



B&B
VIŠJA STROKOVNA ŠOLA

Diplomsko delo višješolskega strokovnega študija
Program: Elektroenergetika
Modul: Zaščita in učinkovitost

**POVEČANJE RAZPOLOŽLJIVE
PRIKLJUČNE MOČI Z UPORABO
HIBRIDNE FOTOVOLTAIČNE
ELEKTRARNE IN
HRANILNIKA**

Mentor: dr. Viktor Lovrenčič, univ. dipl. inž. el.
Lektorica: Monika Ajlec, mag. prof. slov.

Kandidat: Tomaž Korošec

Ljubljana, avgust 2026

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju dr. Viktorju Lovrenčiču, univ. dipl. inž. el., za vso pomoč in podporo. Zahvaljujem se tudi podjetju Velog d. o. o., ki mi je omogočilo biti del takšnega edinstvenega projekta, na podlagi katerega je nastala diplomska naloga.

Zahvaljujem se tudi lektorici, ki je mojo diplomsko nalogo jezikovno in slovnično pregledala.

IZJAVA

Študent Tomaž Korošec izjavljam, da sem avtor tega diplomskega dela, ki sem ga napisal pod mentorstvom dr. Viktorja Lovrenčiča, univ. dipl. inž. el.

Skladno s 1. odstavkom 21. člena Zakona o avtorski in sorodnih pravicah dovoljujem objavo tega diplomskega dela na spletni strani šole in v institucionalnem oz. nacionalnem repozitoriju (COBBISS).

Dne: 27. 8. 2026

Podpis: _____

POVZETEK

Diplomska naloga obravnava reševanje problema omejene priključne moči na kmetijsko-predelovalnem obratu s pomočjo hibridne sončne elektrarne in baterijskega hranilnika električne energije. Obravnavani primer je izvedba sistema v vinarni v Vipavski dolini, kjer priključna moč objekta znaša 17 kW, konične obremenitve sodobne vinarske tehnologije pa dosegajo do 50 kW. Ker klasična pot povečanja priključne moči zaradi tehničnih, časovnih in finančnih razlogov ni bila izvedljiva, je bila razvita alternativna rešitev, ki temelji na dvigu razpoložljive moči objekta brez fizične nadgradnje distribucijskega omrežja.

V teoretičnem delu so predstavljene osnove hibridnih sončnih elektrarn in baterijskih hranilnikov LiFePO_4 ter tehnika rezanja koničnih obremenitev, ki je v jedru rešitve. Obravnavane so tudi zahteve standarda SIST EN 50549-1, sistemskih obratovalnih navodil SONDSEE ter tehničnih smernic SZPV 512, TSG-N-002 in TSG-N-003 za priklop proizvodnih naprav na omrežje. Razložen je pomen kompenzacije jalove moči za skladnost obratovanja sistema z zahtevami distribucijskega operaterja.

V praktičnem delu je predstavljena izvedba sistema, sestavljenega iz fotovoltaičnih modulov skupne moči 34 kWp, hibridnega razsmernika 50 kVA in baterijskega hranilnika 102,4 kWh, z ločilnim mestom U-F rele DOLD RP9811 v shemi Uf-A. Med obratovanjem so se pokazali izzivi z natančnostjo tokovnikov in jalovo močjo induktivnih bremen, ki so povzročali izklapljanje obračunskega števca, kar je bilo rešeno z vgradnjo Smart Energy Metra. Rezultati kažejo, da sistem zagotavlja razpoložljivo moč do 50 kW kljub priključni moči 17 kW ter dosledno kompenzacijo jalove moči na $\cos \varphi = 0,95$. Rešitev predstavlja tehnično, ekonomsko in časovno ustrezno alternativo klasičnemu povečevanju priključne moči in je primer dobre prakse za podobne industrijske objekte.

