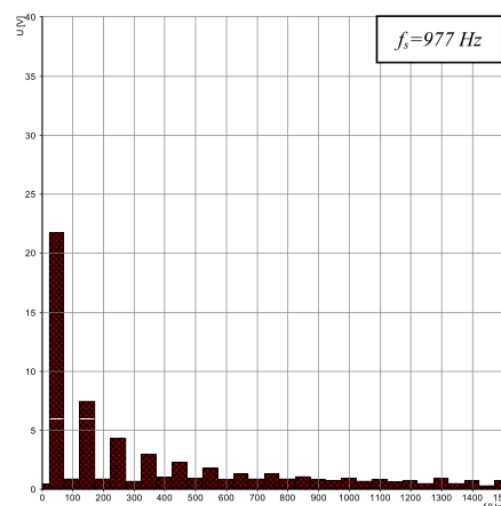


Slika 4.11. Shema upravljačkog dijela izmjenjivača [4]

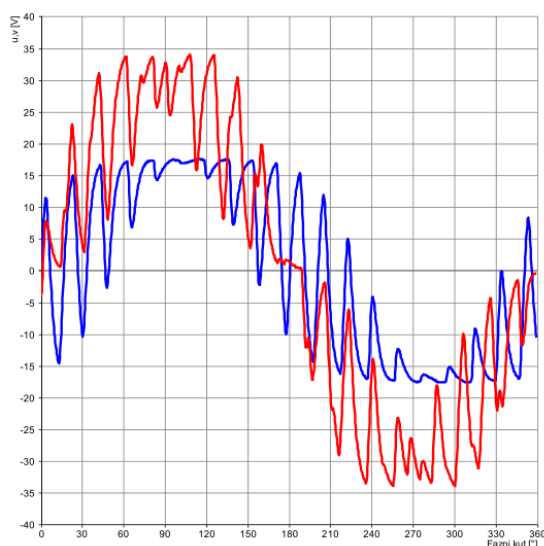
Izlazni napon izmjenjivača i dalje nije čistog sinusnog oblika, ali je više harmonika moguće umanjiti upotrebom reaktivnih i niskopropusnih filtera. Slike 4.12. i 4.14. prikazuju fazne i linijske napone trofaznog izmjenjivača dobivene pomoću pravokutne i sinusne pulsno širinske modulacije. Na slikama 4.13. i 4.15. moguće je vidjeti amplitude pojedinih viših harmonika za ranije navedene načine modulacije. Moguće je vidjeti da se pomoću sinusne pulsno širinske modulacije dobiva valni oblik koji je sličniji sinusnom. To moguće je vidjeti i iz spektralne analize koja pokazuje kako je amplituda harmonika nižih frekvencija manja u sinusnoj pulsno širinskoj modulaciji nego u pravokutnoj modulaciji. Harmonike viših frekvencija koji kvare sinusni valni oblik moguće je profiltrirati, kako je ranije rečeno, primjenom niskopropusnih i reaktivnih filtera. Slike 4.12., 4.13., 4.14. i 4.15. dobivene su kao rezultati laboratorijskih vježbi 'Pravokutna modulacija trofaznih izmjenjivača' i 'Bipolarna sinusna pulsno širinska modulacija trofaznog izmjenjivača u polumosnom spoju' iz kolegija 'Primjena energetske elektronike u elektroenergetici i elektromobilnost'.



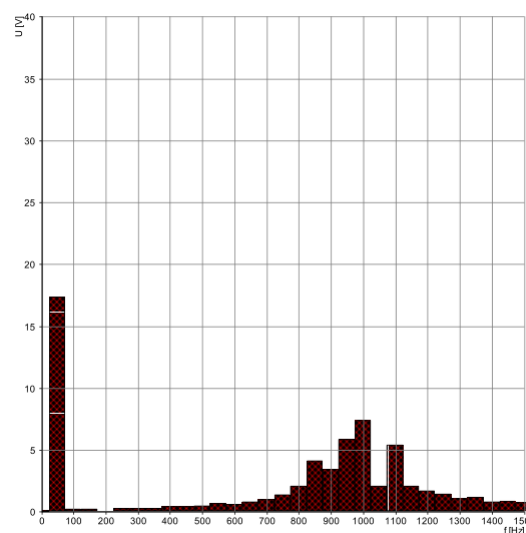
Slika 4.12. Izlazni fazni i linijski napon trofaznog izmjenjivača u polumosnom spoju [4]



Slika 4.13. Spektralna analiza trofaznog izmjenjivača u polumosnom spoju [4]

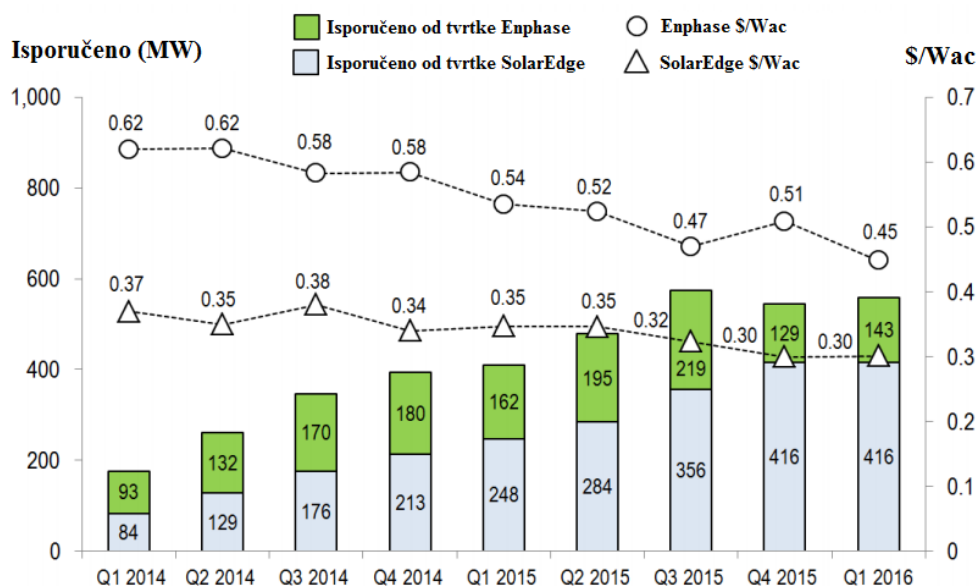


Slika 4.14. Valni oblici faznog i linijskog napona sinusne pulsno širinske modulacije [4]



Slika 4.15. Spektralna analiza faznog napona sinusnepulsno širinske modulacije [4]

Na slici 4.16. moguće je vidjeti kretanje cijene mrežnih invertera s tragačem maksimalne snage na američkom tržištu. Kao i u industriji baterija, razvojem tehnologije se omogućava veća efikasnost rada uređaja, ali se samim time i smanjuje cijena te se omogućuje komercijalna upotreba mrežnih invertera.



Slika 4.16. Cijena komercijalnih invertora tijekom godina [28]

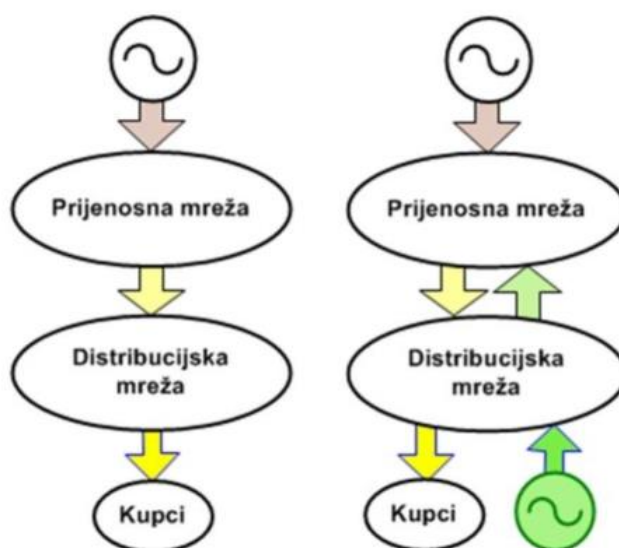
Tablica 4 prikazuje cijenu pojedine vrste invertora i područje u kojem se upotrebljava pojedini inverter. Navedene cijene odnose se na 2016. godinu.

