

Hrvatska zaklada za znanost
Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb
Zavod za visoki napon i energetiku

FLEXIBASE

Softverski alati testirani u simulacijskom i laboratorijskom okruženju

prof. dr. sc. Hrvoje Pandžić
prof. dr. sc. Marko Delimar
prof. dr. sc. Željko Tomšić
izv. prof. dr. sc. Danijel Topić,
izv. prof. dr. sc. Juraj Havelka
izv. prof. dr. sc. Tomislav Capuder
doc. dr. sc. Mateo Beus
dr. sc. Damir Novosel
Marija Miletić, mag. ing.
Nikolina Čović, mag. ing.
Petra Miljan, mag. ing.
Ivan Grcić, mag.ing.
Domagoj Badanjak, mag.ing.



Europska unija
Zajedno do fondova EU



05-2023

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Programski jezik Python	2
3	Alat za pružanje fleksibilnosti	3
3.1	Svrha i generalni opis alata	3
3.2	Korištenje alata	4
3.2.1	Ulazni parametri	4
3.2.2	Rezultati	6
4	Alat za optimalan pogon mikromreže	8
4.1	Svrha i generalni opis alata	8
4.2	Korištenje alata	9
4.2.1	Ulazni parametri	9
4.2.2	Rezultati	10
5	Softver za simulaciju kvarova	12
5.1	Kvarovi u mikromreži	12
5.2	Elementi mikromreže	14
5.3	Simulacija i odzivi	15
6	Alat za testiranje baterija	18
6.1	Baterije	18
6.2	Uređaji za testiranje baterija	19
6.3	Alat za testiranje baterija - Cycle killer	20
7	Softver za nadzor i upravljanje	23
7.1	Dijelovi upravljačkog sustava	24

8 Zaključak	27
Literatura	27

1. Uvod

U sklopu FLEXIBASE projekta cilj je razvoj pojedinačnih modela razvoj algoritama za estimaciju i maksimizaciju dostupne fleksibilnosti u mikromreži s visokim udjelom pretvarača korištenjem hijerarhijskog upravljanja koje će se temeljiti na dva upravljačka sloja. Gornji upravljački sloj minimizira dugoročne troškove pogona mikromreže, dok donji upravljački sloj osigurava kratkoročno zadovoljavanje tehničkih ograničenja tj. stabilnosti pogona mikromreže u mrežnom i otočnom radu. Osim samog razvoja te verifikacije valjanosti matematičkih modela, naglasak je stavljen isto tako i na njihovoj integraciji i verifikaciji koristeći računalne simulacije te laboratorijsko testiranje, odnosno razvoj softvera kojim će se navedeni modeli jednostavnije koristiti. Konkretno, četiri različita softverska alata su rezultat istraživanja te razvoja kroz FLEXIBASE projekt. To su:

- Alat za upravljanje mikromrežom
- Alat za koordinirani sustav zaštite
- Alat za pružanje fleksibilnosti
- Alat za optimalan pogon mikromreže

U sklopu ovog izvještaja o ključnim pokazateljima, bit će pružen kratak opis svakog od navedenih softvera te prikaz glavnih funkcionalnosti. Potpunosti radi, dio izvještaja je posvećen i opisu okruženja u kojemu su konkretni softveri razvijeni kako bi se vanjski korisnik mogao što bolje snaći i razumijeti posebnosti svakog od razvijenih softvera.

2. Programski jezik Python

Jedan dio softverskih alata programiran je koristeći programski jezik otvorenog koda Python u sklopu razvojnog okruženja Spyder.

Spyder je programska platforma otvorenog koda koja je napisana u potpunosti u Pythonu te je dizajnirana od znanstvenika za znanstvenike, podatkovne analitičare te inženjere.

Python je veoma moćan programski jezik zasnovan na postulatima objektno-orijentiranog programiranja na visokoj razini apstrakcije. Jednostavna i lako-učeća sintaksa smanjuje, često bolan, proces savladavanja programskog jezika, a veoma aktivna zajednica pruža potporu u vidu mnoštva dostupnih biblioteka, ali i direktne komunikacije na raznim forumima. Jedna od glavnih vrlina programskog jezika Python jest njegova sveobuhvatnost. Naime, Python omogućava dohvat podataka, izradu matematičkih modela, pokretanje istih, prikaz rezultata te izrade popratnih elemenata poput grafičkog korisničkog sučelja. Pritom treba istaknuti kako su i za izradu nekih od softvera u sklopu projekta FLEXIBASE korištene razne dostupne biblioteke koje uvelike ubrzavaju izradu samog softvera, a veoma uključena i stručna zajednica pruža komentare o kvaliteti određenih biblioteka, odnosno potporu u slučaju nekih nejasnoća i/ili problema.

Još je bitno spomenuti kako je za neke od razvijenih softvera bilo potrebno koristiti i solver - alat kojim se mogu rješavati optimizacijski problemi. Tu valja izdvojiti Gurobi - solver za probleme matematičkog programiranja. U srži je to punokrvni komercijalni proizvod, no studentima se nudi licenca bez naknade koja se mora periodički obnavljati, ali je valjana za kompletno vrijeme trajanja studija. Drugim riječima, za uspješno korištenje softvera razvijenog na temelju programskog jezika Python te solvera Gurobi, potencijalna zakočica leži u činjenici da krajnji korisnik mora posjedovati licencu za korištenje Gurobija. U teoriji se mogu onda tražiti i alternativna rješenja kako bi sve bilo zasnovano na principu otvorenog koda, no to izlazi izvan okvira ovog projekta i ne mora nužno biti uopće moguće, ovisno o funkcionalnostima drugih solvera.

3. Alat za pružanje fleksibilnosti

3.1 Svrha i generalni opis alata

Gledano iz perspektive inženjera elektrotehnike, odnosno energetičara, dvadeset i prvo stoljeće je do sad obilježeno globalnim konsenzusom o potrebi prelaska na obnovljive izvore energije. Ta tranzicija se uistinu i događa, negdje sporije, negdje brže. Krasi ju distribuiranost izvora energije, jačanje aktivnosti do sad pasivnih promatrača (npr. potrošača), ali i isprekidanost opskrbe iz obnovljivih izvora energije te potencijalni problemi poput dvosmjernih tokova snaga, zagušenja i devijacija napona na distribucijskoj razini. Pritom i akademska zajednica i industrija uviđaju potrebu za fleksibilnošću kojom će se regulirati i rješavati potencijalni izazovi koje elektroenergetski sustav dvadeset prvog stoljeća nosi. U tome veliku ulogu mogu i moraju imati mikromreže, koje su idealni pružatelj usluga fleksibilnosti za rješavanje problema na distribucijskoj razini.

Alat razvijen kao plod istraživanja u sklopu projekta FLEXIBASE promatra upravo mikromreže i način na koji odrediti kako pružiti, ali ujedno i kako vrednovati, fleksibilnost. Naime, mikromreža, ovisno o elementima koji ju čine, ima mogućnost nastupa na elektroenergetskim tržištima, ali isto tako nuditi i fleksibilnost koja je nekad prijeko potrebna operatoru distribucijskog sustava. U sklopu ovog softverskog alata naglasak je stavljen na programsku pomoć upravitelju mikromreže, ali i operatoru distribucijskog sustava, za određivanje i vrednovanje fleksibilnosti koju promatrana mreža može pružiti u određenim kritičnim trenucima. Odnosno, da bi se kritični trenutci izbjegli.

Alat je kreiran u programskom jeziku otvorenog koda - Pythonu, a za uspješno izvođenje potreban je i komercijalni solver - Gurobi, jer je srž svega optimizacijski problem.

Ulazne parametre možemo razlomiti na one koji opisuju tehničke karakteristike elemenata promatrane mikromreže, poput recimo karakteristika baterijskog spremnika i sl., te općenito ograničenja mreže, kako bismo dočarali stanje u distribucijskom sustavu te prepoznali potrebu za fleksibilnošću. Nadalje, ulazne parametre čine i (prognozirane) cijene na promatranim tržištima (dan-unaprijed, unutarodneвно, tržište uravnoteženja). Na taj način je zadovoljen preduvjet minimuma informacija na temelju kojeg optimizacijski algoritam izračunava optimalnu strategiju za danu situaciju.

3.2 Korištenje alata

U ovom potpoglavlju bit će pružen opis glavnih funkcionalnosti alata uz priložena objašnjenja kako isti koristiti. Stoga dokument, osim što opisuje alat na tehničkoj razini, ujedno može poslužiti i kao priručnik za njegovu upotrebu.