KLJUČNE BESEDE

- Priključna in razpoložljiva moč
- Hibridna sončna elektrarna
- Baterijski hranilnik LiFePO_4
- Rezanje koničnih obremenitev
- Kompenzacija jalove moči

SUMMARY

The diploma thesis addresses the problem of limited grid connection power in an agri-food processing facility through the application of a hybrid solar power plant combined with a battery energy storage system. The case study presented is a system installation at a winery in the Vipava Valley, where the connection power of the facility is 17 kW, while peak loads of modern wine-making technology can reach up to 50 kW. Since the conventional approach of increasing the grid power was not feasible due to technical, time-related, and financial constraints, an alternative solution was developed, based on increasing the available power of the facility without physical upgrades to the distribution network.

The theoretical part presents the fundamentals of hybrid solar power plants and LiFePO_4 battery storage systems, along with the technique of peak shaving, which forms the core of the solution. It also addresses the requirements of the SIST EN 50549-1 standard, the SONDSEE distribution system operating instructions, and the SZPV 512, TSG-N-002, and TSG-N-003 technical guidelines for connecting production units to the network. The role of reactive power compensation in ensuring compliance with the distribution operator's requirements is also explained.

The practical part presents the system implementation, consisting of photovoltaic modules with a total power of 34 kWp, a 50 kVA hybrid inverter, and a 102.4 kWh battery storage system, with a disconnection point featuring a DOLD RP9811 U-F relay under the Uf-A scheme. During operation, challenges emerged related to current transformer accuracy and reactive power from inductive loads, which caused meter tripping and were resolved by installing a Smart Energy Meter. The results confirm that the system provides available power of up to 50 kW despite the 17 kW connection power, with reactive power compensation consistently maintained at $\cos \varphi = 0.95$. The solution represents a technically, economically, and time-effective alternative to conventional grid power increases and serves as an example of good practice for similar industrial facilities.

KEYWORDS

- Grid power and available power
- Hybrid solar power plant
- LiFePO_4 battery energy storage
- Peak shaving
- Reactive power compensation

KAZALO

1	UVOD	1
1.1	Predstavitev problema.....	1
1.2	Cilji naloge.....	2
1.3	Predstavitev okolja.....	3
1.4	Predpostavke in omejitve	4
1.4.1	Predpostavke	4
1.4.2	Omejitve.....	5
1.5	Metode dela.....	6
2	TEORETIČNE OSNOVE	8
2.1	Priključna moč in razpoložljiva moč	8
2.2	Sestava in delovanje hibridne sončne elektrarne	9
2.3	Hibridni razsmernik.....	11
2.4	Baterijski hranilniki električne energije LiFePO_4	14
2.5	Jalova moč in zahteve omrežja (SIST EN 50549-1).....	16
3	OBSTOJEČE STANJE VINSKE KLETI.....	19
3.1	Analiza stanja v vinarni	19
3.2	Energetske potrebe objekta	21
4	PRAKTIČNI DEL	23
4.1	Zasnova in dimenzioniranje sistema	23
4.2	Izbira komponent.....	25
4.2.1	Fotovoltaični moduli Hyundai HiE-S425HG(FB)	25
4.2.2	Modulski optimizatorji Tigo TS4-O-A	27
4.2.3	Hibridni razsmernik Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4	28
4.2.4	Baterijski hranilnik Deye BOS-G Pro	29
4.2.5	Oprema ločilnega mesta	31
4.3	Enopolna shema in večpolna shema ločilnega mesta U-F rele.....	32
4.3.1	Enopolna shema MFE	32
4.3.2	Večpolna shema ločilnega mesta z U-F relejem DOLD RP9811	34
4.4	Montaža komponent.....	36
4.4.1	Strešna podkonstrukcija in fotovoltaični moduli.....	36
4.4.2	DC ožičenje in modulski optimizatorji	37
4.4.3	Razsmernik in baterijski hranilnik	38
4.4.4	Ločilno mesto in povezava s priključno-merilno omarico	39
4.5	U-F rele DOLD RP9811.....	40
4.6	Zagon in testiranje sistema	43
4.7	Reševanje tehničnih izzivov	45
4.7.1	Tolerance in pomanjkljivosti vgrajenih tokovnikov	46
4.7.2	Pojav jalove moči in izklapljanje obračunskega števca	46
4.7.3	Vgradnja Smart Energy Metra in prilagoditev nastavitvev.....	47
4.7.4	Druge manjše prilagoditve.....	48

