

Prilagodljiv fotonapetostni sistem za energetska samooskrbo svetlobne table

Marijan Španer ⁽¹⁾, Darko Hercog ⁽¹⁾, Stanko Zorec ⁽²⁾

⁽¹⁾UM FERI, Koroška c. 46, 2000 Maribor

⁽²⁾Neonart d.o.o., Zagrebška cesta 20, 2000 Maribor

marijan.spaner@um.si, darko.hercog@um.si, s.zorec@neonart.si,

Development of a universal PV power system as a power supply for illuminated advertising pylon

An alternative off-grid system for the efficient energy supply of electrical consumers has been developed. The primary PV power source is supported by a battery power bank, while an efficient consumption of available energy is carried out using an advanced control system. The main advantages of the system: a) green, renewable, environmentally friendly solution, b) in combination with a battery bank represents an ideal, high-performance energy source, c) intelligent control ensures economical use of energy and optimal operation of the device, d) installation of the device is independent of electrical grid.

A prototype of a High-performance Battery Bank (5.5 kWh, 48 V), including the development of complete technology for automated spot welding of Li-ion battery cells, has been developed and produced. DC/DC converter for power flow control in advertising board power supply and adaptable energy-saving algorithms have been developed and implemented. For testing purposes, a PV power plant was built and installed on an illuminated advertising board.

Kratek pregled prispevka

V prispevku je predstavljen sistem za energetska samooskrbo osvetljene reklamne table, od idejne zasnove, načina delovanja do načrtovanja posameznih sklopov ter praktične izvedbe prototipa.

Uvodno poglavje opisuje potek projekta, v sklopu katerega je bil razvit sistem za energetska samooskrbo osvetljene LED table, trenutno stanje tehnike na tem področju ter izhodišča za načrtovanje.

Drugo poglavje je namenjeno predstavitvi hranilnika električne energije. Podrobneje je predstavljena zasnova akumulatorske baterije z vsemi vgrajenimi komponentami in tudi praktična izvedba v laboratoriju izdelanih prototipov. Prav tako je opisana tudi zasnova in realizacija avtomatizirane linije za spajanje baterijskih celic po tehnologiji uporovnega točkovnega varjenja.

V tretjem poglavju je predstavljen sistem za vodenje pretoka energije za osvetlitev LED svetlobne table s ciljem optimalne rabe shranjene energije. Opisane so osnovne komponente: močnostni stikalni DC/DC pretvornik, njegova zasnova in izvedba, ter strojna in programska oprema krmilnega sistema.

Četrto poglavje predstavi pripravo infrastrukture na terenu, gradnjo fotonapetostne elektrarne in preizkusne osvetljene table ter izbiro komunikacijskih naprav za povezavo na internet.

1 Uvod

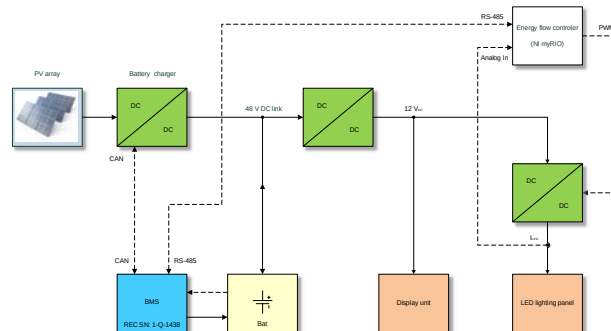
V preteklih desetletjih smo bili priča intenzivnemu razvoju tehnologije fotonapetostnih modulov in prav zato sončne elektrarne danes predstavljajo enega najcenejših in najbolj razširjenih načinov pridobivanja čiste, zelene energije. A poglobljena pomanjkljivost sončnih elektrarn še vedno ostaja enaka, da proizvajajo električno energijo le v času, ko so obsijane s soncem, medtem ko porabniki električno energijo potrebujemo ves čas, tudi, ali predvsem ponoči in v dneh brez sonca. To pomanjkljivost je možno odpraviti z dodanim hranilnikom električne energije.