3.2.1 Ulazni parametri

Alat zahtijeva različite tipove ulaznih podataka kako bi optimizacijski problem mogao biti uspješno zadan. U svrhu omogućavanja što bezbolnijeg procesa unosa podataka, softver prihvaća ulazne parametre iz CSV datoteka. Na korisniku je da unese put (često je dovoljno i samo ime) CSV datoteke koja je ispunjena u odgovarajućem formatu te tada softver pripremi podatke kako za prikaz, tako i za korištenje u sklopu optimizacijskog problema. Na slikama 3.1 i 3.2 prikazani su tipični prikazi nekih od parametara kojima korisnik može pristupiti jednom kad su podaci učitani.

```
In [30]: lines
Out[30]:
```

	from_node	to_node	r_ohm	x_ohm	b
0	1	2	1.35309	1.32349	0
1	2	3	1.35309	1.32349	0
2	3	4	1.17024	1.14464	0
3	4	5	0.84111	0.82271	0
4	5	6	1.52348	1.02760	0
5	3	10	2.01317	1.35790	0
6	10	11	1.68671	1.13770	0
7	3	7	2.55727	1.72490	0
8	7	8	1.08820	0.73400	0
9	7	9	1.25143	0.84410	0
10	4	12	1.79553	1.21110	0
11	12	13	2.44845	1.65150	0
12	13	14	2.01317	1.35790	0
13	5	15	2.23081	1.50470	0
14	5	16	1.19702	0.80740	0

Slika 3.1: Karakteristike promatrane mreže

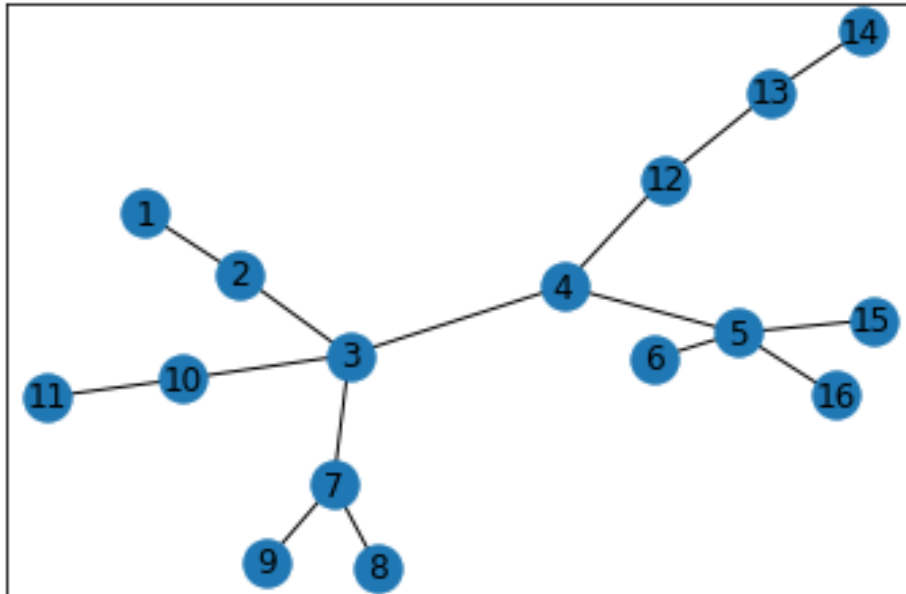

```

In [31]: nodes
Out[31]:
   node  P_d_kw  Q_d_kvar
0      1     0.0    0.0000
1      2    44.1   44.9910
2      3    70.0   71.4143
3      4   140.0  142.8286
4      5    44.1   44.9910
5      6   140.0  142.8860
6      7   140.0  142.8860
7      8    70.0   71.4143
8      9    70.0   71.4143
9     10    44.1   44.9910
10    11   140.0  142.8286
11    12    70.0   71.4143
12    13    44.1   44.9910
13    14    70.0   71.4143
14    15   140.0  142.8286

```

Slika 3.2: Tereti na promatranim čvorištima

Postoji i niz ulaznih parametara koji se unose direktnim tipkanjem, poput recimo broja promatranih jedinica vremena koje onda optimizacijski problem uzima u obzir. Nužno je ispuniti podatke o svim potrebnim ulaznim parametrima, inače se optimizacijski algoritam neće moći izvršiti. U svakom slučaju, ukoliko nešto nedostaje, po pokretanju optimizacije doći će do greške i tada se prikaže kratki opis problema na temelju kojeg korisnik može zaključiti što bi trebao popraviti. Usto, često je puno lakše dočarati neke karakteristike sustava vizualno, stoga softver nudi, primjerice, i opciju vizualizacije strukture promatrane mreže kao što je prikazano na slici 3.3.

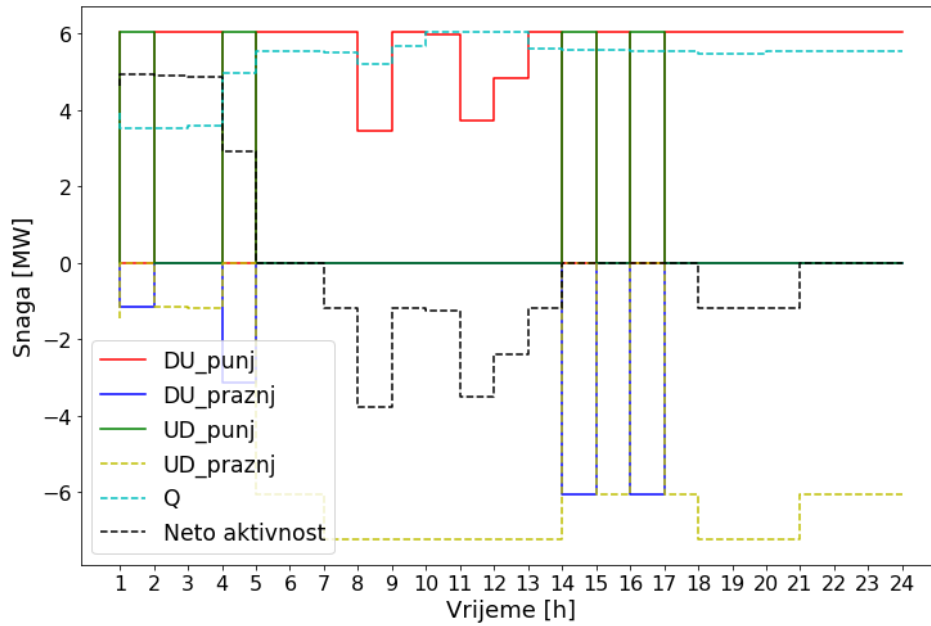


Slika 3.3: Struktura promatrane mreže

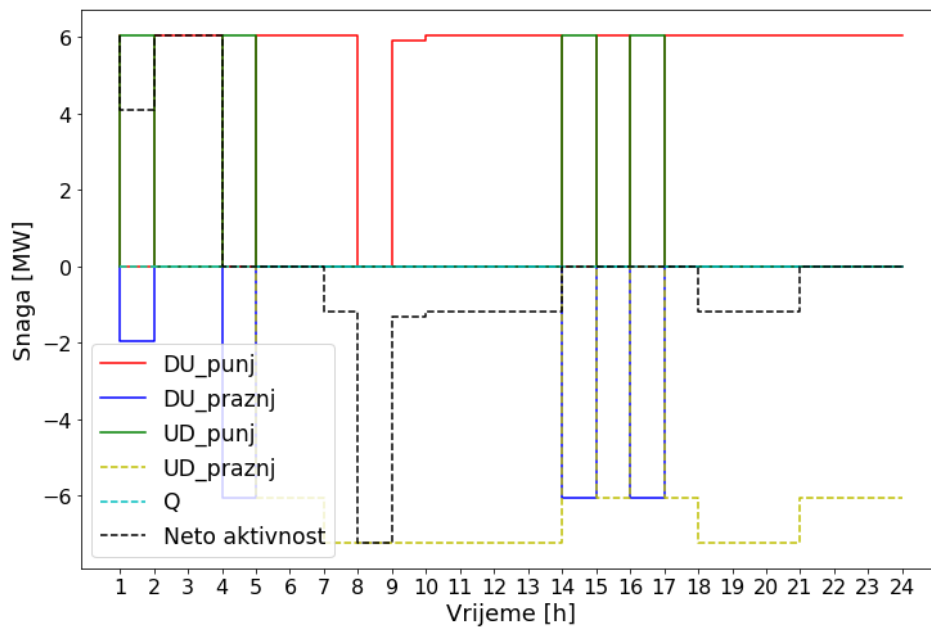
3.2.2 Rezultati

Rezultati optimizacijskog problema su dostupni u dvije varijante. Odmah po uspješnom izvršenju optimizacije, rezultati uz vrijednosti svih varijabli i ostalih bitnih informacija spremaju se u takozvanu log datoteku koja je tekstualna datoteka i pomoću nje korisnik može proučiti sve rezultate ali i koristiti ih vrlo jednostavno u svrhu daljnje analize u svom softveru. Tako u broičano-tekstualnom prikazu kao najbitnije informacije izdvajamo lokaciju i kapacitet potencijalnih spremnika energije koji bi pomogli sustavu te iznosi profita s i bez uzimanja u obzir ograničenja mreže, što kreira i vid kvantifikacije vrijednosti fleksibilnosti. Nadalje, velik je naglasak stavljen i na vizualnu prezentaciju rezultata kako bi se olakšala interpretacija. Toj izjavi u argument je priložena slika 3.4. Slika zorno pokazuje kako uvođenje ograničenja mreže u optimizacijski problem može ostaviti nezanemariv utjecaj na aktivnost baterijskog spremnika i shodno tome je vrednovana sama fleksibilnost.

Aktivnost baterijskog spremnika s ograničenjima



Aktivnost baterijskog spremnika bez ograničenja



Slika 3.4: Aktivnost baterijskog spremnika s i bez ograničenja mreže

4. Alat za optimalan pogon mikromreže

4.1 Svrha i generalni opis alata

Liberalizacijom elektroenergetskog sustava pojavila su se organizirana tržišta električne energije te, posljedično, mogućnost generiranja profita sudjelovanjem na dostupnim tržištima. Samim time, odmah u startu je postalo jasno kako je od iznimne važnosti strateški planirati nastup vlastitih resursa na elektroenergetskim tržištima kako bi se uistinu postigao profit, a ne neka neželjena ekonomska situacija za promatranog tržišnog igrača. Uslijed ubrzane tranzicije prema obnovljivim izvorima energije te distribuiranoj paradigmi, javila se potreba za većom fleksibilnosti na distribucijskoj razini i još kompleksnija tržišna struktura s raznim proizvodima koje igrač može ponuditi bilo na tradicionalnim tržištima ili u sklopu pomoćnih usluga.