5	KOMENTAR IN ZAKLJUČEK.....	50
6	LITERATURA IN VIRI	53

KAZALO SLIK

Slika 1: Hibridna sončna elektrarna – prikaz delovanja	11
Slika 2: Hibridni razsmernik Deye	13
Slika 3: LiFePO4 baterija	16
Slika 4: Krivulja moči	18
Slika 5: Slika objekta vinarne v Vipavi.....	21
Slika 6: Izris PV modulov	25
Slika 7: PV modul Hyundai.....	26
Slika 8: Optimizator Tigo TS4-O-A.....	27
Slika 9: U-F rele DOLD	31
Slika 10: Enopolna shema MFE+HEE	34
Slika 10: U-F rele shema.....	36
Slika 10: Montirani PV moduli na strehi	37
Slika 11: Deye sistem z AC/DC zaščitami.....	39
Slika 12: Fizična vezava U-F releja.....	42
Slika 13: Začetna faza testiranja – zagon vseh strojev pri porabi 40 kW.....	45
Slika 14: Smart Energy Meter Eastron.....	48
Slika 15: Stabilno delovanje sistema 2025.....	49

KAZALO TABEL

Tabela 1: Osnovni podatki hibridne elektrarne.....	24
Tabela 2: Osnovni podatki PV modula Hyundai.....	27
Tabela 3: Osnovni podatki razsmernika Deye	29
Tabela 4: Osnovni podatki hranilnika Deye.....	31

POJMOVNIK

Fotovoltaični modul: osnovna gradbena enota fotovoltaičnega sistema, sestavljena iz medsebojno električno povezanih fotovoltaičnih celic, ki na osnovi fotoelektričnega pojava sončno sevanje neposredno pretvarjajo v enosmerno električno energijo

Optimizator (PV optimizator): naprava, ki je povezana na posamezen PV modul in optimizira njegovo delovanje (sledenje točki maksimalne moči – MPPT), kar zmanjša vpliv senčenja in izboljša nadzor nad sistemom

Hibridni razsmernik: naprava, ki združuje funkcijo solarnega razsmernika in polnilnika baterij v eni enoti ter omogoča hkratno upravljanje fotovoltaične proizvodnje, baterijskega hranilnika in omrežne povezave

Baterijski hranilnik energije (LiFePO_4): električni hranilnik energije, zgrajen na osnovi litijevega železovega fosfata, ki shranjuje presežno električno energijo fotovoltaičnega sistema in jo po potrebi oddaja v omrežje ali neposredno porabnikom

BMS (Battery Management System): elektronski upravljalni sistem baterijskega hranilnika, ki nadzoruje stanje posameznih celic, skrbi za enakomerno polnjenje in praznjenje ter ščiti baterijo pred prenapetostjo, podnapetostjo, preobremenitvijo in pregrevanjem

EPS (Emergency Power Supply): namenski izhod hibridnega razsmernika, ki ob izpadu omrežja avtonomno napaja prednostne porabnike neposredno iz baterijskega hranilnika ali fotovoltaičnega sistema, neodvisno od distribucijskega omrežja

U-F rele DOLD: zaščitna naprava, ki neprekinjeno nadzoruje napetost in frekvenco omrežja ter v primeru prekoračitve nastavljenih mejnih vrednosti izklopi razsmernik iz omrežja

Smart Energy Meter: napredna merilna naprava, ki v realnem času meri in nadzoruje pretok električne energije med fotovoltaičnim sistemom, baterijskim hranilnikom in omrežjem ter hibridnemu razsmerniku posreduje podatke za optimalno upravljanje energetskega toka

SIST EN 50549-1: slovenski standard, ki določa zahteve za priključitev generatorskih enot na nizkonapetostno distribucijsko omrežje, vključno s pogoji za zaščito, otoško obratovanje in odklopitev iz omrežja

SODO: sistemski operater distribucijskega omrežja Slovenije, odgovoren za priključitev, delovanje in zanesljivost distribucijskega elektroenergetskega sistema

TSG-N-002:2021: tehnična smernica za nizkonapetostne električne inštalacije v stavbah v Sloveniji