Za ta namen je možno uporabiti različne tehnologije, a sodobna tehnološka rešitev glede na stanje današnje tehnike je hranjenje električne energije v baterijskih bankah na osnovi elektrokemičnih akumulatorskih baterij. Ko sončna elektrarna čez dan deluje s polno močjo, se višek električne energije shranjuje v baterijski hranilnik, s tem pa zagotavlja zalogo energije za napajanje električnih porabnikov tudi v nočnem času in v dneh brez sonca. Sistemi samooskrbnih elektrarn z dodanim zalogovnikom energije so zato primerni tudi za oddaljene porabnike, kjer ni možnosti priključitve na električno omrežje in lahko delujejo kot samostojni energetske otoki.

Na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko (FERI UM) se s sončnimi elektrarnami in hranjenjem električne energije ukvarjamo že dolga leta in nekatere raziskovalne ekipe nizajo odmevne znanstvenoraziskovalne rezultate na tem področju. Ekipa dveh raziskovalcev z Inštituta za robotiko FERI, je v mednarodnem razpisu projekta Interreg OIS-AIR (Open Innovation System of the Adriatic-Ionian Region) uspela pridobiti sredstva za izvedbo inovativne ideje v praksi na temo "Razvoj univerzalnega fotonapetostnega sistema za napajanje osvetljene oglasne table" [1]. Kot zunanji partner je v projektu sodelovalo mariborsko podjetje Neonart d.o.o.

V šestih mesecih trajanja projekta je bil razvit samooskrbni energetske sistem (slika 1) na osnovi fotovoltaične elektrarne, namenjen napajanju osvetljene oglasne table. Gre za 8 m visoko osvetljeno oglasno tablo (angl. *advertising pylon, totem*) z LED osvetlitvijo in z vgrajenimi dodatnimi prikazovalniki. Ključna inovativna ideja pri projektu razvoja sistema za energetske samooskrbo je bila uporaba algoritma prilagodljive osvetlitve oglasne table z namenom varčevanja razpoložljive energije in posledično zagotovitve zanesljivega delovanja.

Za vodenje pretoka energije pri napajanju svetlobne table je bil razvit sklop stikalnega DC/DC pretvornika, ki skupaj z naprednim algoritmom skrbi za optimalno vodenje osvetlitve LED modulov. Pri tem se jakost osvetlitve panela spreminja v odvisnosti od različnih zunanjih okoliščin, kot so čas dneva/noči, jakost dnevne svetlobe, količina v bateriji shranjene energije, zunanja temperatura itd.



Slika 1: Blokovna shema sistema za oskrbo z energijo.

Poseben poudarek v projektu je bil namenjen razvoju visokotehnološke akumulatorske baterijske banke. Polnilna baterija kapacitete 5,5 kWh je uporabna tudi za različne druge namene, npr. kot hišni hranilnik električne energije ali kot visoko zmogljiva baterija za električna vozila. Prototip baterije je bil izdelan v laboratoriju, zato je bila v ta namen razvita in izdelana tudi avtomatizirana linija za točkovno varjenje paketov litij-ionskih celic.

Glede na stanje uporabljene tehnologije je celoten proces delovanja sončne elektrarne,

stanja baterije in nadzor osvetljenosti možno spremljati in nadzorovati preko internetne povezave.

2 Baterijski hranilnik električne energije

Eden ključnih ciljev projekta je bila izdelava idejne zasnove ter tudi kompletne tehnologije izdelave za povsem nov, visokozmogljiv baterijski hranilnik električne energije.

Tovrstna polnilna baterija je zaradi svojih lastnosti primerna tudi za uporabo v naslednjih aplikacijah: (1) hišni hranilniki električne energije pri samooskrbnih sistemih (angl. home storage), (2) v mikro omrežjih ali (3) kot traksijska baterija za električna vozila. Ključni parametri baterije, ki so potrebni v opisanem sistemu so določeni z naslednjimi lastnostmi: energijska vsebnost 5,5 kWh, nazivna napetost 48 V, potrebna tokovna zmogljivost $I_n=120$ A in $I_{peak}=320$ A.

2.1 Zasnova visokozmogljive litij-ionske baterije

V okviru projekta je bilo predvideno, da se bodo prvi prototipi izdelali v laboratorijskem okolju, zato smo se odločili za uporabo že uveljavljene in tržno dostopne tehnologije standardnih akumulatorskih celic. Izbrane so bile celice tipa 18650, to so litij-ionske polnilne cilindrične celice premera $D=18$ mm in dolžine $L=65$ mm, tipična nazivna napetost je $U_n=3,7$ V, vsebnost shranjene energije pa do 10 Wh po celici.