U sklopu ovog projekta naglasak je na mikromrežama čiji resursi nastupaju na različitim nišama elektroenergetskog tržišta s ciljem generiranja profita uz uvažavanje svih tehničkih ograničenja zaštite. Ovaj programski alat je primarno fokusiran na planiranje optimalnog nastupa na tržištima obzirom na mogućnosti zarade uslijed razlika u cijenama te općenito karakteristikama različitih niša elektroenergetskog tržišta. Suboptimalna strategija može dovesti do brojnih problema poput zaostajanja za konkurencijom, nemogućnosti novih investicija, tehnički nemoguć rad elemenata mikromreže i mnogih drugih. Dakle, uz veoma bitno pravilno upravljanje zaštitom mikromreže i općenito tehničkim karakteristikama, veliku ulogu u osiguravanju neupitnog rada mikromreže te zadovoljavanje preduvjeta analiza isplativosti, igra optimalan pogon mikromreže.

Alat je kreiran u programskom jeziku otvorenog koda - Pythonu, a za uspješno izvođenje potreban je i komercijalni solver - Gurobi, jer je srž svega optimizacijski problem.

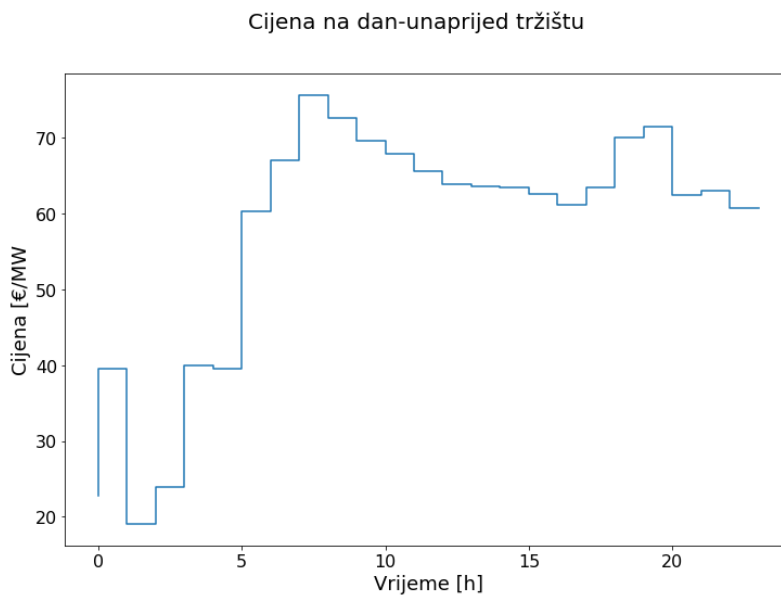
Pritom su neizostavni ulazni parametri oni koji opisuju tehničke karakteristike elemenata promatrane mikromreže. Naime, upravo ispravno modeliranje svih elemenata mikromreže je jedan od osnovnih i najvažnijih preduvjeta za ispravno postavljen optimizacijski problem koji onda može polučiti rezultat koji uistinu ima težinu primjenjivosti u stvarnom pogonu promatrane mikromreže. Nadalje, ulazne parametre čine i (prognozirane) cijene na promatranim tržištima (dan-unaprijed, unutarodnevno, tržište uravnoteženja). Na taj način je zadovoljen preduvjet minimuma informacija na temelju kojeg optimizacijski algoritam izračunava optimalnu strategiju za danu situaciju.

4.2 Korištenje alata

U ovom potpoglavlju bit će pružen opis glavnih funkcionalnosti alata uz priložena objašnjenja kako isti koristiti. Stoga dokument, osim što opisuje alat na tehničkoj razini, ujedno može poslužiti i kao priručnik za njegovu upotrebu.

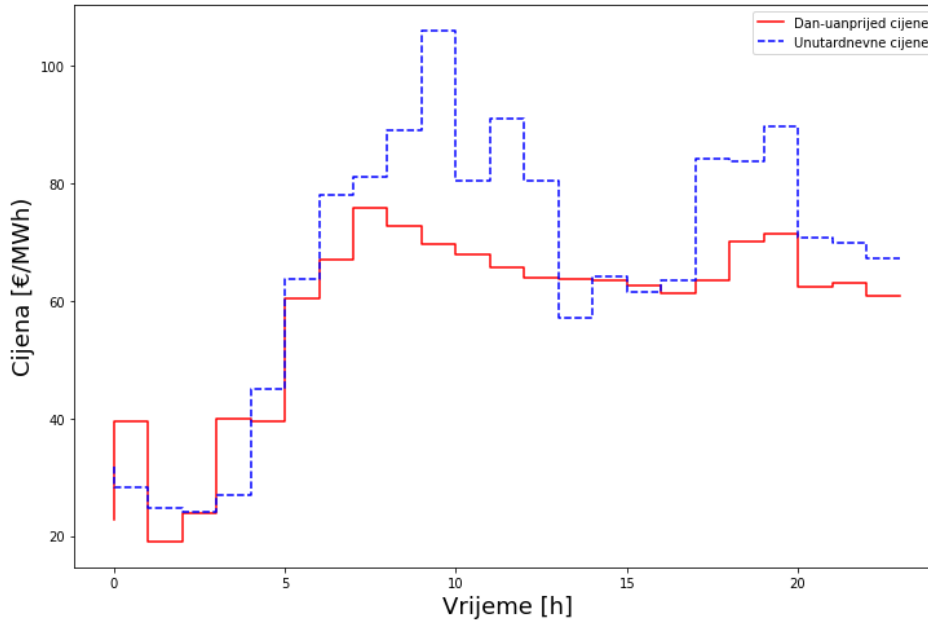
4.2.1 Ulazni parametri

Kako bi se odredio optimalni pogon mikromreže, potrebno je unijeti podatke bitne za rad optimizacijskog algoritma. Tu se prvenstveno misli na karakteristike svih dostupnih elemenata mikromreže te cijene promatranih tržišta električne energije. Uneseni podaci tada se bez daljnjeg korisnikovog truda uređuju u oblik pogodan za daljnji rad s njima, odnosno korištenje optimizacijskog algoritma kako bi bio izračunat optimalan pogon mikromreže. U nastavku je dan primjer prikaza cijena na dan-unaprijed tržištu (grafički, Slika 4.1). Osim za vizualizaciju cijena korisniku, uneseni podaci su u obliku pogodnom za daljnju obradu. Nadalje, kako bi bio jasniji zor o odnosima različitih cijena, postoji i prikaz kretanja cijena različitih tržišta na jednom grafu. Tome svjedoči priložena usporedba kretanja cijena na dan-unaprijed i unutar dnevnog tržištu za jedan od promatranih dana (Slika 4.2). Već na ovom primjeru se jasno može uočiti prilika za arbitražu između dva tržišta te, posljedično, prilika za postizanje profita i vrijednost koju nastup na više tržišta može donijeti.



Slika 4.1: Cijene na dan-unaprijed tržištu

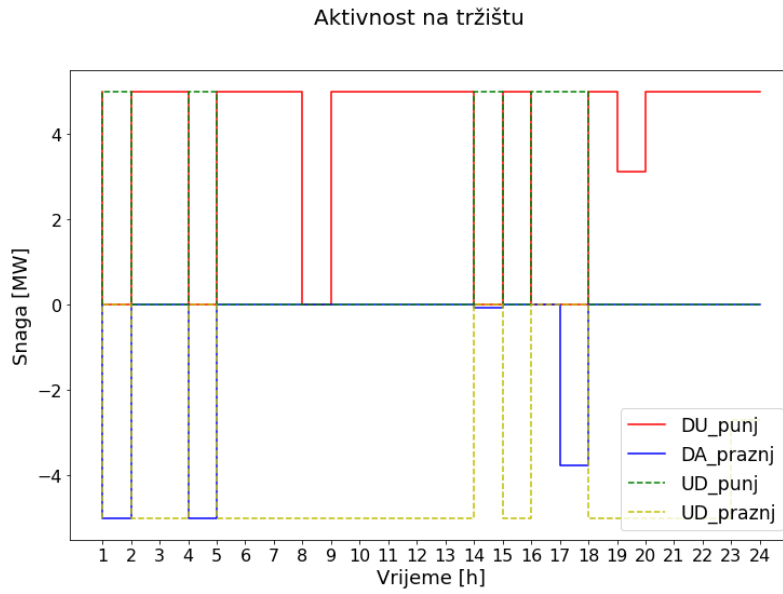
Usporedba kretanja cijena



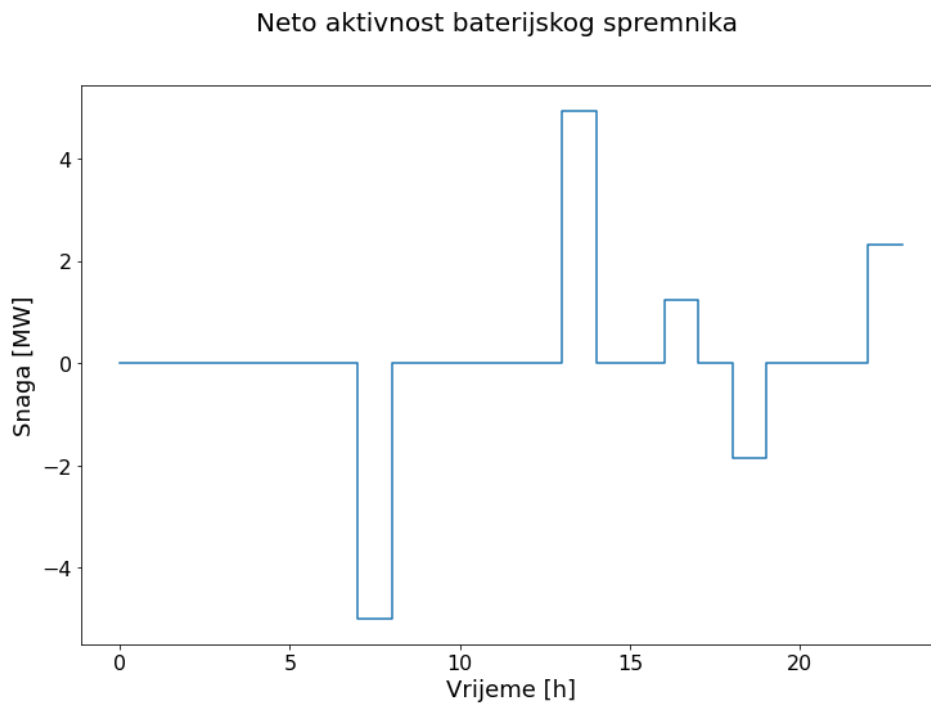
Slika 4.2: Usporedba cijena na dan-unaprijed i unutardnevnom tržištu