TSG-N-003:2021: tehnična smernica za zaščito stavb pred delovanjem strele

SZPV 512: slovenska smernica za požarno varnost sončnih elektrarn

SONDSEE: sistemska obratovalna navodila distribucijskega sistema električne energije, ki določajo pravila priključevanja in obratovanja naprav v slovenskem distribucijskem omrežju

MPPT (Maximum Power Point Tracking): algoritem, ki ves čas prilagaja obratovalno točko modula, da deluje pri največji mogoči moči glede na pogoje osvetlitve in temperature

Jalova moč: komponenta električne moči v izmeničnih sistemih, ki nastane zaradi faznega zamika med napetostjo in tokom ter ne opravlja koristnega dela, temveč obremenjuje omrežje in povečuje tokove v vodnikih

Rezanje konic (angl. *peak shaving*): strategija upravljanja z električno energijo, pri kateri hranilnik energije ali drug vir v obdobjih visokih obremenitev oddaja shranjeno energijo in s tem zmanjšuje konični odjem iz omrežja ter preprečuje prekoračitev priključne moči

KRATICE IN AKRONIMI

LiFePO ₄ :	litijev železov fosfat
MPPT:	Maximum Power Point Tracking (sledenje maksimalni točki moči)
OVE :	obnovljivi viri energije
PID:	projekt za izvedbo
PV:	fotonapetostni (Photovoltaic)
SIST:	Slovenski inštitut za standardizacijo
SODO:	Sistemiški operater distribucijskega omrežja
SONDSEE:	Sistemska obratovalna navodila distribucijskega sistema električne energije
U-F:	napetostno-frekvenčni

1 UVOD

1.1 Predstavitev problema

V sodobni vinski predelavi električna energija ni le podporna infrastruktura, temveč del tehnološkega procesa, ki neposredno vpliva na kakovost končnega pridelka. Preše, pnevmatski stiskalniki, črpalke, hladilni agregati in sistemi za kontrolirano fermentacijo skupaj predstavljajo visoko dinamično obremenitev, kjer se moč odjema v kratkem času večkratno spreminja. V času trgatve in predelave lahko konične obremenitve takšnih objektov dosega do 50 kW, medtem ko so dejansko priključne moči objektov v ruralnih in vinorodnih območjih pogosto omejene na vrednosti pod 20 kW.

Obravnavana vinarna v Vipavski dolini se srečuje prav s takšno situacijo. Priključna moč objekta na nizkonapetostnem distribucijskem omrežju Elektra Primorska znaša 17 kW, kar je posledica omejitvenega toka $3 \times 25 \text{ A}$ v obstoječi priključno-merilni omarici (Elektro Primorska, d.d., 2024). Ta vrednost zadošča splošni porabi, ne pa koničnim obremenitvam sodobnega tehnološkega procesa. Stroji, ki tvorijo proizvodno linijo vinarne, pri hkratnem obratovanju zahtevajo razpoložljivo moč do 50 kW, kar skoraj trikrat presega priključno moč objekta.

Klasična rešitev takšnega neskladja je povečanje priključne moči pri distribucijskem operaterju, ki bi zahtevalo menjavo priključnega voda, krepitev transformatorske postaje in izvedbo sistemskih posegov v distribucijsko omrežje. Na obravnavani lokaciji je bila takšna pot nesprejemljiva iz dveh razlogov. Prvi razlog je bil tehnične narave: transformatorska postaja TN0151 Šempas, iz katere se napaja objekt, je že obratovala blizu meje svoje zmogljivosti, zato bi njena krepitev zahtevala sistemski poseg, ki presega okvir posameznega uporabnika (Elektro Primorska, d.d., 2024). Drugi razlog je bil časovne in finančne narave: takšen poseg bi zahteval več let priprave in izvedbe ter znatna sredstva, uporabnik pa je potreboval tehnično delujočo rešitev pred začetkom naslednje predelovalne sezone.