Tablica 4. Ovisnost cijene invertora o vrsti invertora i području njegove upotrebe [28]

Vrsta izmjenjivača	Područje upotrebe	Cijena (\$)/Wac	Cijena (\$)/Wdc
Jednofazni izmjenjivač	Ispitni FN sustav (bez MPPT)	0,176	0,15
Mikroinverter	Ispitni FN sustav (s MPPT)	0,45	0,39
Trofazni izmjenjivač	Komercijalni FN sustav (bez MPPT)	0,15	0,13
Centralni izmjenjivač	Velike FN elektrane	0,12	0,1

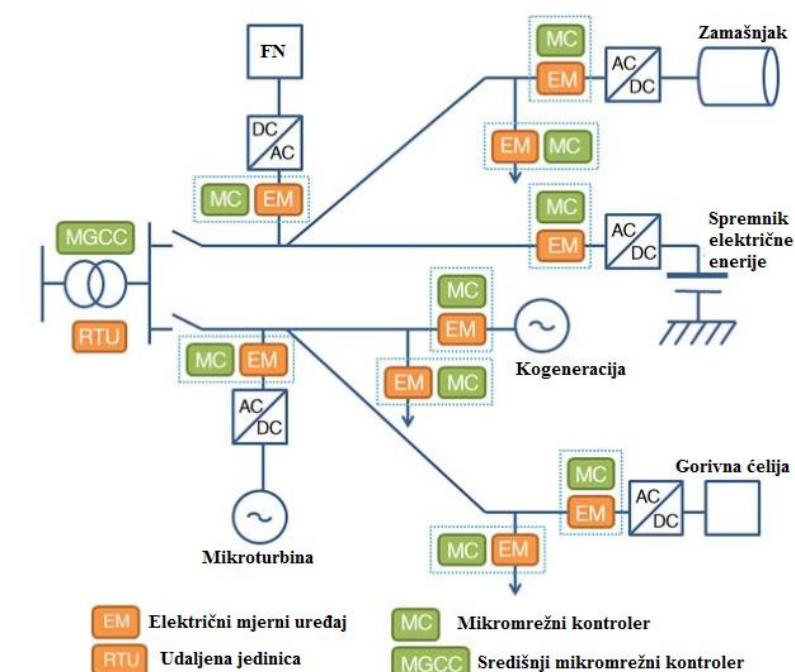
5. MIKROMREŽA

Mikromreža je funkcijska jedinica koju čine potrošači, distribuirani izvori električne energije te spremnici energije. Mikromreža može raditi spojena na postojeću mrežu, a može raditi i u otočnom sustavu, odnosno samostalno, što prema postojećim pravilima elektroenergetskog sustava nije dozvoljeno. Mikromrežu se ne definira po njenoj veličini već po njenoj funkciji. Električna energija proizvedena u distribuiranim izvorima mora u svakom trenutku svojom kvalitetom odgovarati pravilima donesenim zakonima i odredbama od strane elektroenergetskog sustava. Izgradnja distribuiranih izvora električne energije javlja se u onom trenutku kada se shvatilo da je efikasnije stvoriti izvor električne energije na onoj lokaciji gdje je povećana potrošnja, nego da se taj isti izvor lokalizira na mjesto udaljeno kilometrima od potrošnje. Kao distribuirani izvori električne energije najčešće se koriste obnovljivi izvori energije koji su i ranije nabrojani, a to mogu biti gorivne ćelije, fotonaponski sustavi, vjetroelektrane, male hidroelektrane, termoelektrane na biomasu i dr. Dodavanjem proizvodnje na distribucijsku razinu mreža od pasivne postaje aktivna. Na slici 5.1. moguće je vidjeti primjer dodavanja izvora električne energije na distribucijsku mrežu. Dodavanjem distribuirane proizvodnje mijenjaju se tokovi snage u mreži, odnosno snaga više ne teče u jednom smjeru, već ako je proizvodnja veća od lokalne potrošnje, snaga odlazi u ostatak mreže.



Slika 5.1. Dodavanje distribuiranih izvora električne energije u sustav[2]

kontroliranja unutar mikromreže su predviđanje potrošnje, predviđanje proizvodnje obnovljivih izvora električne energije, sekundarnu regulaciju napona i frekvencije te reaktivne i aktivne snage. Funkcije lokalnog kontroliranja i zaštite su primarna regulacija aktivne i reaktivne snage te raspolaganje kapacitetom spremnika energije. Način upravljanja mikromrežom ovisi o njevoj strukturi, a budući da ne postoji samo jedna konfiguracija mikromreže ne postoji niti samo jedan točno određen način upravljanja mikromrežom. Mikromreža mora imati mogućnost otvorenosti prema novim izvorima odnosno mora omogućiti instaliranje i integriranje novih izvora električne energije. Lokalna kontrola je omogućena pomoću mikromrežnih kontrolera. Na slici 5.3. moguće je vidjeti jednu mogućnost upravljanja mikromrežom.



Slika 5.3. Upravljačka struktura mikromreže[5]

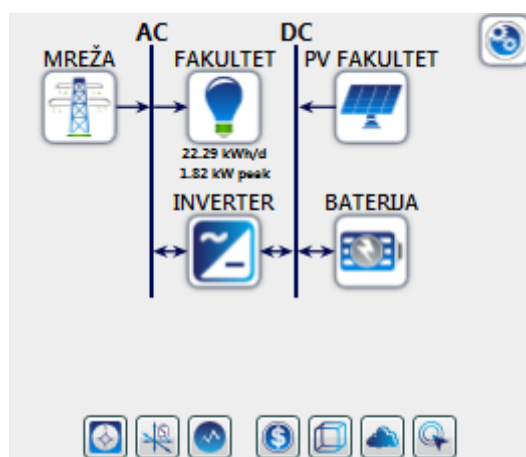
Mikromrežni kontroler je uređaj koji omogućuje upravljanje i nadzor nad distribuiranim izvorima električne energije i spremnicima energije. Središnji mikromrežni kontroler je glavno sučelje koje omogućuje povezanost između ostatka mreže ili operatora distribucijskog sustava i mikromreže.

6. SIMULACIJA U PROGRAMSKOM PAKETU HOMER

Programski paket Homer razvijen je od strane NREL-a (National Renewable Energy Laboratory). Program omogućuje izračunavanje isplativosti projekata koji uključuju distribuirane izvore, hibridne sustave i slično. Unutar programskog paketa je omogućen unos ulaznih podataka koji omogućavaju stvaranje matematičkog modela koji pomaže pri tehnološkoj i ekonomskoj analizi projekta.

6.1. OSNOVNI SUSTAV

Cilj zadatka bio je provesti tehnološku i ekonomsku analizu i dodati izvore električne energije kako bi sustav što veći dio godine imao samostalnost. Na slici 6.1. moguće je vidjeti osnovne komponente sustava.



Slika 6.1. Shema osnovnog sustava

Sustav se sastoji od fotonaponske elektrane, baterija, invertera, potrošnje, mrežnog izmjenjivača i mreže. Za svaki od dijelova sustava moguće je unijeti željene podatke. Fotonaponska elektrana je snage 20 kW. Na slici 6.2. moguće je vidjeti kako se unose podaci za fotonaponski sustav. Cijena BISOL BMU 250 modula snage 250 W IZ 2014. godine na tržištu iznosila je 391,81 \$ [21], a njegove karakteristike (temperaturni koeficijent, nominalna temperatura te efikasnost) se mogu vidjeti na slici.

PV  Name: Abbreviation:

Properties

Name: Generic flat plate PV
 Abbreviation: PV FAKULTET
 Panel Type: Flat plate
 Rated Capacity (kW): 20
 Temperature Coefficient: -0.39
 Operating Temperature (°C): 44
 Efficiency (%): 18.4
 Manufacturer: Generic
 Weight (lbs): 160
 Footprint (in2): 9000
 Website: www.homerenergy.com
 Notes:
 This is a generic PV system.