4.2.2 Rezultati

Glavna svrha ovog alata, i algoritma koji se vrti u pozadini, je izračun optimalnog pogona mikromreže. Pritom su ulazni parametri pouzdani u manjoj ili većoj mjeri ovisno o kvaliteti predviđanja ukoliko nije neki deterministički parametar. Stoga je, uz numeričko-tekstualne podatke, koje je moguće dohvatiti ili u cjelini putem generirane log datoteke ili zasebno, ujedno važan dio grafički prikaz nastupa na promatranim tržištima uz poštivanje tehničkih ograničenja. Kao važan primjer valja naglasiti nastupe baterijskog spremnika na promatranim tržištima. Slika 4.3 prikazuje aktivnost na različitim tržištima, konkretno su ovdje u fokusu dan-unaprijed i unutardnevno tržište. Vidljivo je kako se elementima mikromreže uspješno može odrađivati arbitraža između različitih tržišta. Štoviše, takav princip u teoriji može pomoći i očuvanju životnog vijeka baterije. Naime, kako je zorno ilustrirano na slici 4.4, sama fizička aktivnost baterijskog spremnika energije (dakle fizikalno punjenje i pražnjenje) je višestruko manje u odnosu na financijsku aktivnost baterije.



Slika 4.3: Aktivnost baterijskog spremnika na dva tržišta



Slika 4.4: Fizikalna aktivnost baterije

5. Softver za simulaciju kvarova

Poznavanje ponašanja mikromreže prilikom pojave kvarova važno je radi pravilnog projektiranja sustava zaštite čija je primarna uloga zaštita ljudskih života te sprječavanje oštećenja opreme. Mikromreže se mogu pronaći u različitim radnim stanjima koja su određena proizvodnjom (najčešće obnovljivih) izvora energije, stanjem sustava za pohranu energije te teretom. Dinamične radne točke, promjenjivi tokovi snaga te intermitencija proizvodnje obnovljivih izvora energije mogu nepovoljno utjecati na rad zaštite. Analiza mogućih stanja u kojim se mikromreža može naći stoga je važan korak pri određivanju postavki zaštitnih uređaja.

Simulacijski alati pomažu pri projektiranju zaštite tako što dopuštaju određivanje iznosa struja i napona prilikom kvarova bez potrebe za izvođenjem kvarova na stvarnom sustavu. U ovom dokumentu je opisan takav simulacijski alat, namijenjen za pomoć pri projektiranju zaštite istosmjerne mikromreže koja ima visok udio pretvarača. Zadana mikromreža u osnovi sadrži obnovljivi izvor energije, pasivno trošilo te baterijski spremnik energije, no može se proširiti proizvoljnim brojem i vrstom izvora i/ili spremnika energije. Alat dopušta simulaciju kratkih spojeva, kratkih spojeva sa zemljom te kvarova visoke impedancije.

5.1 Kvarovi u mikromreži

Spomenuti kvarovi se razlikuju prema utjecaju koji imaju na mikromrežu. Kratki spojevi koji se dogode prilikom spoja negativnog i pozitivnog pola uzrokuju najveće struje kvara koje su višestruko veće od struja u normalnom pogonu mikromreže. Tako visoka struja može nepovratno oštetiti komponente uređaja učinske elektronike poput dioda. Odziv sustava na kratki spoj linije sa zemljom ovisi o izvedbi uzemljenja, međutim visoke struje kvara su i dalje prisutne. Kvarovi visoke impedancije ne uzrokuju visoke struje kvara, no i dalje imaju štetan učinak na sustav ako se ne otklone u određenom vremenskom roku. Modeliranje kratkog spoja u istosmjernom sustavu je relativno jednostavnu pošto je preporučen pristup da se koristi idealna sklopka koja ima mogućnost trenutnog uklapanja. Nakon uklapanja struja se provodi vrlo niskim otporom kako bi se postigao efekt visoke struje kvara te pad napona. Spomenuti otpor se postavlja između dva pola za dobivanje odziva kratkog spoja, dok se u slučaju kratkog spoja sa zemljom spaja između pola i točke uzemljenja. Trajanje i iznos otpora kvara se mogu odrediti unutar alata. Modeliranje kvara visoke impedancije se može izvesti postavljanjem navedenog otpora na određenu vrijednost koja je mnogo viša od one korištene za kratki spoj. Međutim,

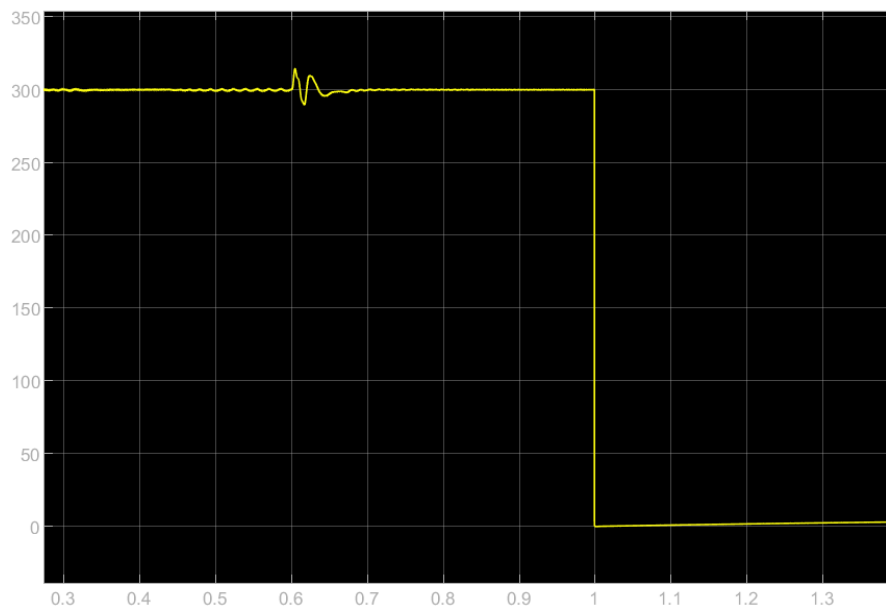
efekt iskrenja nije moguće izvesti, pa se stoga koristi napredniji model kvara predložen u radu [1].

Naime, kvarovi visoke impedancije su po prirodi nestabilnog karaktera – učestala i nasumična pojava električnog luka između voda i dodirne površine se ne može precizno modelirati pa se stoga koriste modeli koji aproksimiraju takvo ponašanje. Model kvara iz spomenutog rada se sastoji od tri dijela: početnog rasta struje, doseganja maksimalnog iznosa struje (rame kvara) te nelinearnog dijela koji opisuje iskrenje. Matematički zapis modela je idući:

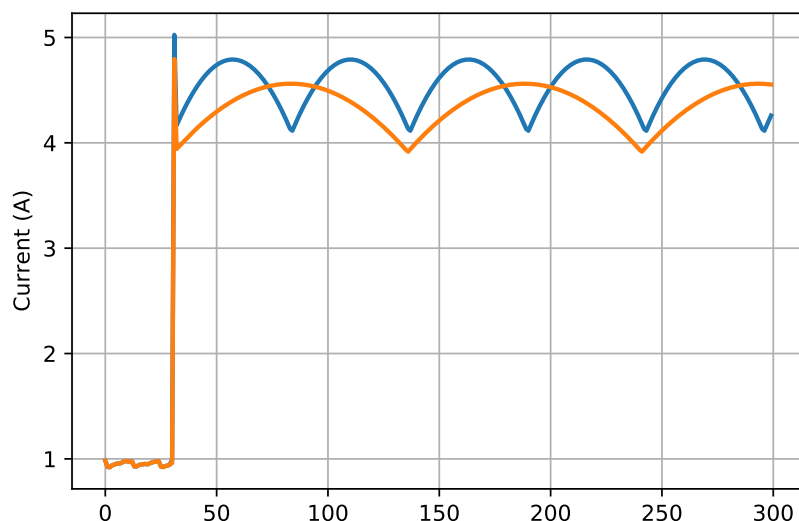
$$i_{j+1} = i_j - \frac{R \cdot i_j + k/i_j^{1.2} + 35 - V_{DC} \sin(\omega t)}{R - 1.2k/i_j^{2.2}} \quad (5.1)$$

$$2n\pi + \pi/3 < \omega t < 2n\pi + 2\pi/3, n \in \mathbb{N}_0 \quad (5.2)$$

gdje je k konstanta električnog luka, i struja kvara, V_{DC} nazivni napon i R ekvivalentni otpor kvara. Navedeni parametri kvara mogu se mijenjati kako bi se prilagodili prilikama u mikromreži. Odzivi za navedene vrste kvarova su prikazani na slikama 5.1 i 5.2.