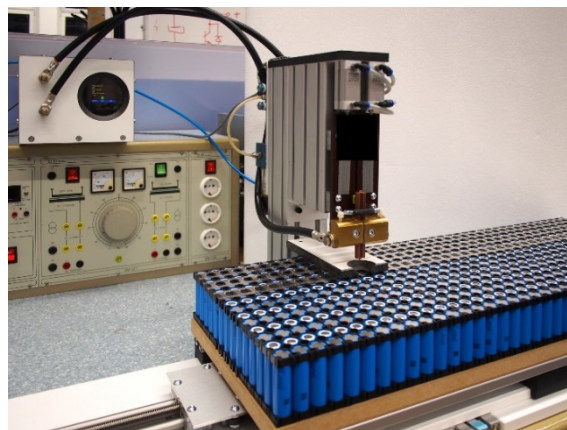
Glede na zahtevo po skupni količini shranjene energije v vrednosti 5,5 kWh je bila določena konfiguracija 14S/40P s 560 celicami. Uporabljena konstrukcija ima zasnovo ploščate matrike v velikosti 14 x 40 celic. Glede na električne lastnosti litij-ionskih baterijskih celic je v fazi polnjenja in praznjenja potreben nadzor napetosti vsake posamezne celice ter izenačevanje morebitnih odstopanj. Celoten nadzor delovanja baterijskega hranilnika je izveden preko BMS (Battery Management System), ki vključuje sisteme za meritev toka, napetosti celic, vrednosti stanja napolnjenosti SOC (State of Charge), temperature celic.

Za varnost in prilagodljivost pri uporabi ima baterijski zalogovnik vgrajenih še nekatere dodatne komponente: močnostni vklopnik z optimizatorjem porabe, sistem za »mehki« vklop porabnika, ločena močnostna konektorja za priključitev električnih porabnikov ter za polnjenje baterije, zaščite vodov s hitrimi termičnimi varovalkami, tokovni merilnik, merilnik temperature baterijskih celic. Enota ima podatkovno komunikacijo z zunanjimi napravami (RS-485 in CAN). Predvidena je tudi namestitev hladilne enote s toplotno črpalko in v ohišje baterije vgrajenim toplotnim izmenjevalnikom tipa »voda-zrak«, kar pa v trenutni aplikaciji ni bilo potrebno.

Primarni vir energije za polnjenje baterije je fotonapetostna elektrarna, baterija pa je na njo priključena preko solarnega polnilnika. Uporabljen je namenski solarni polnilnik, ki deluje po principu iskanja točke najvišje moči (MPPT - maximum power point tracking). Močnostni polnilnik ima CAN komunikacijsko povezavo z baterijskim BMS modulom, odkoder dobiva vse potrebne informacije o stanju akumulatorske baterije in na osnovi njih omejuje pretok energije za polnjenje.

2.2 Avtomatizirana linija za spajanje akumulatorskih celic s tehnologijo točkovnega varjenja

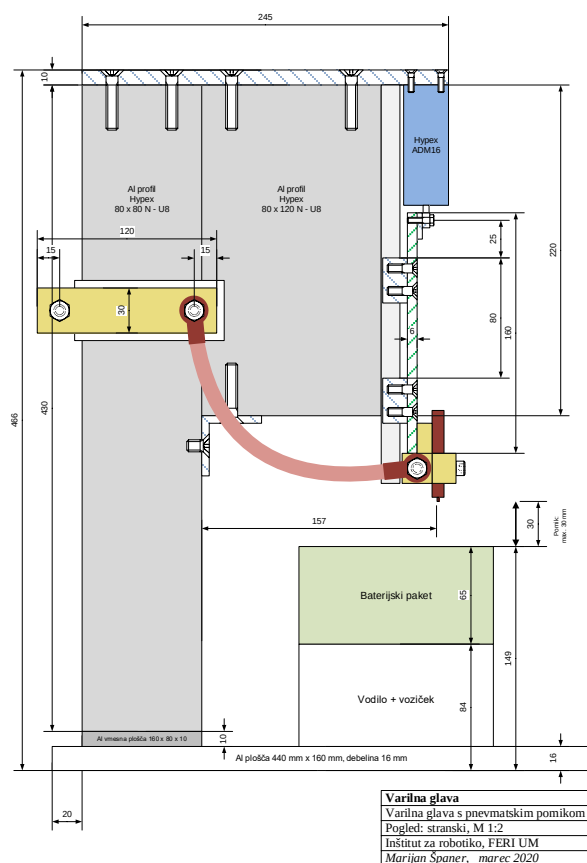
V sklopu projekta je bila idejno razvita in izdelana kompletna linija za spajanje Li-ionskih celic tipa 18650, slika 2:



Slika 2: Izvedba linije za točkovno varjenje litijevih celic.