Costs

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
0.25	\$391.81	\$391.81	\$4.00

Click here to add new item

Multiplier:

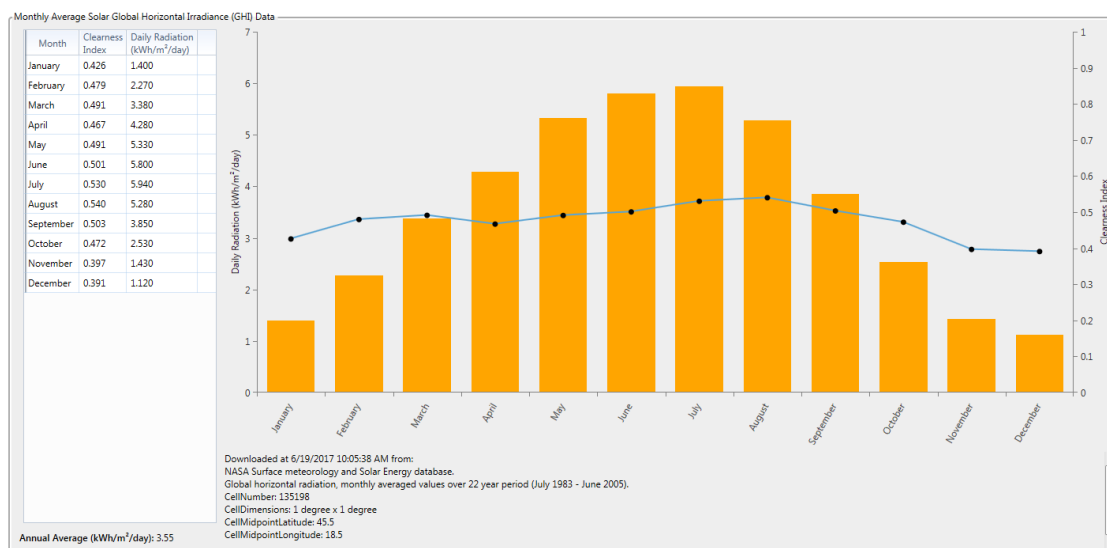
Site Specific Input

Lifetime (years):

Derating Factor (%):

Slika 6.2. Unos podataka za FN sustav

Osim podataka samog fotonaponskog modula, Homer omogućava i unos atmosferskih prilika koje se ažuriraju od strane NASA-e svakog dana. Na slici 6.3. moguće je vidjeti Sunčevo zračenje tijekom godine za lokaciju fotonaponskog sustava.



Slika 6.3. Atmosferske prilike za područje Osijeka

Kao spremnik energije se koristila Li-ion baterija čiji je princip rada objašnjen ranije. Energija baterije s kojim se ulazilo u proračun je 1 kWh, a cijena takve baterije na tržištu 2014. godine iznosila je 225 \$ [22]. Sučelje za unos podataka moguće je vidjeti na slici 6.4.

STORAGE  Name: Abbreviation: Remove Copy To Library

Properties
Idealized Battery Model
 Nominal Voltage (V): 6
 Nominal Capacity (kWh): 1
 Nominal Capacity (Ah): 166.667
 Roundtrip efficiency (%): 90.00
 Maximum Charge Current (A): 166.667
 Maximum Discharge Current (A): 500
 Weight (lbs): 15



Batteries

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	\$225.00	\$225.00	\$5.00

Lifetime

time (years): More...

throughput (kWh):

Search Space 

#

Site Specific Input

String Size: Voltage: 6 V

Initial State of Charge (%): More...

Minimum State of Charge (%): More...

Slika 6.4. Unos podataka za bateriju

Snaga mrežnog invertera koji se uzimao u proračunu je 20 kW, a cijena takvog invertera 2014. godine na tržištu je iznosila 985 \$ [23]. Na slici 6.5. moguće je vidjeti unos podataka za mrežni inverter.

CONVERTER  Name: Abbreviation: Remove Copy To Library

Properties
 Name: System Converter
 Abbreviation: INVERTER
 Notes:
 This is a generic system converter.

Costs

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	\$985.00	\$985.00	\$0.0

Click here to add new item

Search Space 

Size (kW)

Generic
homerenergy.com
 Andy Kruse
sales@homerenergy.com
 + (1) 720-565-4046
 HOMER Energy
 1790 30th St Suite 100
 Boulder, CO 80301 USA



Inverter Input

Lifetime (years): More...

Efficiency (%): More...

☒ Parallel with AC generator?

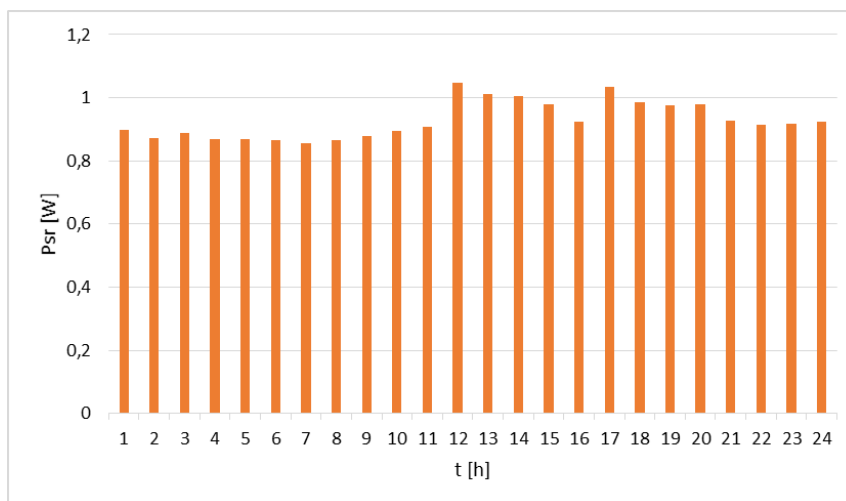
Rectifier Input

Relative Capacity (%): More...

Efficiency (%): More...

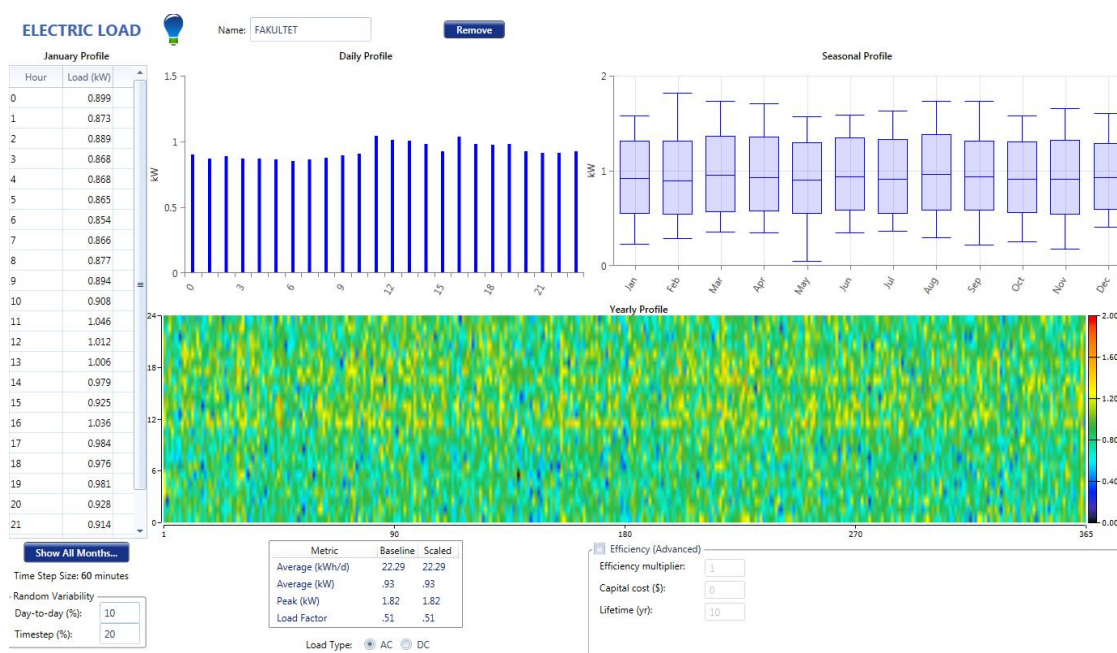
Slika 6.5. Unos podataka za mrežni inverter

Kao osnova za opterećenje se uzelo opterećenje zgrade fakulteta, ali se zbog potreba simulacije taj iznos umanjio 20 puta zbog toga što jedino u tom slučaju se dobivaju rezultati koji omogućavaju funkcioniranje sustava tijekom godine u slučaju eventualnog otočnog režima rada. Kada bi se potrošnja ostavila takvom kakva je, sustav ne bi mogao raditi kada bi došlo do otočnog režima rada zbog velike razlike između tražene potrošnje i proizvedene električne energije. Na slici 6.6. moguće je vidjeti potrošnju tijekom dana 8.6.2016.