Slika 5.1: Napon tijekom kratkog spoja dvaju polova. U trenutku $t=1$ dolazi do pojave kvara te napon gotovo trenutno pada s nazivne vrijednosti na nulu. Poremećaj u $t=0.6$ je promjena opterećenja na koju je sustav upravljanja reagirao vrativši napon u referentnu vrijednost.

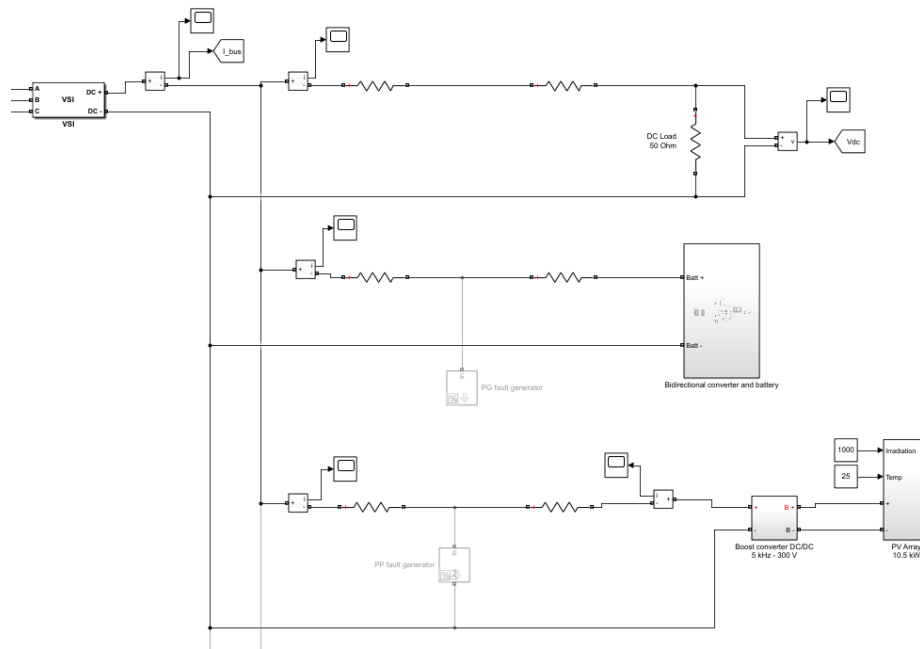


Slika 5.2: Struja kvara visoke impedancije. Struja raste dok ne dosegne maksimalnu vrijednost te nastavlja s nelinearnim ponašanjem koje opisuje iskrenje, odnosno ponavljajuće nastajanje električnog luka [2].

5.2 Elementi mikromreže

Mikromreža se sastoji od više dijelova: tereta, spremnika energije, izvora energije, te spoja s vanjskom mrežom. Teret može biti konstantne impedancije, tako da je struja određena samim otporom ili konstantne snage tako da je umnožak napona i struje konstantan. Izvor energije je spojen u sustav preko pretvarača koji je određen tipom izvora. Izmjenični izvor (npr. vjetro-agregat) će biti spojen preko AC-DC pretvarača dok će istosmjerni izvor (npr. solarni panel) biti spojen preko DC-DC pretvarača. Najčešće korišten spremnik energije je litij-ionska baterija koja je u mrežu spojena preko dvosmjernog istosmjernog pretvarača koji omogućava njeno punjenje te pražnjenje. Neki od alternativnih spremnika energije su superkondenzatori ili zamašnjaci. Vodik dobiven pomoću elektrolizatora također se može pohraniti u spremnik te kasnije pretvoriti u električnu energiju u gorivnoj ćeliji. Navedeni elementi su grupirani u mikromrežu koja je preko AC-DC pretvarača spojena na vanjsku mrežu. Navedeni pretvarač također mora biti u mogućnosti da izmjenjuje energiju u oba smjera.

Upravljanje pojedinog elementa ovisi o izvedbi, međutim uvijek postoji instanca koja održava napon stabilnim unutar određenih granica, odnosno upravlja naponom mikromreže. Ostale instance obično reguliraju struju odnosno snagu koju šalju ili uzimaju iz mreže. Osnovni postav modela mikromreže je prikazan na slici 5.3.

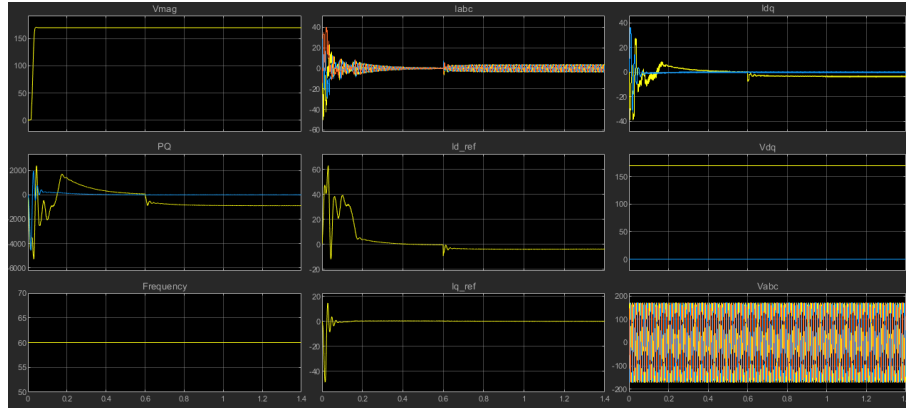


Slika 5.3: Blokvska shema modela mikromreže u programskom alatu. Mikromreža sadrži obnovljivi izvor električne energije (solarni panel), litij-ionsku bateriju, trošilo konstante impedancije te pretvarač kojim je spojena na vanjsku mrežu. U prikazanom slučaju solarni panel je upravljan Maximum Power Point Tracking (MPPT) metodom koja omogućava potpuno iskorištavanje njegovog proizvodnog potencijala. Baterijski spremnik održava napon mikromreže, odnosno regulira razliku proizvodnje i potrošnje. Pretvarač koji spaja mikromrežu na vanjsku mrežu kontrolira iznos snage koja ide u ili iz vanjske mreže.

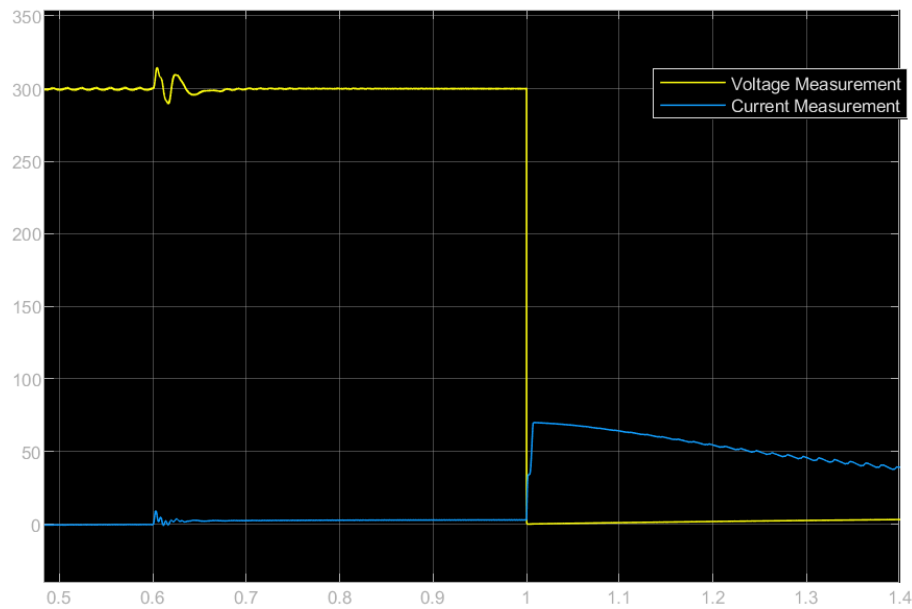
5.3 Simulacija i odzivi

Postavke same simulacije određuju koliko će dobiveni odzivi biti blizu stvarnom svijetu. S obzirom da neke instance zahtijevaju diskretnu simulaciju, powergui blok je postavljen upravo tako. Korak uzorkovanja utječe na preciznost odziva ali i na trajanje izvođenja simulacije. Naime, što je manji korak odabran to će trajanje simulacije biti duže, te obrnuto. Još jedan primjer različitih zabilježenih odziva se nalazi na slici 5.4.

Odabir struja i napona koje želimo vizualizirati se postiže postavljanjem ampermetra ili voltmetra na proizvoljnu lokaciju, te spajanjem mjernog signala na blok Scope. U navedenom bloku se prikazuje valni oblik mjerenog signala, te je moguće dobiti osnovne podatke o signalu. Odzivi se također mogu izvesti u workspace kako bi se izvršila daljnja obrada ili odziv spremio u bazu podataka.



Slika 5.4: Primjer zabilježenih odziva na strani vanjske izmjenične mreže. Slika prikazuje valne oblike trofaznih napona i struja mreže prilikom pokretanja i pogona mikromreže. Također je prikazana njihova amplituda i frekvencija kao posebno mjerenje. Za potrebe analize je prikazana transformacija signala u rotirajući d-q koordinatnom sustavu.



Slika 5.5: Struja i napon tijekom kratkog spoja unutar mikromreže. Napon se smanjuje s referentnog na gotovo nulu tijekom vrlo kratkog vremena, dok struja raste na vrijednosti višestruke od onih koje se pojavljuju pri normalnom pogonu.

Input 1 = Sun irradiance, in W/m2, and input 2 = Cell temperature, in deg.C.