Avtomatizirana varilna linija je sestavljena iz transportnega mehanizma, s katerim se premika sestavljen baterijski paket, varilne glave in vira varilnega toka. Varilna glava (slika 3) je dimenzijsko prilagojena velikosti delovnega prostora transportnega mehanizma z vključenim baterijskim paketom. Postopek varjenja se izvaja na način, da servo pozicionirni sklop premakne baterijski paket do naslednje celice, nato pa varilna glava s pnevmatskima aktuatorjema in varilnima elektrodama na vsako baterijsko celico pritisne povezovalni trak iz niklja, zatem pa se uporabo uporovnega točkovnega varjenja izvede spoj.

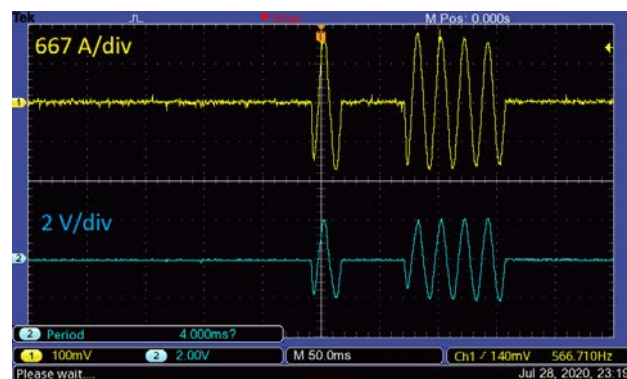
Vir varilnega toka (slika 2, zgoraj levo) je izveden kot samostojna zunanja enota in je na elektrode varilne glave priključen z vodniki velikega preseka.



Slika 3: Konstrukcija varilne glave.

Viru varilnega toka je možno programsko nastavljati čas trajanja predhodnega in glavnega varilnega impulza (slika 4), sam trenutek začetka varjenja pa se sproži preko digitalnega

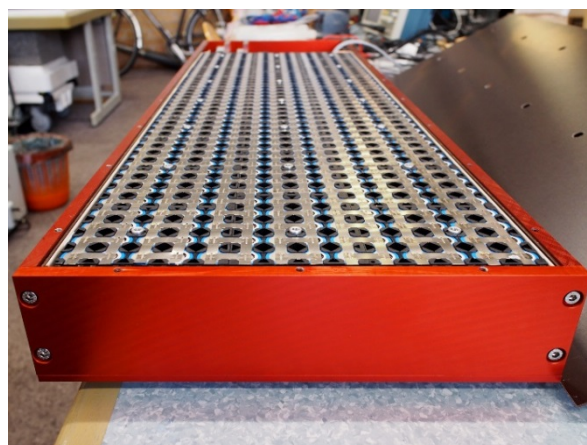
izhoda krmilnika in na ta način je varjenje sinhronizirano s premikanjem paketa celic. Za vodenje celotnega procesa je uporabljen industrijski krmilnik gibanja (Motion Controller) z ustreznim uporabniškim programom.



Slika 4: Varilni tok (zgornja krivulja) in napetost pri uporovnem točkovnem varjenju.

2.3 Izvedba prototipa litij-ionske baterije

Velika pozornost pri izdelavi baterijskega sklopa je bila namenjena izvedbi kakovostnih povezav za enosmerno zbiralko z namenom doseganja čim nižje notranje impedance in posledično visoko tokovne zmogljivosti baterije; v ta namen so bila izdelana posebna tokovna vodila iz masivnega elektrolitskega bakra.



Slika 5: Sestavljen baterijski paket v ohišju.

Opisan baterijski paket je sestavljen iz 560 celic s skupno maso preko 30 kg, ki so

vstavljene v namenske matrične nosilce iz brizgane plastike (PC+PP+GP). Zaradi mase in mehanske krhkosti je bilo za vgradnjo paketa potrebno zagotoviti zelo stabilno in mehansko trdno ohišje, prikazano na sliki 5.