Iz tega izhodišča smo problem definirali drugače. Namesto povečanja priključne moči smo se usmerili v povečanje razpoložljive moči objekta, to je moči, ki je v določenem trenutku dejansko na voljo porabnikom. Razlika med priključno in razpoložljivo močjo se lahko doseže z uvedbo lokalnega energetskega sistema, ki v času konic iz svojih virov prispeva dodatno moč, v obdobjih nizke obremenitve pa se pripravi za naslednjo konico. Takšen sistem je hibridna fotovoltaična elektrarna v kombinaciji z baterijskim hranilnikom in hibridnim razsmernikom, ki vse tokove energije usklajuje v realnem času.

Naloga obravnava konkretno izvedbo takšnega sistema. Na objektu je bila postavljena fotovoltaična proizvodna enota delovne moči 34 kWp, baterijski hranilnik s kapaciteto 102,4 kWh in trifazni hibridni razsmernik nazivne moči 50 kVA. Sistem omogoča, da objekt pri obratovanju presega priključno moč, dokler hranilnik razpolaga z dovolj energije, medtem ko odjem iz omrežja ostaja znotraj dovoljenih meja. Poleg tehnične zasnove naloga obravnava tudi ključne izzive, ki so se pojavili med izvedbo in zagonom sistema – zahteve distribucijskega operaterja po uporabi U-F releja za sisteme nad 30 kW, kompenzacijo jalove moči v skladu s $\cos \varphi = 0,95$, ter problematiko tolerance vgrajenih tokovnikov, ki je povzročala neustrezne meritve in izklapljanje obračunskega števca.

S predstavljenim pristopom problem omejene priključne moči ne predstavlja več razvojne ovire. Objekt lahko obratuje tehnološko nespremenjen, pri čemer hibridni sistem v realnem času prilagaja pretok energije med viri in porabniki. Opisan primer predstavlja tehnično utemeljeno alternativo klasični rešitvi in je primer dobre prakse za industrijske ter obrtne objekte, ki se soočajo s podobnimi omrežnimi omejitvami.

1.2 Cilji naloge

Osrednji cilj diplomske naloge je predstaviti in strokovno utemeljiti rešitev problema omejene priključne moči v konkretnem industrijskem okolju s pomočjo hibridnega fotovoltaičnega sistema. Naloga ni zasnovana kot splošna študija fotovoltaike, temveč kot strokovni prikaz primera, pri katerem se tehnične, zakonodajne in izvedbene zahteve povežejo v delujočo rešitev. V središču obravnave je dvig razpoložljive moči objekta na 50 kW, kljub temu da priključna moč iz distribucijskega omrežja znaša 17 kW.

Pri doseganju glavnega cilja sledimo naslednjim specifičnim ciljem:

Utemeljiti zasnovo hibridnega sistema – predstaviti, zakaj je bila kombinacija fotovoltaične proizvodnje, baterijskega hranilnika in hibridnega razsmernika izbrana kot tehnično, ekonomsko in časovno najustreznejša rešitev. Pri tem pojasniti vlogo posamezne komponente v celotnem sistemu ter prikazati, zakaj osrednjo vlogo pri reševanju problema razpoložljive moči prevzema hranilnik.

Prikazati proces projektiranja in izbire komponent – predstaviti postopek od idejne zasnove, izračuna potrebne moči in kapacitete hranilnika prek izbire ustreznega razsmernika in fotovoltaičnih modulov do priprave projektne dokumentacije v skladu s tehničnimi smernicami in zahtevami distribucijskega operaterja.

Analizirati skladnost sistema s predpisi in standardi – obravnavati zahteve iz soglasja za priključitev, ki ga je izdal distribucijski operater, določila standarda SIST EN 50549-1 za priklop proizvodnih naprav na nizkonapetostno omrežje, smernice SZPV 512 za

požarno varnost fotovoltaičnih sistemov, sistemska obratovalna navodila SONDSEE ter tehnične smernice TSG-N-002 in TSG-N-003. (Elektro Primorska, d.d., 2024).

Predstaviti praktično izvedbo in zagon sistema – opisati montažo komponent, izvedbo ločilnega mesta z U-F relejem DOLD RP9811 ter potek preizkusa zaščitnih naprav, ki je temelj za uradni priklop sistema na distribucijsko omrežje.