Parameters **Advanced**

Array data

Parallel strings

Series-connected modules per string

Module data

Module:

Maximum Power (W)

Cells per module (Ncell)

Open circuit voltage Voc (V)

Short-circuit current Isc (A)

Voltage at maximum power point Vmp (V)

Current at maximum power point Imp (A)

Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)

Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)

Slika 5.6: Postavke solarnog panela. Korisnik ima velik izbor parametara koji dopuštaju precizno modeliranje i skaliranje veličine sustava.

6. Alat za testiranje baterija

Testiranje baterija je od iznimne važnosti u današnjem svijetu koji se oslanja na električnu energiju. Baterije su ključne komponente u širokom rasponu uređaja, od mobitela i prijenosnih računala do električnih automobila. Nerijetko se postavljaju uz solarne sustave (ali i ostale obnovljive izvore energije) kako bi se višak proizvodnje skladištio. Pouzdanost, trajanje i performanse baterija stoga igraju ključnu ulogu u svakodnevnom životu.

Pravilno testiranje baterija ima nekoliko ključnih ciljeva. Prvo, testiranje pomaže u provjeri i ocjenjivanju kapaciteta baterija. Kapacitet baterije odnosi se na količinu električne energije koju baterija može pohraniti i isporučiti. Mjerene vrijednosti kapaciteta omogućuju korisnicima da dobiju realnu predodžbu o tome koliko dugo će njihova baterija trajati pri određenom opterećenju. Drugi važan aspekt testiranja baterija je procjena njihove stabilnosti i sigurnosti. Baterije mogu biti sklonije pregrijavanju, curenju elektrolita ili čak eksplozijama ako nisu pravilno konstruirane ili održavane. Testiranje baterija omogućuje identifikaciju potencijalnih problema i osigurava da su baterije sigurne za upotrebu u svakodnevnim situacijama. Treći cilj testiranja baterija je provjera njihovih performansi u različitim uvjetima. Baterije mogu pokazivati različite karakteristike ovisno o temperaturi, opterećenju i drugim faktorima. Testiranje baterija u različitim scenarijima omogućuje proizvođačima da razumiju kako se baterije ponašaju u stvarnom svijetu i kako mogu optimizirati njihov dizajn radi bolje izvedbe. Dodatno, testiranje baterija je važno u istraživanju i razvoju novih tehnologija. Kako se tehnologija baterija stalno poboljšava, testiranje je ključno za procjenu inovacija i otkrivanje nedostataka ili potencijalnih unapređenja. Kroz testiranje mogu se identificirati i rješavati problemi poput smanjenja kapaciteta tijekom vremena, sporog punjenja ili gubitka energije u mirovanju.

Uzimajući u obzir sve ove čimbenike, testiranje baterija postaje neophodno za proizvođače ali i korisnike. Pruža povjerenje u performanse i sigurnost baterija te pomaže u usmjeravanju daljnjih istraživanja i razvoja. Također omogućuje korisnicima da donose informirane odluke prilikom odabira proizvoda koji najbolje zadovoljavaju njihove potrebe i zahtjeve.

6.1 Baterije

Postoje različite vrste baterija koje se koriste za pohranu i isporuku električne energije u širokom spektru uređaja. Najčešće vrste baterija su alkalne, olovnokiselinske, litij-ionske, nikal-

kadmijske te litij-polimerske. Svaka vrsta baterije ima svoje prednosti i ograničenja, a odabir prave vrste baterije ovisi o potrebama i zahtjevima specifične primjene.

Litij-ionske baterije su jedna od najpopularnijih vrsta punjivih baterija koje se danas koriste u širokom rasponu elektroničkih uređaja, od mobitela i prijenosnih računala do električnih vozila. Njihova popularnost proizlazi iz visoke gustoće energije, dugotrajnosti, malene veličine i niske razine samopražnjenja. Osnovna struktura litij-ionske baterije sastoji se od anoda, katoda, elektrolita i separatora. Anod obično koristi grafit, dok katod može biti izrađen od različitih materijala, uključujući litij-kobalt-oksidi, litij-željezo-fosfat, litij-nikal-mangan-kobalt-oksidi i drugi. Elektrolit je obično organski spoj koji omogućuje litijevim ionima da se slobodno kreću između anoda i katoda. Separator sprječava izravni kontakt između anoda i katoda, čime se sprječava kratki spoj.

Jedna od ključnih prednosti litij-ionskih baterija je visoka gustoća energije. To znači da litij-ionske baterije mogu pohraniti veliku količinu električne energije u malom i laganoj paketu. Ovo je osobito važno u mobilnim uređajima kao što su pametni telefoni i prijenosna računala, gdje korisnici žele što manje i lakše uređaje s dugim vijekom trajanja baterije. Litij-ionske baterije također imaju visoku učinkovitost punjenja i pražnjenja. Mogu podnijeti veliki broj ciklusa punjenja i pražnjenja bez značajnog gubitka kapaciteta, što znači da se mogu koristiti dugotrajno. Ova dugotrajnost čini litij-ionske baterije idealnim izborom za električne automobile i hibridna vozila, gdje je trajanje baterije ključni faktor.

Međutim, kao i kod svih tehnologija, litij-ionske baterije imaju i određena ograničenja. Primjerice, postoji rizik od termičkog propadanja ili čak eksplozije ako su baterije nepravilno konstruirane, oštećene ili izložene visokim temperaturama. Stoga je važno pravilno rukovati i održavati litij-ionske baterije kako bi se minimizirao rizik od takvih incidenata. Ukratko, litij-ionske baterije su postale ključna tehnologija za pohranu električne energije u širokom spektru uređaja. Njihova visoka gustoća energije, dugotrajnost i visoka učinkovitost čine ih idealnim izborom za mobilne uređaje i električna vozila. No, važno je pravilno rukovati i održavati litij-ionske baterije kako bi se osigurala sigurna i pouzdana upotreba. S kontinuiranim istraživanjem i razvojem, očekuje se daljnji napredak u ovoj tehnologiji i poboljšanje njezinih karakteristika u budućnosti.

6.2 Uređaji za testiranje baterija

Uređaji za testiranje baterija su ključni alati za provjeru performansi i kvalitete baterija. Njihova upotreba omogućuje precizno mjerenje i provjeru kapaciteta, naponske stabilnosti, unutarnjeg otpora i drugih parametara baterija.

Primjer uređaja za testiranje baterija je Itech IT-M3413. To je dvosmjerni AC/DC pretvarač koji se koristi za punjenje i pražnjenje baterija. Ovaj uređaj je posebno dizajniran za testiranje baterijskih ćelija manjih snaga. Neki od njegovih specifikacija su: nazivna izlazna snaga od 200 W, izlazni napon u rasponu od 0 do 150 VDC, izlazna struja u rasponu od -12 do 12 ADC, te

ulazna snaga frekvencije 50 Hz i napon 230 VAC. Jedna od korisnih značajki ovog pretvarača je mogućnost udaljenog mjerenja napona, poznata kao "remote sense". Ovo omogućava preciznije mjerenje napona i poboljšava točnost mjerenja. Također, pretvarač ima podesiv unutarnji otpor u rasponu od 0 do 1000 mOhm. Radni temperaturni raspon ovog uređaja je od 0 do 40 stupnjeva Celzijusa, što omogućava rad u različitim uvjetima okoline. Sve ove karakteristike čine Itech IT-M3413 pouzdanim i fleksibilnim uređajem za testiranje i napajanje baterija manje snage.

Prioritetni mod konstantne struje (engl. CC priority mode) je jedan od načina rada pretvarača koji omogućava kontrolu struje i napona tijekom punjenja ili pražnjenja baterija. U ovom načinu rada, korisnik zadaje konstantnu struju (pozitivnu za punjenje, negativnu za pražnjenje) i naponske limite (gornji i donji). Kada pretvarač radi u CC modu, drži struju konstantnom sve dok je mjereni napon baterije unutar zadanih limita. Ako napon dosegne gornji ili donji limit, pretvarač automatski počinje regulirati struju (tj. izlazni napon pretvarača) kako bi održao napon baterije na konstantnoj vrijednosti koja odgovara zadanim limitima. To se naziva CV mod rada pretvarača. Drugi način rada je prioritetni mod konstantne snage (engl. CW or CP priority mode). Osim zadavanja naponskih limita, u ovom modu dodatno se zadaju i limiti snage (gornji i donji). U ovom modu, pretvarač radi u CC modu sve dok su zadovoljena ograničenja napona i snaga. Ako napon ili snaga dosegne zadane limite, pretvarač automatski prelazi u CV mod, tj. CW (CP) mod rada kako bi održao stabilnost napona ili snage prema zadanim limitima. Ovi načini rada pretvarača omogućavaju preciznu kontrolu struje i napona tijekom punjenja ili pražnjenja baterija. Ovisno o specifičnim potrebama i zahtjevima, korisnik može odabrati odgovarajući način rada kako bi postigao željene rezultate u pogledu održavanja i reguliranja struje, napona i snage baterija.