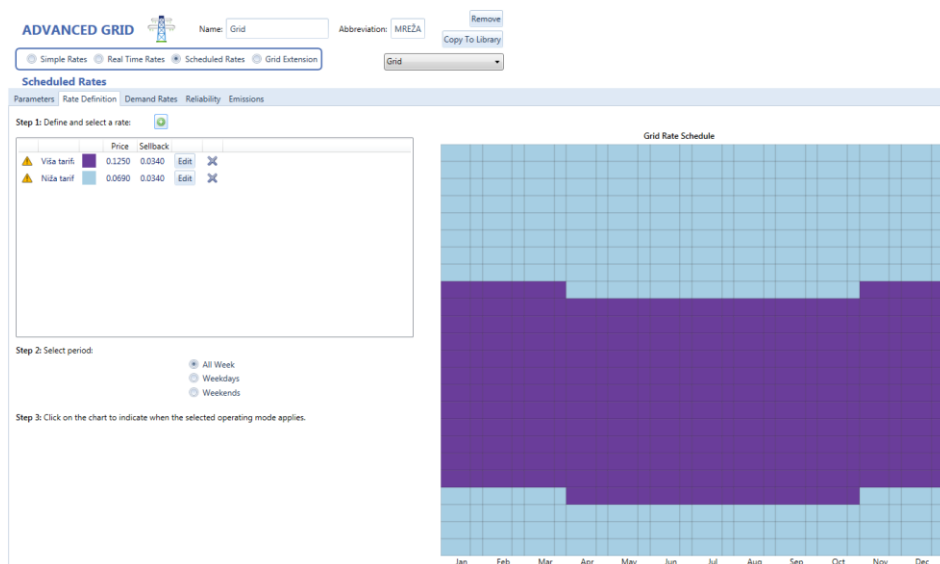
Slika 6.6. Potrošnja

Unos podataka za potrošnju u programski paket mogu se vidjeti na slici 6.7.



Slika 6.7. Unos podataka za potrošnju

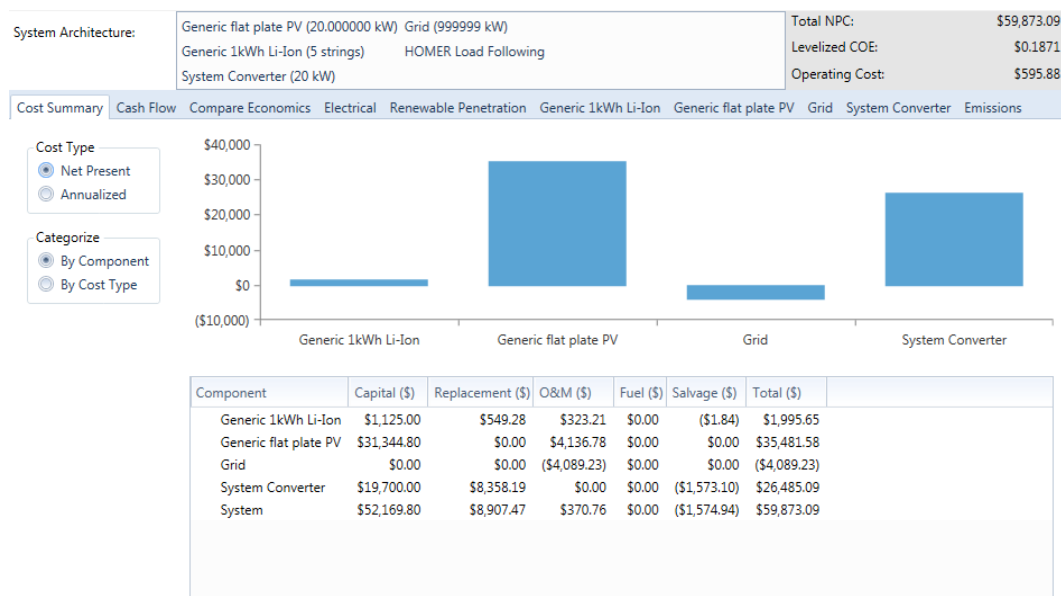
Programski paket Homer omogućuje unos tarifnih modela za mrežu što omogućava unos dvotarifnog modela koji se koristi u Republici Hrvatskoj. Na slici 6.8. može se vidjeti takav tarifni sustav koji se unosi u program.



Slika 6.8. *Unos podataka za dvotarifni model mreže*

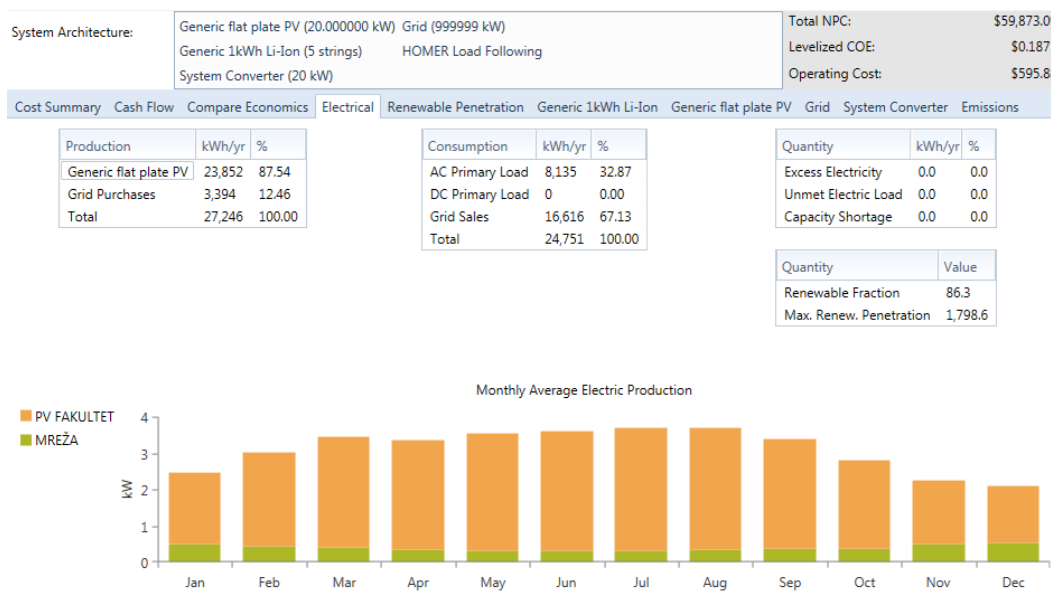
Nakon unosa podataka moguće je započeti simulaciju. Sustav izračunava cijenu projekta, uloženi kapital te cijenu održavanja sustava. Temeljni kapital ovakvog sustava je 52.169,80 \$. Operativni troškovi iznose 595,88 \$, a ukupna neto sadašnja vrijednost projekta iznosi 59.873,09 \$.

Na slici 6.9. moguće je vidjeti ukupni troškovnik ove simulacije.



Slika 6.9. *Ukupni troškovnik*

Kao što je ranije navedeno, potrošnja je smanjena 20 puta te je iz tog razloga potreba za električnom energijom iz mreže manja nego što bi bila da je potrošnja ostavljena nepromijenjena. Slika 6.10. prikazuje proizvodnju električne energije tijekom godine.



Slika 6.10. Proizvodnja električne energije tijekom godine

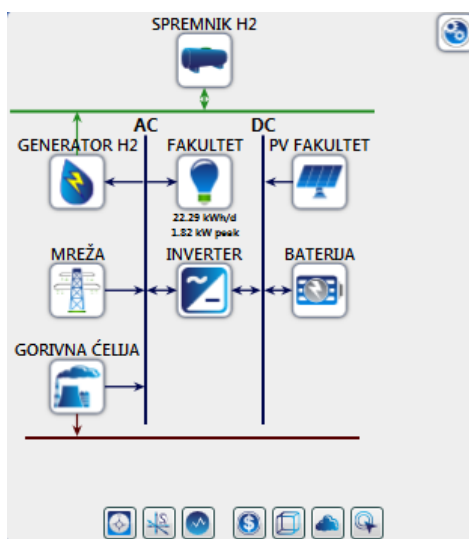
Kao što moguće je vidjeti, zbog smanjene potrošnje, potreba za električnom energijom iz mreže je samo 12,46 % vremena tijekom godine. Na slici 6.11. moguće je vidjeti stanje napunjenosti baterije tijekom godine. S ovakvim parametrima sustava, vrijeme samostalnosti sustava tijekom jedne godine iznosi 4,31 sati.