Obravnavati tehnične izzive, ki so se pojavili pri zagonu – podrobno analizirati težave, povezane z jalovo močjo in toleranco vgrajenih tokovnikov, ki so povzročale neustrezne meritve in izklapljanje obračunskega števca, ter predstaviti rešitev z vgradnjo zunanjega merilnika Smart Energy Meter in ustrezno nastavitvijo razsmernika.

Oceniti delovanje sistema v realnih pogojih – na podlagi meritev zaščitnih naprav, obratovalnih podatkov razsmernika in merilnika Smart Energy Meter preveriti, ali sistem dejansko dosega projektirano razpoložljivo moč, kako stabilno se odziva na konične obremenitve in v kakšni meri izpolnjuje zahteve distribucijskega operaterja.

Z dosegom navedenih ciljev naloga prispeva k razumevanju hibridnih sistemov kot tehnične rešitve za objekte, katerih priključna moč ne zadošča sodobnim tehnološkim procesom. Obravnavani primer predstavlja referenco, ki jo je mogoče prenesti na druge industrijske in obrtne objekte, zlasti na območjih s podobno strukturo distribucijskega omrežja in z visokimi koničnimi obremenitvami v krajših obdobjih leta.

1.3 Predstavitev okolja

Projekt je bil izveden v okviru podjetja Velog d.o.o. iz Ljubljane, ki deluje na področju energetskih rešitev, vključno z načrtovanjem in izvedbo fotovoltaičnih sistemov ter baterijskih hranilnikov električne energije. Naročnik oziroma končni uporabnik sistema je vinarna v Vipavski dolini, ki sodi med svetovno prepoznavne slovenske vinarje in svoja vina izvaža na zahtevne tuje trge.

Obravnavani objekt obsega vinsko klet s tehnološkimi procesi predelave grozdja in zorenja vina. Sodobni vinarski postopki vključujejo vrsto energetsko zahtevnih naprav, med katerimi so preše, pnevmatski stiskalniki, hladilni agregati, črpalke in sistemi za kontrolirano fermentacijo. Ti porabniki delujejo predvsem v sezonskih obdobjih trgatve in predelave, ko se konične obremenitve objekta močno dvignejo in pogosto presegajo povprečno porabo za več kot trikrat.

Lokacija v Vipavski dolini ima posebne geografske in klimatske značilnosti. Dolina sodi med slovenske regije z najvišjo letno osončenostjo in podpovprečno oblačnostjo, kar ustvarja ugodne pogoje za izrabo sončne energije iz fotovoltaičnih sistemov. Submediteranska klima z dolgimi sončnimi jesenmi in relativno milimi zimami

pozitivno vpliva na letno proizvodnjo modulov. Hkrati regijo zaznamuje močan vpliv burje, ki narekuje ojačano vpetje modulov in nosilne konstrukcije, kar smo pri zasnovi sistema upoštevali z izbiro trojnega pritrdilnega sistema.

Geografska razpršenost poselitve in hribovita konfiguracija terena se odražata v strukturi lokalnega distribucijskega omrežja, katerega transformatorske postaje so pogosto dimenzionirane za manjši obseg odjema. Obravnavani objekt je priključen na nizkonapetostno omrežje distribucijskega operaterja Elektro Primorska d. d. Priklop se izvaja preko transformatorske postaje TN0151 Šempas, ki jo napaja srednenapetostni izvod JA18 Ajdovščina iz razdelilne transformatorske postaje RTP Gorica 110/20/10 kV. Kratkostična moč tripolnega kratkega stika na 20 kV ravni znaša 350 MVA, impedanca omrežja na priključnem mestu pa 0,33 Ω . Priključek je trifazni, nazivne napetosti 0,4 kV, izveden preko obstoječe priključno-merilne omarice na fasadi objekta, z jakostjo omejevalca toka $1 \times 3 \times 25$ A, kar ustreza priključni moči 17 kW pri lastnem odjemu. (Elektro Primorska, d.d., 2024).