6.3 Alat za testiranje baterija - Cycle killer

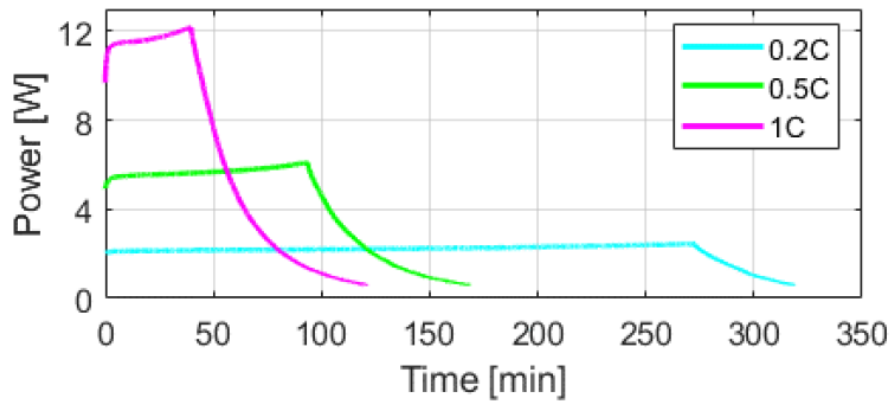
Cycle Killer je vlastiti program koji omogućava komunikaciju i upravljanje Itech pretvaračima. Ovaj program je posebno dizajniran za supervizorsko upravljanje i prikupljanje podataka (SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition) u laboratorijskim postavkama. Za implementaciju programa koristi se popularna platforma National Instruments (NI) LabVIEW. LabVIEW je softversko okruženje koje omogućava razvoj grafičkog programiranja za kontrolu i praćenje industrijskih sustava. Integracija Cycle Killer programa s LabVIEW-om omogućava napredne funkcionalnosti i fleksibilnost u upravljanju Itech pretvaračima. Cycle Killer program pruža različite mogućnosti povezivanja s Itech pretvaračima. Može se izravno povezati na računalo putem Ethernet ili USB sučelja, što omogućava brzu i jednostavnu komunikaciju između pretvarača i računalnog sustava. Osim toga, postoji mogućnost povezivanja s Itech pretvaračima putem NI cRIO (Compact Reconfigurable Input Output) platforme. cRIO je visoko fleksibilna i prilagodljiva platforma koja omogućava integraciju i kontrolu različitih ulazno-izlaznih signala. Pomoću programa, korisnici mogu upravljati Itech pretvaračima, kontrolirati postavke, pokretati testove i praćenje performansi. Također, mogu prikupljati podatke

o struji, naponu, snazi i drugim parametrima baterija tijekom testiranja. Ove informacije se koriste za analizu i evaluaciju performansi baterija, kao i za optimizaciju njihovog korištenja u različitim aplikacijama. Zahvaljujući integraciji programa s Itech pretvaračima, korisnici dobivaju snažan alat za upravljanje i nadzor baterijskih sustava u laboratorijskim okruženjima. Fleksibilnost povezivanja s računalom ili korištenje NI cRIO platforme omogućuje prilagodbu sustava prema specifičnim zahtjevima i potrebama korisnika.

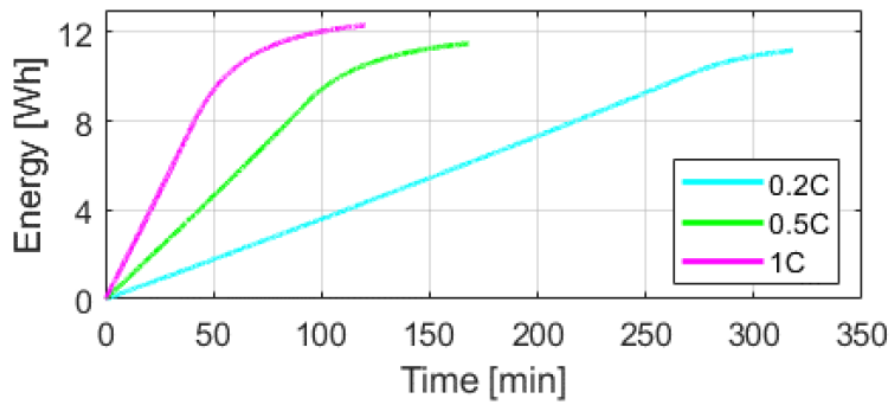
Cycle Killer program pruža napredne mogućnosti za automatski prekid punjenja ili pražnjenja baterija na temelju postavljenih uvjeta. Nekoliko ključnih značajki vezanih uz prekid:

- Automatski prekid na temelju zadanih uvjeta: Cycle Killer program omogućava postavljanje jednog ili više uvjeta koji će automatski zaustaviti punjenje ili pražnjenje baterija. Ti uvjeti mogu uključivati razinu struje, napona, snage ili temperature, koje se mogu postaviti kao više ili niže od zadanog praga.
- Prekid na temelju izbrojanih vrijednosti: Osim prekida na temelju fizičkih veličina, Cycle Killer podržava i prekid na temelju izbrojanih vrijednosti kao što su Amper-sati (Ah) ili Vat-sati (Wh). Možete postaviti prag vrijednosti izbrojenih Ah ili Wh, tako da se punjenje ili pražnjenje automatski zaustavi kada se dostigne ili premaši taj prag.
- Prekid na temelju izmjerene vrijednosti: Također je moguće postaviti prekid na temelju izmjerene vrijednosti vremena. Program prati proteklo vrijeme tijekom punjenja ili pražnjenja, i kada se dostigne zadano vremensko ograničenje, prekidaju se aktivnosti punjenja ili pražnjenja.
- Ulazak u CV mod rada pretvarača: program omogućava prekid punjenja ili pražnjenja kada pretvarač pređe u CV (konstantni napon) mod rada. To je korisno kada želite zadržati napon baterije unutar određenog raspona.
- Resetiranje prekida: Nakon što je prekid aktiviran, program omogućava resetiranje prekida klikom na Reset bistable. Ovo omogućava ponovno pokretanje punjenja ili pražnjenja nakon što su uvjeti zadovoljeni i prijeđe na sigurno stanje.
- Prozor za prikaz upozorenja: program sadrži prozor za prikaz upozorenja koji obavještava korisnika o važnim događajima. Na primjer, program će prikazati upozorenje ako je izlaz pretvarača uključen, a zaštita nije aktivirana.
- Resetiranje brojanih vrijednosti: program omogućava resetiranje izbrojenih vrijednosti poput Amper-sati (Ah), Vat-sati (Wh) i vremena (Timer) kako bi se započelo s novim mjerenjem ili testiranjem.
- Proteklo vrijeme od uključanja zaštite: program prati i prikazuje proteklo vrijeme od trenutka uključanja

Primjer dobivenih odziva iz opisanog programa dan je na slici 6.1. Slika prikazuje punjenje litij-ionskih baterija.



Vlastita mjerenja (SGLab)



Slika 6.1: Punjenje litij-ionskih baterija. Mjerenja snage i energije za različite struje punjenja, dobivena iz programa Cycle killer.

7. Softver za nadzor i upravljanje

SCADA (engl. Supervisory Control and Data Acquisition) sustav je industrijski kontrolni sustav koji ima ključnu ulogu u nadzoru i upravljanju složenim procesima u raznim industrijama. Besprijekornom integracijom softvera, hardvera i komunikacijskih mreža, SCADA sustavi omogućuju operaterima prikupljanje podataka u stvarnom vremenu, kontrolu i donošenje informiranih odluka na daljinu.

U središtu SCADA sustava nalazi se njegova funkcija nadzorne kontrole, koja operaterima omogućuje nadgledanje i reguliranje industrijskih procesa s centraliziranog sučelja. Ovo sučelje, poznato kao sučelje čovjek-stroj (engl. Human-machine Interface - HMI), pruža vizualni prikaz procesa, predstavljajući podatke u stvarnom vremenu u obliku dijagrama, grafikona i drugih grafičkih elemenata. Ovaj intuitivni zaslon poboljšava operaterovo razumijevanje sustava, omogućujući im da reagiraju brzo i učinkovito. Aspekt prikupljanja podataka SCADA-e uključuje prikupljanje informacija s brojnih senzora, mjerača i uređaja raspoređenih po cijelom objektu. Ovi uređaji mjere kritične varijable kao što su temperatura, tlak, brzina protoka, napon, frekvencija i više. Prikupljeni podaci se zatim prenose u SCADA sustav, gdje se analiziraju, obrađuju i pohranjuju za buduću upotrebu.

Kako bi se olakšala ova razmjena podataka, SCADA sustavi oslanjaju se na robusnu komunikacijsku infrastrukturu. Oni koriste žičane ili bežične mreže za povezivanje različitih komponenti, uključujući udaljene terminalne jedinice (engl. Remote Terminal Unit - RTU) i programabilne logičke kontrolere (engl. Programmable Logic Controller - PLC), koji djeluju kao posrednici između terenskih uređaja i SCADA sustava. Ova komunikacijska mreža osigurava neometan protok podataka, omogućujući operaterima primanje ažuriranja u stvarnom vremenu i izdavanje kontrolnih naredbi za optimizaciju procesa. Jedna od primarnih prednosti SCADA sustava je njegova sposobnost promptnog obavještanja operatera o važnim događajima i potencijalnim problemima. Putem sofisticiranog sustava alarma i obavijesti o događajima, operateri su upozoreni kada su unaprijed definirani pragovi ili specifični uvjeti ispunjeni. Ta se upozorenja mogu isporučiti putem vizualnih indikatora, zvučnih alarma, obavijesti e-poštom, SMS poruka ili drugih komunikacijskih kanala, osiguravajući operaterima da mogu odmah poduzeti mjere za ublažavanje problema i sprječavanje prekida.