Slika 6.11. Napunjenost baterije tijekom godine

6.2. DODAVANJE GORIVNE ČELIJE

Kao što je ranije rečeno, svrha ove simulacije je pokušaj povećanja samostalnosti mikromreže tijekom godine, kako bi ona mogla raditi u eventualnom otočnom režimu rada. Gorivna ćelija nametnula se kao izvor koji je jedan od najkorištenijih i najzastupljenijih kako u Europi tako i u svijetu. Sustav se osim gorivne ćelije u kojoj se stvara električna energija i toplina sastoji od generatora vodika i spremnika vodika. Na slici 6.12. moguće je vidjeti modificirani sustav s dodanom gorivnom ćelijom i potrebnim komponentama za njeno normalno funkcioniranje.



Slika 6.12. Shema sustava nakon dodavanja gorivne ćelije

Budući da je neisplativo da generator vodika radi tijekom više tarife, potrebno je namjestiti da on radi za vrijeme niže tarife, kako bi se manje električne energije trošilo na proizvodnju vodika. Cijena generatora vodika na tržištu 2017. godine za 1 kW iznosi 5.000 \$ [24] te se za potrebe simulacije u proračun uzeo generator od 20 kW. Cijena spremnika vodika od 1000 kg na tržištu je 200 \$ [25]. U simulaciji se uzeo spremnik od 3000 kg. Gorivna ćelija je snage 10 kW, a cijena gorivne ćelije snage 1 kW je 5.000 \$ [26]. Na slikama 6.13., 6.14. i 6.15. moguće je vidjeti unos podataka za generator vodika, spremnik vodika i gorivnu ćeliju.

6. SIMULACIJA U PROGRAMSKOM PAKETU HOMER

ELECTROLYZER

Name: Generic Electrolyzer Abbreviation: GENERU

Properties

Name: Generic Electrolyzer
Abbreviation: GENERATOR H2
Manufacturer: Generic
Website: www.homerenergy.com
Notes: This is a generic electrolyzer.

Costs

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	\$5,000.00	\$5,000.00	\$50.00

Search Space

Size (kW): 20

Electrolyzer Schedule

Slika 6.13.Unos podataka za generator vodika

HYDROGEN TANK

Name: Hydrogen Tank Abbreviation: SPREMI

Properties

Name: Hydrogen Tank
Abbreviation: SPREMNIK H2
Manufacturer: Generic
Website: www.homerenergy.com
Notes: This is a generic hydrogen tank.

Costs

Size (kg)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1000	\$20.00	\$20.00	\$2.00

Search Space

Size (kg): 3000

Slika 6.14.Unos podataka za spremnik vodika

GENERATOR

Name: Generic Fuel Cell Abbreviation: CELJIA

Properties

Name: Generic Fuel Cell
Abbreviation: GORIVNA CELJIA
Manufacturer: Generic
Website: www.homerenergy.com
Notes:

Costs

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/hr)
1	\$3,000.00	\$2,500.00	\$0.010

Search Space

Size (kW): 10

Site Specific Input

Minimum Load Ratio (%): 0.00 Heat Recovery Ratio (%): 60.00 Lifetime (Hours): 50,000.00 Minimum Runtime (Minutes): 0.00

Electrical Bus

AC DC

Fuel Resource

SELECT FUEL: Stored Hydrogen

Check that the fuel curve is appropriate for the new fuel.

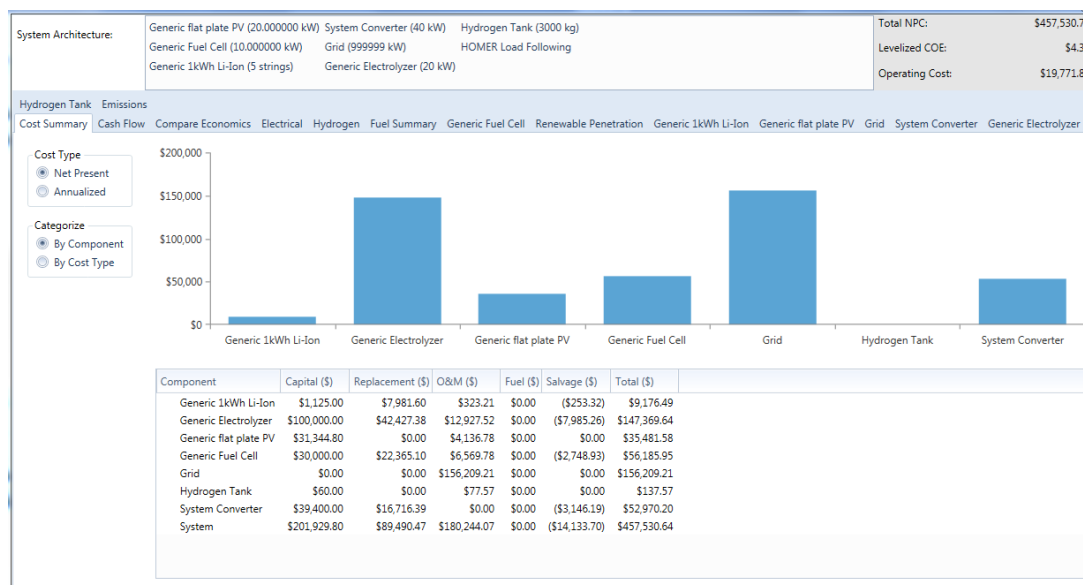
Stored Hydrogen Fuel Price (\$/kg): 1.000 Limit Consumption (kg): 5,000.00

PROPERTIES

Lower Heating Value (MJ/kg): 120
Density (kg/m3): 0.090
Carbon Content (%): 0
Sulfur Content (%): 0

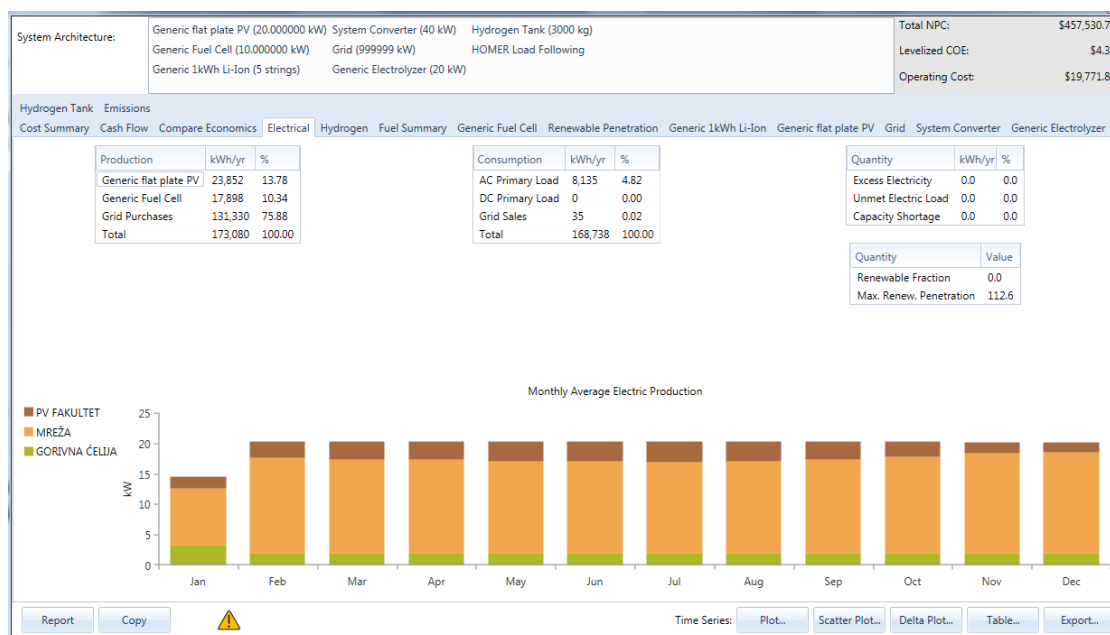
Slika 6.15.Unos podataka za gorivnu ćeliju

Nakon što je dodana gorivna ćelija, generator vodika i spremnik vodika bilo je moguće pristupiti simulaciji. Dodavanjem ranije navedenih komponenata sustava početni se kapital povećao na 201.929,80 \$. Operativni troškovi su se povećali na 19.771,84 \$, a ukupna neto sadašnja vrijednost projekta iznosi 457.530,70 \$.