Sistem samooskrbe je bil zasnovan po tipski priključni shemi PS.3A in obsega proizvodno napravo na sončno energijo z delovno močjo fotovoltaičnih modulov 34 kWp ter baterijski hranilnik z nazivno kapaciteto 102,4 kWh. Način obratovanja proizvodne naprave je mešani, kar pomeni paralelno z distribucijskim sistemom za lastne potrebe in oddajo presežkov v omrežje. Hranilnik obratuje v porabniškem režimu, torej paralelno z distribucijskim sistemom izključno za lastne potrebe objekta. Distribucijski operater je v soglasju za priključitev številka 1457986 z dne 19. 2. 2024 določil zahtevo po kompenzaciji jalove energije na $\cos \varphi = 0,95$ ter izvedbi razsmerniške zaščite tipa Uf-A na ločilnem mestu, tako za proizvodno enoto kot za baterijski hranilnik. (Elektro Primorska, d.d., 2024).

1.4 Predpostavke in omejitve

Pri obravnavi projekta smo izhajali iz niza predpostavk, ki določajo okvir raziskave, in omejitev, ki vplivajo na obseg ter posplošljivost ugotovitev. Njihovo preverjanje je del zaključnega poglavja.

1.4.1 Predpostavke

Tehnični podatki iz soglasja za priključitev številka 1457986 (Elektro Primorska, d.d., 2024) in podatki iz tehničnih listov proizvajalcev vgrajene opreme predstavljajo verodostojno osnovo za tehnično analizo sistema.

Baterijska tehnologija LiFePO_4 je za obravnavani primer ustrezna izbira zaradi visoke varnosti, dolge življenjske dobe in sposobnosti hitrega praznjenja, kar so lastnosti, ki jih zahtevajo konične obremenitve tehnoloških naprav vinarne. (Velog, b.d.)

Hibridni sistem z ustrezno konfiguracijo, ki jo sestavljajo fotovoltaični moduli delovne moči 34 kWp, trifazni hibridni razsmernik nazivne moči 50 kVA in baterijski hranilnik z nazivno kapaciteto 102,4 kWh, omogoča kratkotrajno razpoložljivo moč do 50 kW in s tem nadomešča pomanjkanje omrežnih virov v času koničnih obremenitev kljub priključni moči 17 kW.

Meritve zaščitnih naprav, izvedene z merilnim inštrumentom Omicron CMC 256-6 (Pooblaščen merilec, 2024) ter odčitki Smart Energy Metra in razsmernika so dovolj natančni za oceno skladnosti sistema z zahtevami distribucijskega operaterja, vključno z zahtevo po kompenzaciji jalove moči na $\cos \varphi = 0,95$.

Ločilno mesto z U-F relejem DOLD RP9811 v kombinaciji s kontaktorjem Schneider LC1 D95 izpolnjuje zahteve sheme Uf-A iz sistemskih obratovalnih navodil SONDSEE za proizvodne naprave nad 30 kW.

1.4.2 Omejitve

Raziskava temelji na enem konkretnem projektu, zato rezultatov ni mogoče neposredno prenašati na druge objekte z drugačno strukturo odjema, drugačnimi tehnološkimi procesi ali drugačnimi omrežnimi razmerami.

Obravnavana vinarna pred postavitvijo hibridnega sistema ni razpolagala z urno ali mesečno evidenco porabe električne energije, zato naloga ne vključuje klasične primerjalne analize porabe v obdobju pred in po izvedbi projekta. Vrednotenje učinkov sistema se zato opira izključno na obratovalne meritve in odčitke, ki so na voljo po zagonu.

Zaradi varovanja poslovnih interesov naročnika so podatki o identiteti uporabnika, natančni lokaciji in finančni konstrukciji projekta anonimizirani oziroma predstavljeni le v obsegu, ki je nujen za strokovno razpravo.

Dostop do nekaterih internih parametrov in algoritmov proizvajalca, zlasti regulacijskih krivulj $Q(U)$ in $Q(P)$ razsmernika Deye ter notranjih algoritmov sistema za upravljanje baterije, je omejen, zato se analiza opira na javno dostopne tehnične specifikacije in izkušnje iz zagona.

Obdobje zbiranja obratovalnih podatkov po zagonu je kratko v primerjavi s pričakovano življenjsko dobo sistema, zato so dolgoročni sklepi o degradaciji modulov, staranju baterijskega hranilnika in finančnih učinkih podani z ustrezno previdnostjo.