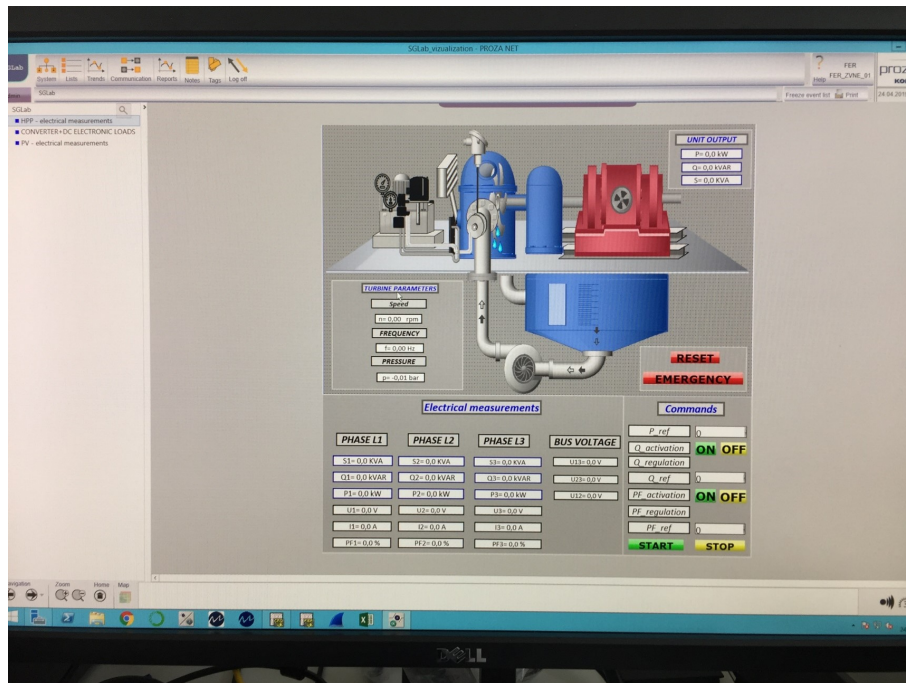
SCADA sustavi također se ističu u mogućnostima pohrane i analize podataka. Zadržavanjem povijesnih podataka operateri dobivaju dragocjene uvide u trendove procesa, obrasce performansi i anomalije. Ove informacije pomažu u optimiranju operacija, identifikaciji područja za poboljšanje i donošenju odluka na temelju podataka koje povećavaju učinkovitost, smanjuju

troškove i povećavaju produktivnost. S obzirom na kritičnu prirodu industrijskih procesa, sigurnost je najveća briga za SCADA sustave. Provedene su snažne sigurnosne mjere za zaštitu od neovlaštenog pristupa, kibernetičkih prijetnji i ostalih mogućih smetnji. Mehanizmi provjere autentičnosti, kontrole pristupa, protokoli šifriranja i sustavi za otkrivanje upada koriste se za zaštitu integriteta i povjerljivosti SCADA sustava.

Ukratko, SCADA sustavi revolucioniraju industrijsku kontrolu pružajući operaterima uvid u stanje sustava u stvarnom vremenu, mogućnosti daljinskog upravljanja i naprednu analizu podataka. Oni povećavaju operativnu učinkovitost, omogućuju prediktivno održavanje, promiču sigurnost i doprinose optimalnom funkcioniranju vitalne infrastrukture.

7.1 Dijelovi upravljačkog sustava

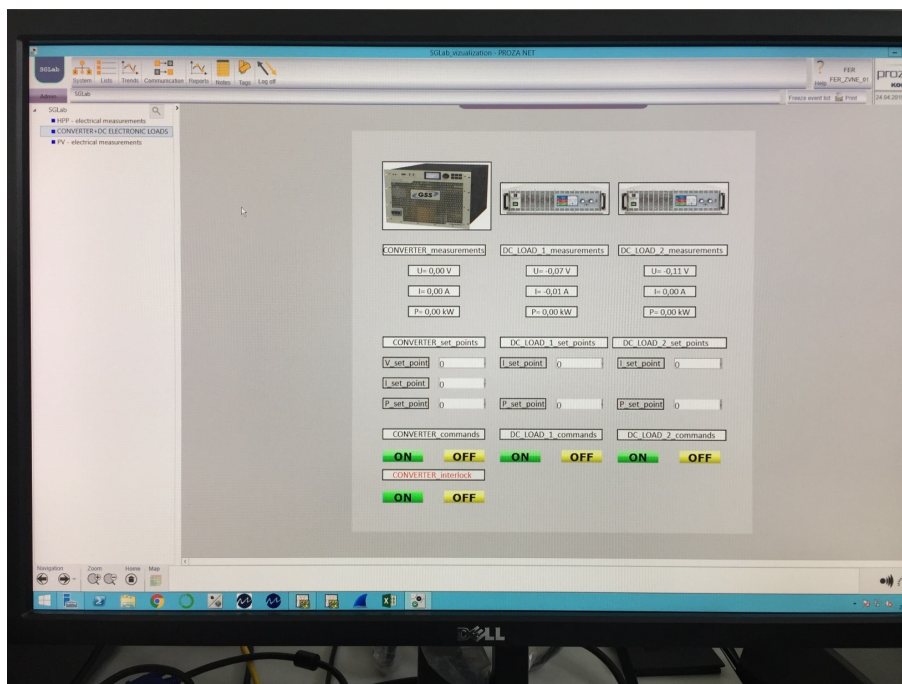
Slika 7.1 prikazuje dio razvijenog SCADA sustava koji služi za nadzor i upravljanje hidroelektranom u sklopu SG laboratorija. Sustav mjeri električne veličine poput snage, napona, struja i faktora snage ali i neelektrične veličine poput brzine, frekvencije i tlaka turbine. Sustav također dopušta upravljanje hidroelektranom na način da se zadaje radna točka radne i jalove snage te samo uključenje/isključenje.



Slika 7.1: Sustav za nadzor hidroelektrane u SGLab-u.

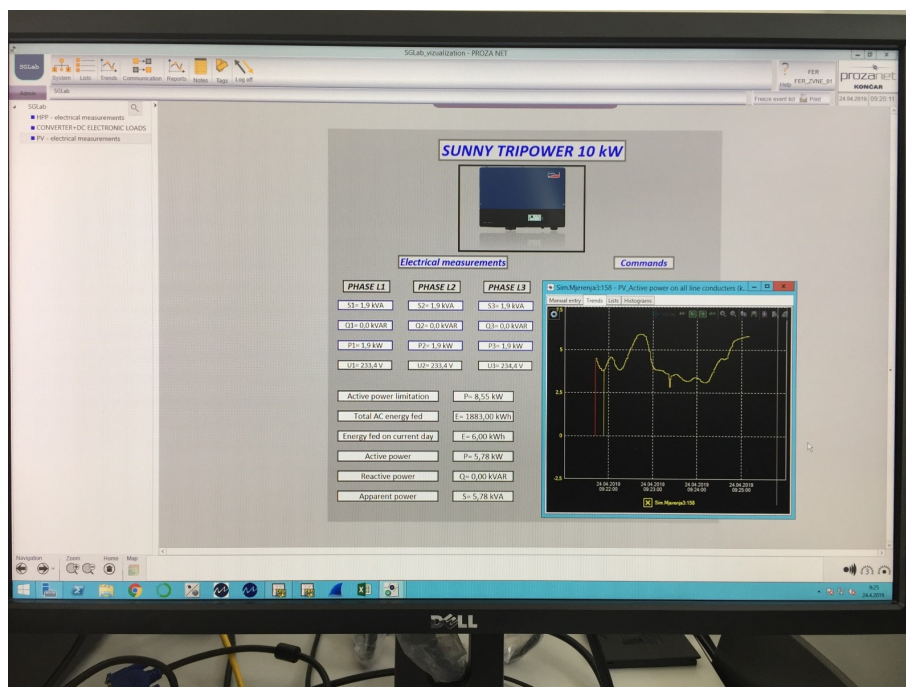
Slika 7.2 prikazuje dio SCADA sustava zaduženog za upravljanje istosmjernim dijelom mikrom-

reže u SGLab-u. Naime, istosmjerni dio mikromreže je s izmjeničnim dijelom povezan preko pretvarača koji je prikazan na slici. Navedeni pretvarač napaja dva upravljiva istosmjerna tereta kojima je moguće zadati snagu ili struju, a s kojih je moguće očitati električne veličine. Pretvaraču je moguće postaviti iste veličine uz dodatak da se može postaviti u napon istosmjernog dijela mikromreže pošto je njegova zadaća regulacija istog. Svaki od tereta i pretvarač se mogu uključiti ili isključiti.



Slika 7.2: Sustav za nadzor istosmjernog dijela SGLab mikromreže.

Slika 7.3 prikazuje dio SCADA sustava koji služi za upravljanje pretvaračem koji nadzire i regulira proizvodnju fotonaponskih panela. Fotonaponski paneli postavljeni na krovu laboratorija proizvode električnu energiju te je šalju u mikromrežu. Sustav prikazuje trenutne električne veličine po svakoj od tri faze te radnu, jalovu i prividnu snagu. Sustav također pohranjuje proizvedenu energiju tijekom dana kako bi se vizualizirala i analizirala proizvodnja.



Slika 7.3: Sustav za nadzor obnovljivog izvora energije unutar SGLab mikormreže.

8. Zaključak

U okviru izvještaja o pokazateljima napretka projekta prikazan je kratki opis razvijenih alata. Opis, osim što je informativno-tehničke prirode, može poslužiti i kao vrsta priručnika za korištenje.

Mišljenja, nalazi i zaključci ili preporuke navedene u ovom materijalu isključiva su odgovornost autora i ne odražavaju nužno stajališta Hrvatske zaklade za znanost, Ministarstva znanosti i obrazovanja i Europske komisije.

Literatura

- [1] J. Li and J. L. Kohler, "New insight into the detection of high-impedance arcing faults on DC trolley systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, no. 5, pp. 1169–1173, Sept.-Oct. 1999.
- [2] I. Grcić and H. Pandžić, "Artificial Neural Network for High-Impedance-Fault Detection in DC Microgrids," 2023 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies - Middle East (ISGT Middle East), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2023, pp. 1-5,