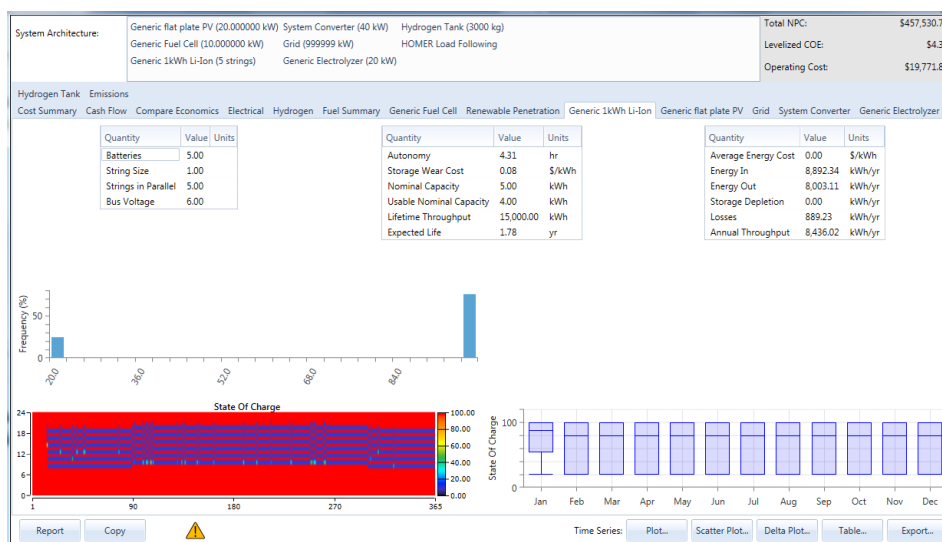
Slika 6.16. Ukupni troškovnik nakon dodavanja gorivne ćelije

Na slici 6.17. moguće je vidjeti proizvodnju električne energije tijekom godine nakon dodavanja gorivne ćelije u postojeći sustav.



Slika 6.17. Proizvodnja električne energije tijekom godine nakon dodavanja gorivne ćelije

Dodavanjem gorivne ćelije se povećala cijena projekta, a na to je osim cijene komponenata utjecala i povećana potreba za električnom energijom koju nije bilo moguće proizvesti iz vlastitog fotonaponskog sustava. Gorivna ćelija za svoj rad zahtijeva električnu energiju, te je za njen rad potrebno manjak električne energije nadomjestiti energijom kupljenom od mreže. Potreba za električnom energijom iz mreže povećala se na 75,88 %. Na slici 6.18. moguće je vidjeti napunjenost baterije tijekom godine. Zbog neravnomjerno raspoređene potrošnje baterije tijekom godine njen vijek trajanja se smanjio na 1,78 godina, dok je samostalnost sustava ostala nepromijenjena.



Slika 6.18. Napunjenost baterije tijekom godine nakon dodavanja gorivne ćelije

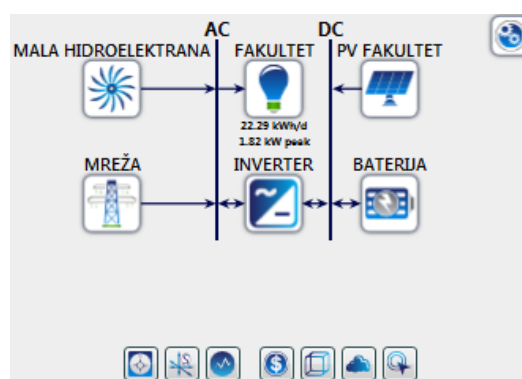
Na slici 6.19. moguće je vidjeti prosječnu mjesečnu potrošnju vodika od strane gorivne ćelije.



Slika 6.19. Srednja mjesečna potrošnja vodika

6.3. DODAVANJE MALE HIDROELEKTRANE

Kao drugo rješenje se, zbog blizine rijeke Drave, nameće mala hidroelektrana koja bi proizvodnjom električne energije omogućila veću samostalnost sustava tijekom godine. Shema sustava u koji je dodana hidroelektrana nalazi se na slici 6.20.



Slika 6.20. Shema sustava nakon dodavanja male hidroelektrane

Za unos hidroelektrane u model potrebno je poznavati tok rijeke Drave. Dijagram protoka rijeke Drave za mjerno područje Belišće moguće je vidjeti na slici 6.21.

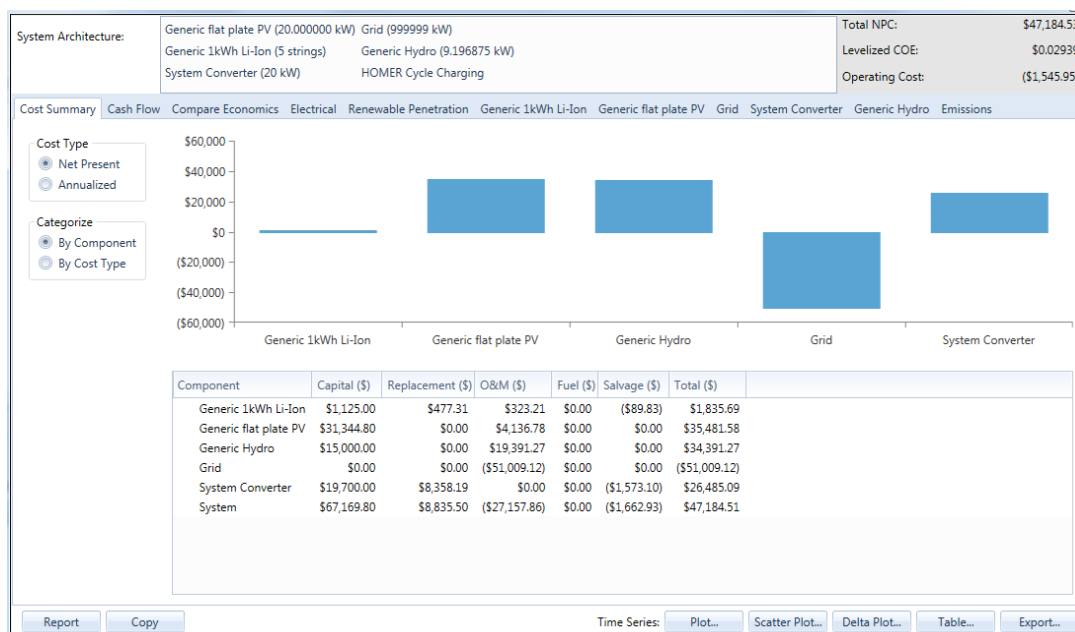


Slika 6.21. Dijagram protoka rijeke Drave[20]

Cijena izgradnje hidroelektrane koja ima snagu 9,2 kW iznosi 15.000 \$, a unos podataka moguće je vidjeti na slici 6.22.