Izdelano je bilo ohišje iz zlitine aluminija, magnezija in silicija (Al-Mg-Si), ki ga odlikuje visoka mehanska trdnost in nizka specifična teža. Ohišje se sestavlja z vijačenjem, pri čemer sendvič konstrukcija nosilnih in izolacijskih plošč v popolnosti stisne in fiksira baterijski paket. Značilnost uporabljenega materiala je tudi nizka termična upornost, s čimer je, vsaj za večino aplikacij, zagotovljen zadosten prenos toplote v okolico. Pri aplikacijah z visokimi močnostnimi obremenitvami je z namenom intenzivnejšega hlajenja v konstrukciji ohišja predvidena prigradnja toplotnega izmenjevalnika, ki deluje v kombinaciji z zunanjo toplotno črpalko.



Slika 6: Baterijski paket 48 V, 5,5 kWh.

Celoten akumulatorski zalogovnik z vsemi dodanimi sklopi je nameščen v namensko aluminijasto ohišje (slika 6) z dimenzijami 1000 mm x 315 mm x 80 mm, skupna teža celotne naprave je 50 kg.

3 Vodenje pretoka energije za osvetlitev panela

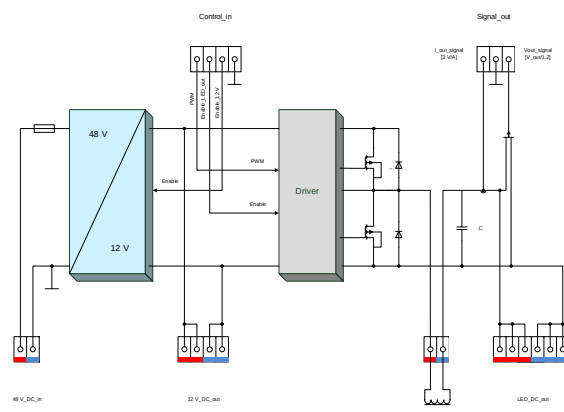
V osvetljeni oglasni tabli je uporabljena kontrola spremenljive osvetljenosti z uporabo inovativnega varčevalnega algoritma. Ta

zagotavlja, glede na nekatere vhodne spremenljivke (čas dneva, zunanjo svetlobo, stopnjo razpoložljive energije, zunanjo temperaturo, itd.), optimalni nivo osvetljenost celotnega panela kot tudi prikazovalnika. Za izvedbo takšne funkcije so potrebni nekateri namenski sklopi: močnostni DC/DC pretvornik za prilagoditev napetostnega in tokovnega območja baterije kot vira energije na električne lastnosti LED modulov za osvetlitev table, krmilnik za vodenje jakosti osvetlitve po programu, ob tem pa še vsa senzorika, zaščitna tehnika in komunikacijski sklopi.

3.1 Močnostni stikalni DC/DC pretvornik

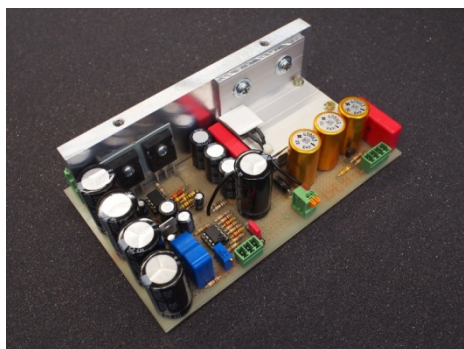
Za aplikacijo je bil v laboratoriju razvit namenski močnostni DC/DC stikalni pretvornik, katerega osnovna funkcija je napetostna prilagoditev med baterijo in bremenom ter vodenje napajalnega toka osvetljene reklamne table. Baterijsko napetost 48 V je potrebno pretvoriti na nižjo napetost, primerno za napajanje 12 V LED modulov. Možno bi bilo izbrati tudi preprosto napetostno vodenje, vendar je pri tem načinu precej pomanjkljivosti, kot so npr. vpliv temperaturnih sprememb U-I karakteristik LED modulov in vpliv različnih upornosti povezav do posameznih modulov.