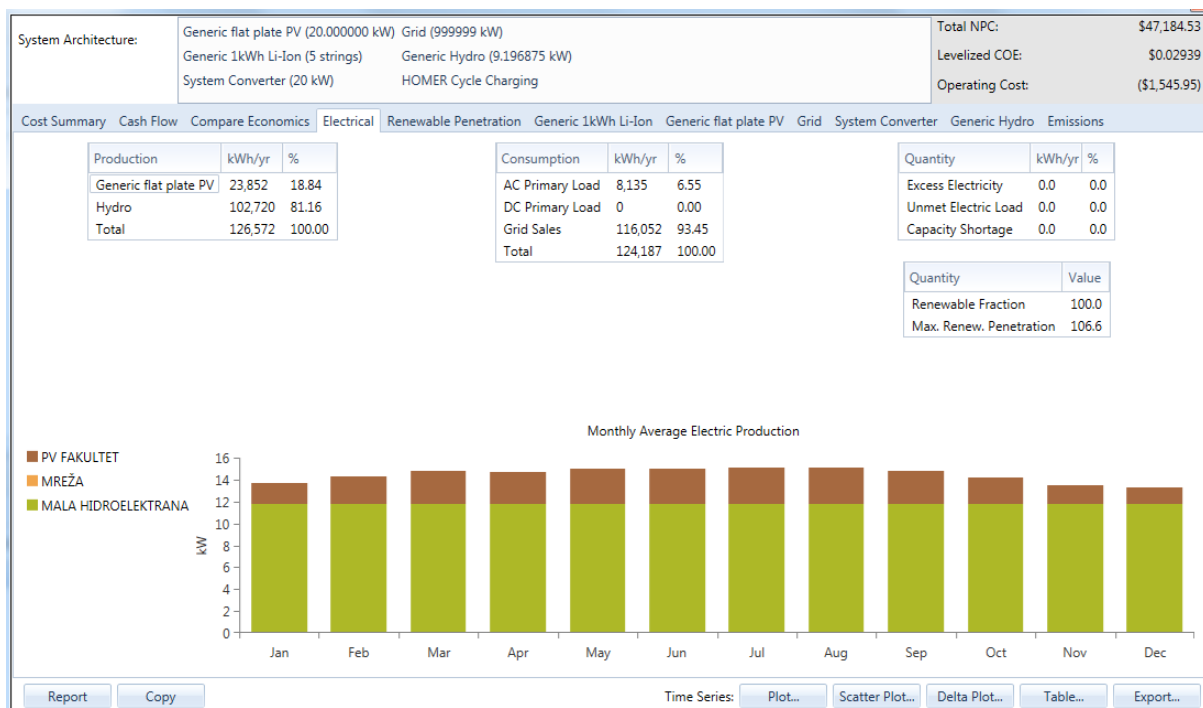
Slika 6.22. Unos podataka za hidroelektranu

Na slici 6.23. moguće je vidjeti ukupni troškovnik nakon dodavanja hidroelektrane. U ovom slučaju početni kapital iznosi 67.169,80 \$, operativni troškovi iznose 1.545,95 \$, a ukupna neto sadašnja vrijednost projekta je 47.184,53 \$. Moguće je vidjeti da postoji i višak električne energije koji se predaje u mrežu.



Slika 6.23. Ukupni troškovnik nakon dodavanja hidroelektrane

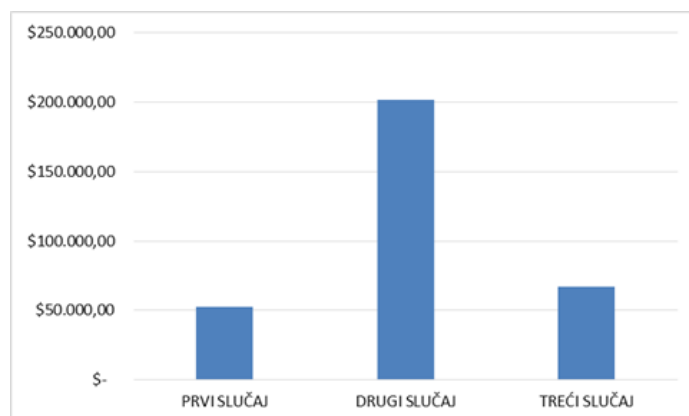
Na slici 6.24. moguće je vidjeti proizvodnu električne energije tijekom godine za ovakav sustav. Na slici je moguće vidjeti da je sva električna energija proizvedena u sustavu i da se električna energija uopće ne uzima iz mreže.



Slika 6.24. Proizvodnja električne energije tijekom godine nakon dodavanja hidroelektrane

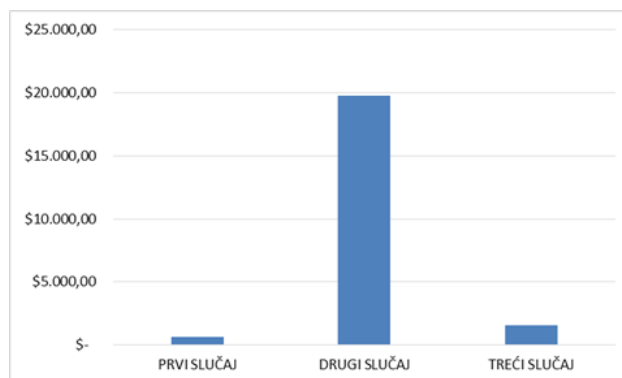
6.4. ANALIZA SLUČAJEVA

Nakon što je izvršena simulacija, moguće je analizirati rezultate i donijeti optimalno rješenje. Na slici 6.25. moguće je vidjeti ovisnost iznosa temeljnog kapitala o analiziranoj situaciji gdje slučaj 1 predstavlja početni slučaj, slučaj 2 dodavanje gorivne ćelije, a slučaj 3 dodavanje male hidroelektrane u sustav. Drugi slučaj ima najviši iznos temeljnog kapitala zbog visoke cijene gorivne ćelije i generatora vodika.



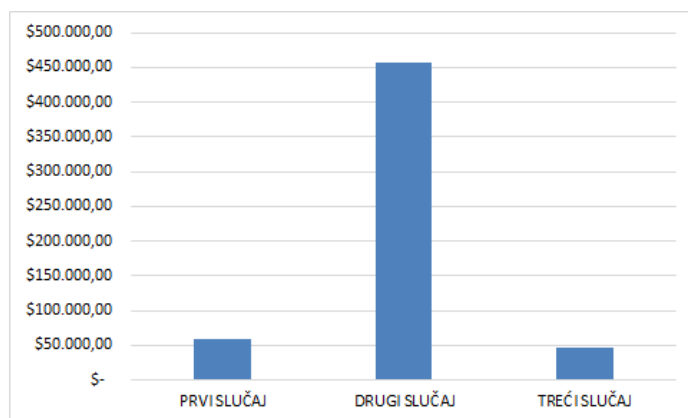
Slika 6.25. Ovisnost iznosa temeljnog kapitala o korištenoj tehnologiji u sustavu

Na slici 6.26. moguće je vidjeti ovisnost operativnih troškova o analiziranom slučaju u simulaciji. Drugi slučaj ima najveće operativne troškove zato što su gorivne ćelije izrazito osjetljive na promjene temperature i ostale vanjske čimbenike te je potrebna česta zamjena elektroda koje su izrazito skupe.



Slika 6.26. *Ovisnost operativnih troškova o korištenoj tehnologiji u sustavu*

Na slici 6.27. moguće je vidjeti ovisnost ukupne neto sadašnje vrijednosti projekta o analiziranom slučaju. Cijena drugog slučaja je osim ranije navedenih razloga visoka i zato što je manjak električne energije koji nastaje zbog rada generatora vodika potrebno nadomjestiti energijom iz mreže.



Slika 6.27. *Ovisnost ukupne neto sadašnje vrijednosti projekta o korištenoj tehnologiji u sustavu*

Uzimajući u obzir ranije prikazane grafove i cijene pojedinih analiziranih slučajeva može se zaključiti da je optimalno rješenje za ovako zadan početni sustav dodavanje male hidroelektrane. U obzir treba uzeti i cijene koje su se uzimale u obzir. Cijena fotonaponskih modula 2014. za kWh električne energije bila je 1.5-2 puta veća nego u vrijeme izrade simulacije te je ona u međuvremenu pala na cijenu izgradnje hidroelektrane po kWh električne energije.

7. ZAKLJUČAK

Obnovljivi su izvori energije čist i jeftin izvor električne energije. Zalihe obnovljivih izvora konstantno se obnavljaju i nemoguće ih je istrošiti. U usporedbi s konvencionalnim izvorima energije, gotovo ne zagađuju okoliš i zbog toga su oni neizbježna budućnost. Problem obnovljivih izvora energije je nemogućnost skladištenja električne energije i varijabilnost izvora električne energije. Vjetar nema konstantnu brzinu tijekom dana i godine te zbog toga vjetroelektrane nisu pogodne za sva područja. Fotonaponski moduli imaju malu efikasnost pretvorbe električne energije, ali se ta efikasnost povećava zbog ubrzanog razvoja tehnologije iz godine u godinu. Drugi problem fotonaponskih elektrana je zasjenjenje jednog ili više modula što može izbaciti iz pogona jedan dio ili čak cijelu fotonaponsku elektranu. Gorivne ćelije su tehnologija koja je efikasan izvor električne i toplinske energije, ali su još uvijek nedostupne široj populaciji zbog visoke cijene generatora vodika i gorivne ćelije. Obnovljivi izvori, gledajući ranije navedeno, još uvijek nisu dostigli svoj puni potencijal, ali razvojem tehnologije će u budućnosti zamijeniti konvencionalne izvore. S obnovljivim izvorima dolazi i problem upravljanja proizvodnje i potrošnje zbog varijabilnosti sunca, vjetra i dr. Mikromreže se nameću kao tehnološko rješenje koje nudi optimizaciju sustava i upravljanje nad proizvodnjom i potrošnjom. Programski paket Homer je samo jedan od programskih alata koji omogućava promatranje različitih sustava i optimiziranje svakog od njih u svrhu smanjenja cijene izgradnje i što bržeg povrata investicije. Povećanjem broja distribuiranih generatora smanjuju se gubici u sustavu zbog smanjenja udaljenosti između proizvodnje i potrošnje, ali se teoretski povećava mogućnost funkcioniranja promatranog dijela mreže uslijed većeg kvara i ispada ostatka mreže. Mikromreže omogućavaju samostalno funkcioniranje u otočnom režimu rada, ali prema važećim mrežnim pravilima Republike Hrvatske otočni režim nije dozvoljen.

LITERATURA

- [1] Marijan Kalea, Obnovljivi izvori energije Energetski pogled, Zagreb, 2014.
- [2] Damir Šljivac, Predavanja iz kolegija Integracija OIE i napredne mreže, Osijek, 2016.
- [3] Ivan Flegar, Elektronički energetski pretvarači, Zagreb, 2010.
- [4] Denis Pelin, Laboratorijske vježbe iz kolegija Primjena energetske elektronike u elektroenergetici i elektromobilnost, Osijek, 2015.
- [5] NikosHatziaargyriou, Microgrids architectures and control, National Technical University of Athens, Greece, 2014.
- [6] Smjena planeta, <http://www.officesuppliesblog.co.uk/2015/08/07/turning-it-up-to-11-the-problems-of-a-noisy-office/> (25.05.2017.)
- [7] Škola jedrenja: Tečaj B - Vrijeme i vremenske prognoze, http://shoppingcentar.com.hr/Nautika/Skola-jedrenja-Tecaj-B-Vrijeme-i-vremenske-prognoze_pr175749ct6855.html (25.05.2017.)
- [8] Energija sunca, <https://www.cro-instal.hr/energija-sunca/> (25.05.2017.)
- [9] Paneli sunčanih ćelija- seminar, <http://documents.tips/documents/paneli-suncanih-celija-seminar.html> (25.05.2017.)
- [10] Energija sunca i fotonaponske ćelije, <http://e-learning.gornjogradska.eu/energijaekologijaengleski-ucenici/2-energija-sunca-i-fotonaponske-celije/> (25.05.2017.)
- [11] Osnove o fotonaponskoj ćeliji i fotonaponskom modulu, <https://www.schrack.hr/alternativni-izvori/photovoltaik/osnove-o-fn-celiji-i-modulu/> (25.05.2017.)
- [12] BISOL Premium series (monocrystalline), <http://www.bisol.com/en/products/pv-modules/bisol-premium-series-mono.html> (03.06.2017.)
- [13] BISOL Premium series (polycrystalline), <http://www.bisol.com/en/products/pv-modules/bisol-premium-series-poly.html> (03.06.2017.)
- [14] Baterija, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Baterija> (03.06.2017.)
- [15] Handbook of batteries, http://www.etf.unssa.rs.ba/~slubura/diplomski_radovi/Zavrzni_rad_MarkoSilj/Literatura/Handbook%20Of%20Batteries%203rd%20Edition.pdf (03.06.2017.)
- [16] Gorivi članak, https://hr.wikipedia.org/wiki/Gorivi_%C4%8Dlanak (03.06.2017.)

- [17] Designing Applications with Li-ion Batteries, <http://www.richtek.com/battery-management/en/designing-liion.html> (05.06.2017.)
- [18] Lithium-ion battery, https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery (05.06.2017.)
- [19] Litij-ionske baterije, <https://www.schrack.hr/alternativni-izvori/photovoltaik/litij-ionske-baterije/> (05.06.2017.)
- [20] Podaci postaje Belišće, Drava, <http://hidro.dhz.hr/> (20.06.2017.)
- [21] BISOL solar panels, <https://www.alma-solarshop.com/218-bisol-solar-panels> (04.07.2017.)
- [22] Wholesale Solar, <https://www.wholesalesolar.com/9910555/trojan-battery-company/batteries/trojan-battery-company-t105-flooded-battery> (04.07.2017.)
- [23] Inverters & Converters, https://www.alibaba.com/product-detail/Industrial-25kw-40kw-15kw-35kw-12kw_60581430996.html (04.07.2017.)
- [24] Large 5LPM PEM Hydrogen Generator LM-5000, https://greenlabcn.en.alibaba.com/product/1822750934-221858605/Large_5LPM_PEM_Hydrogen_Generator_LM_5000.html (04.07.2017.)
- [25] Pressure Vessels, https://www.alibaba.com/product-detail/Customized-carbon-steel-oil-storage-tank_60561899915.html?spm=a2700.7724838.2017115.8.vZoR9y&s=p (04.07.2017.)
- [26] Horizon 1000W PEM Fuel Cell, <http://www.fuelcellstore.com/horizon-1000watt-fuel-cell-h-1000> (04.07.2017.)
- [27] Fraunhofer Institute For Solar Energy Systems ISE, https://energyforum.in/downloads.html?file=tl_files/downloads/Energy%20Storage%20India%202017/20170116_ms_ESI2017_Fraunhofer-ISE.pdf (04.07.2017.)
- [28] U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark, <http://www.nrel.gov/docs/fy16osti/67142.pdf> (04.07.2017.)

SAŽETAK

U ovom radu je objašnjen princip rada osnovnih dijelova mikromreže, pojam mikromreže i kakav ona ima utjecaj na elektroenergetski sustav. Simulacija postojećeg sustava je izvedena u programskom paketu Homer koji omogućava tehnološku i ekonomsku analizu sustava. Cijene korištene prilikom analiziranja su pronađene na raznim web stranicama dobavljača komponenata koje su promatrane. Svrha ove analize je bilo pronalaženje optimalnog rješenja za povećanje samostalnosti sustava kako bi sustav za vrijeme eventualnog kvara mogao raditi odvojeno od mreže. Prema postojećim pravilima elektroenergetskog sustava Republike Hrvatske otočni režim rada nije dozvoljen, ali bi ovako modeliran sustav, sa svjesno smanjenom potrošnjom mogao raditi bez mreže kako je i pokazano u analizi rezultata.

Ključne riječi: fotonaponski sustav, gorivne ćelije, obnovljivi izvori električne energije, mikromreža, optimizacija

ABSTRACT

This paper describes the basic principles of the main parts of a microgrid, the term microgrid and what influence a microgrid has on the power system. The simulation of an existing system is done in the Homer software which enables technological and economical system analysis. The prices used during the analysis are found on different web pages of suppliers whose components were observed. The purpose of this analysis was to find the optimal solution for the increase of independence so the system could work separately from the grid in case of possible failure. According to the existing regulations of the power system of the Republic of Croatia islanded mode is not allowed, but a system formed in this way, with knowingly reduced consumption, could work separately from the grid as it was shown in the results analysis.

Keywords: photovoltaic panels, fuel cells, renewable energy sources, microgrid, optimization

ŽIVOTOPIS

Kristijan Hanžek rođen je u Vinkovcima, Republika Hrvatska, 7. Ožujka 1994. godine kao treće od troje djece. Pohađao je osnovnu školu „Vladimir Nazor“, te osnovnu glazbenu školu „Josip Runjanin“ u Vinkovcima.

Nakon osnovne škole i osnovne glazbene škole upisuje Prirodoslovno-matematičku gimnaziju „Matija Antun Reljković“, te srednju glazbenu školu, smjer gitarist u Vinkovcima.

Godine 2012. upisuje Elektrotehnički fakultet u Osijeku te se kasnije opredjeljuje za smjer elektroenergetika.

Godine 2015. završava preddiplomski studij elektroenergetike te iste godine upisuje diplomski studij elektroenergetike, smjer održiva energetika na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Godine 2017. je dobitnik priznanja za uspjehe tijekom studiranja s prosjekom ocjena 4.86.