Zato smo se pri opisanem projektu odločili za vodenje svetlobnega pretoka posredno preko vodenja vrednosti električnega napajalnega toka LED panelov. Poleg tega bi bilo, glede na konfiguracijo pretvornika, možno tudi vodenje prenašane moči za osvetlitev table.



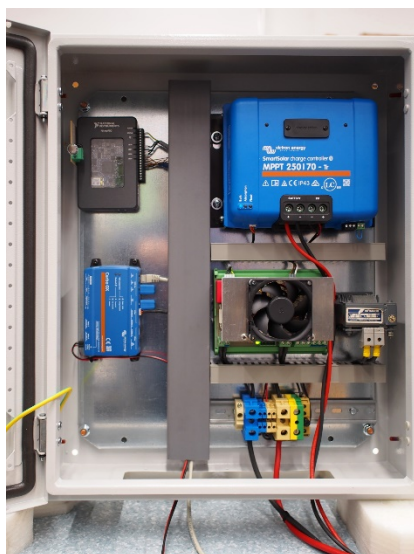
Slika 7: Blokovna shema močnega DC/DC pretvornika.

Stikalni pretvornik je zasnovan dvostopenjsko (slika 7): prva Buck stopnja zagotavlja pretvorbo vhodne baterijske napetosti (odvisno od stopnje napolnjenosti baterije je leta v območju od 42 V do 59 V) navzdol na konstantno vrednost 12V.



Slika 8: Prototip stikalnega DC/DC pretvornika.

Tudi druga stopnja pretvornika je tipa Buck in napetost še dodatno znižuje, poleg tega ima tudi funkcijo tokovnega vodenja. Digitalna tokovna regulacijska zanka je izvedena v centralnem krmilniku myRIO, z meritvijo toka preko A/D pretvornikov, PID regulatorjem in generiranjem PWM signala za vklopjanje močnostnih tranzistorjev. Ta sistem zagotavlja natančno osvetlitev LED modulov v območju med najmanj 10% in največ 100% nazivnega toka. Izgled prototipa pretvornika je razviden na sliki 8.



Slika 9: Stikalna omarica z vgrajenimi sklopi krmilnega sistema.

DC/DC pretvornik je bil razvit namensko za opisano aplikacijo in zagotavlja možnost nastavitve izhodno napetosti od 0 V do 12 V ter največjo tokovno obremenitev do 45 A, kar ustreza potrebam napajanja LED osvetljene table. Zaradi visoke obremenitve in namestitve v zaprto elektro omarico ima pretvornik prigradjeno tudi prisilno ventilatorsko hlajenje (slika 9).

3.2 Krmilni sistem in algoritem za optimalno rabo shranjene energije

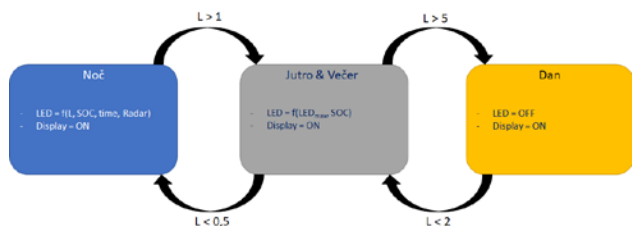
Za vodenje pretoka energije za napajanje LED osvetljene table je bil uporabljen »real-time« krmilnik National Instruments, tip myRIO. Krmilnik ima na razpolago analogne vhode, analogne izhode, digitalne vhodno/izhodne linije, Xilinx FPGA, dvojedni ARM Cortex-A9 procesor, vgrajen pa je tudi pospeškometer in WiFi podpora.

Svetlobni tok LED sijalk je v območju vse do nazivne vrednosti obremenitve skorajda proporcionalno odvisen od električne moči, s katero se napajajo LED moduli. Lahko se uporabi način vodenja napajalne moči sijalk, a glede na izrazito nelinearno diodno karakteristiko LED svetil (skoraj konstantna napetost, ne glede na tok) je bil uporabljen način tokovnega vodenja. Napreden nadzorni algoritem določa vrednost referenčne svetilnosti glede na zahteve uporabnika in dodatno še na podlagi številnih spremenljivk ter zajemov vrednosti iz zunanjih senzorjev:

- referenčna vrednost svetilnosti LED table, glede na zahtevo uporabnika,
- čas, oziroma ura dneva,
- vrednost zunanje osvetljenosti (iz senzorja),
- SOC - raven razpoložljive energije v bateriji,
- senzor gibanja (opcijski radarski prometni merilnik hitrosti),
- zunanja temperatura,
- verjetnost sončne osvetljenosti v prihodnjih dneh na osnovi vremenske napovedi itd.

Na osnovi teh vhodnih spremenljivk in pravil je bila določena osnovna shema vodenja, ki lahko deluje v treh različnih režimih, prehodi

med njimi pa so definirani s spremembami vrednosti zunanjih pogojev (slika 10).



Slika 10: Osnovna shema vodenja.

Spremenljivke so definirane na naslednji način:

- L – osvetljenost, luminance [cd/m²],
- $L=0$ – (popolna tema, noč),
- $L=0,5$ – (zelo temno),
- $L=1$ – (temno/svetlo),
- $L=2$ – (svetlo),
- $L>5$ – (sončno)
- LED svetilnost table, možna je nastavitev od 0 ... 100 % nazivnega toka/svetilnosti.

Pravilo za npr. »NOČ«:

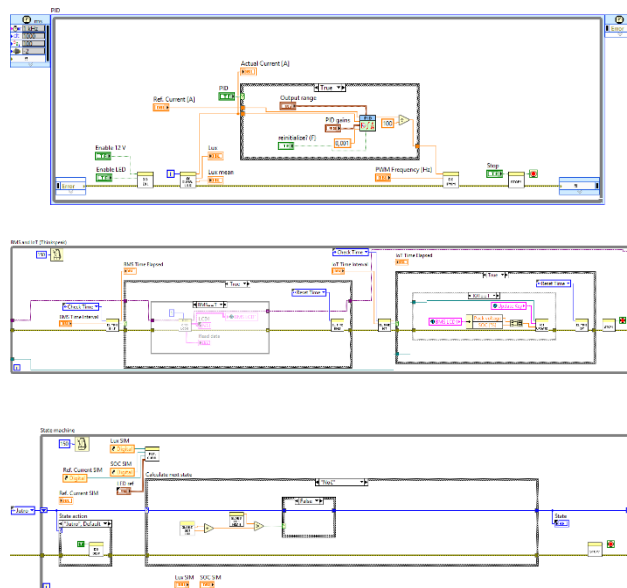
$$LED_{night} = LED_{min} + k_1 * (L/100) * k_2 * (SOC/100) + k_3 * Radar$$

- LED_{max} – maksimalna/nazivna svetilnost LED panela,
- LED_{min} – min. svetilnost panela ustreza 10 % od LED_{max} , torej: $LED_{min} = LED_{max}/10$,
- $time$ – čas dneva, 0 ... 24 h,
- SOC – stanje napolnjenosti baterije (0 ... 100 %),
- $Display$ – vklop prikazovalnikov (temperatura, ura, radarski merilnik hitrosti), vklop napajanja 12 V,
- $Radar$ – signal indikacije mimovozečega vozila.

Vrednost osvetljenosti L je ena ključnih spremenljivk, s pomočjo katere so določena prehajanja med tremi različnimi stanji, oziroma režimi delovanja svetlobne table (slika 10). Svetlobni senzor mora imeti zvezen izhodni signal v širokem razponu zunanje osvetljenosti. Glede na dejstvo, da je večina tovrstnih senzorjev na trgu namenskih in dobavljiva le s preklopnim izhodom, je bilo potrebno izdelati svojega. Uporabljen je fotouporovni element, ki smo ga vgradili v vodoodporno ohišje ter preko prilagoditvenega vezja in električnega filtra priključili na analognu-digitalni vhod krmilnika.

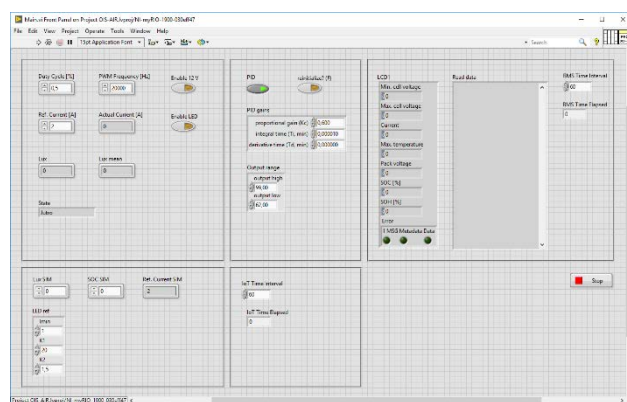
Zaradi morebitnih motenj (prehod oblakov, preleti ptic itd.) je signal v programu še dodatno digitalno filtriran.

Program za vodenje svetilnosti LED oglasne table se izvaja na krmilniku myRIO, na osnovi predhodno opisanih pravil je bil sestavljen v programskem okolju LabVIEW (slika 11).



Slika 11: Testni program, sestavljen v okolju LabVIEW.

Za namene testiranja je bil narejen uporabniški vmesnik, s katerim je omogočen pregled vseh pomembnih vhodnih parametrov sistema, testiranje naprave v različnih režimih kot tudi ročno generiranje izhodnih vrednosti.



Slika 12: Uporabniški vmesnik za testiranje sistema za samooskrbo.

Nadzorni program je trenutno v fazi testiranja, tudi algoritem se še izpopolnjuje, ob zaključku je predvidena izdelava končnega uporabniškega vmesnika.

4 Gradnja fotovoltaične elektrarne in oglasne table z LED osvetlitvijo

Vsa tehnična oprema je bila zasnovana ter v celoti sestavljena in tudi preizkušena v laboratoriju na fakulteti. Akumulatorski hranilnik energije je vgrajen v samostojno robustno kovinsko ohišje, prav tako pa je tudi vsa ostala krmilna tehnologija (solarni polnilnik, nadzorni krmilnik, DC/DC pretvornik, napajalniki, moduli za internetno komunikacijo) vgrajena v električno omarico.



Slika 13: Sončna elektrarna na sedežu podjetja projektnega partnerja.

Po laboratorijski preizkusni fazi bo vsa oprema preseljena in nameščena v objektu, na sedežu podjetja Neonart d.o.o. Po dogovoru s projektnim partnerjem smo se odločili za postavitve testnega oglaševalskega stebra. Ta je bil narejen izključno za preskusne namene in bo kasneje služil kot demonstracijski razstavni predmet za promocijo samozadostne tehnologije oskrbe z električno energijo. V podjetju Neonart d.o.o. so pripravili vso potrebno infrastrukturo za testiranje: zgradili so sončno elektrarno z močjo 1600 W (slika 13), izdelali testno LED oglasno tablo z nazivno močjo ter predvideli prostor za vgradnjo tehnične opreme. Glede na to, da imajo vse posamezne komponente sistema možnost daljinske komunikacije, je izveden tudi

priključek za kabelsko internetno povezavo, opsijsko pa je možna tudi komunikacija preko GSM modema. V prihodnosti je predvideno kompletno daljinsko vodenje, torej možnost programiranja naprave, optimiranje parametrov, prav tako pa tudi spremljanje stanja količine shranjene energije.

5 Sklep

Projekt je ta hip v zaključni fazi. Posamezni sklopi so že preizkušeni in delujoči, v kratkem času je predvidena tudi postavitve svetlobnega panela in zagon celotne naprave. Ob uspešnem zaključku projekta vsi sodelujoči ugotavljamo, da sodelovanje med univerzitetno akademsko raziskovalno sceno na eni strani ter realnim gospodarstvom na drugi strani predstavlja odlično kombinacijo pri razvoju inovativnih in visokotehnoloških izdelkov. Pri razvoju posameznih sklopov samooskrbnega napajalnega sistema smo prišli do mnogih novih spoznanj, predvsem na področju optimiranja in varčne rabe shranjene električne energije iz baterijskega hranilnika. Več podrobnosti je podano v zaključnem poročilu [2].

Koristne so bile tudi izkušnje pri izdelavi koncepta, razvoju tehnologije in izdelavi prototipa baterijskega paketa. V prihodnje je predvideno testiranje akumulatorske baterije v pogojih povišanih močnostnih obremenitev; ob tem bi v notranjost ohišja baterije z namenom aktivnega hlajenja naprave želeli integrirati tudi sklop izmenjevalnika toplote v kombinaciji z zunanjo toplotno črpalko.

6 Literatura

- [1] *Hybrid energy storage devices in off-grid PV energy systems*, predstavitev projekta, spletna stran: <https://www.oisair.net/technology/index>
- [2] M. Španer, *Development of a universal PV power system as a power supply for illuminated advertising pylon*, Technical reporting, 2020.