Naloga ne obravnava vplivov sistema na širše distribucijsko omrežje, kot so napetostni profil na srednjenapetostnem izvodu JA18 Ajdovščina in vpliv na druge

odjemalce iz transformatorske postaje TN0151 Šempas, saj bi to zahtevalo dostop do obratovalnih podatkov distribucijskega operaterja, ki presegajo obseg diplomske naloge.

Navedene predpostavke so nujne za smiselno obravnavo konkretnega primera, omejitve pa določajo, v kakšnem obsegu so ugotovitve naloge prenosljive na druga okolja. V zaključnem poglavju preverimo, v kolikšni meri so se predpostavke izkazale za pravilne in kako so omejitve vplivale na rezultate.

1.5 Metode dela

V diplomski nalogi smo uporabili kombinacijo opisne, analitične in empirične metode, povezane v študijo primera konkretnega projekta. Izbrane metode omogočajo, da se teoretična izhodišča povežejo z neposredno projektno in obratovalno prakso, kar ustreza namenu naloge.

Opisna metoda je uporabljena v teoretičnem delu, kjer so predstavljeni temeljni pojmi priključne in razpoložljive moči, sestavni deli hibridnega fotovoltaičnega sistema, način delovanja baterijskega hranilnika in vloga hibridnega razsmernika pri usklajevanju pretoka moči med viri in porabniki. V tem okviru smo opisali tudi koncept rezanja koničnih obremenitev (ang. *peak shaving*) kot tehniko, ki je v jedru obravnavane rešitve, ter zahteve za priklop proizvodnih naprav na nizkonapetostno omrežje.

Analitična metoda je uporabljena pri razčlenitvi projektne dokumentacije in izvedbenih podlag sistema. Vključuje pregled soglasja za priključitev (Elektro Primorska, d.d., 2024), enopolne sheme in projektne dokumentacije izvedenih del (Velog d. o. o., 2024), merilnega poročila o pregledu in preizkusu ločilnega mesta (Pooblaščen merilec, 2024) ter tehničnih listov proizvajalcev vgrajene opreme – fotovoltaičnih modulov Hyundai HiE-S425HG(FB), trifaznega hibridnega razsmernika Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4, baterijskih modulov Deye BOS-G Pro in modulskih optimizatorjev Tigo TS4-A-O (Hyundai Energy Solutions, 2022; Deye, 2023; Deye, 2024b; Tigo, 2023). Na podlagi teh podatkov smo analizirali dimenzioniranje sistema, razmerja med močjo proizvodne enote, močjo razsmernika in kapaciteto hranilnika ter skladnost zasnove s tehničnimi zahtevami distribucijskega operaterja.

Empirična metoda temelji na rezultatih meritev, izvedenih v okviru zagona sistema. Sem sodijo meritve pragov proženja in izklopnih časov U-F releja DOLD RP9811 (DOLD, 2023a), ki so bile izvedene z merilnim inštrumentom Omicron CMC 256-6 (Pooblaščen merilec, 2024) v okviru pregleda ločilnega mesta, ter obratovalni podatki sistema, pridobljeni prek Smart Energy Metra in komunikacijskega vmesnika razsmernika. Empirično pridobljeni podatki so podlaga za preverjanje, ali sistem v

realnih obratovalnih razmerah izpolnjuje projektirane parametre, zlasti glede stabilnosti pretoka moči, kompenzacije jalove moči in zaščitnih funkcij.

Študija primera je nosilna metoda celotnega praktičnega dela. Obravnavani sistem ni splošna zasnova, temveč konkretna izvedba v vinarni v Vipavski dolini, pri kateri se specifične omejitve priključka in energetske zahteve proizvodnega procesa združujejo v enkraten problem, za katerega smo razvili posebno tehnično rešitev. Študija primera omogoča poglobljeno obravnavo posameznih faz projekta – od idejne zasnove, izbire komponent in izdelave enopolne sheme v programskem okolju Schrack Design, do montaže, zagona, obratovanja in odprave težav, ki so se pojavile pri izvedbi.

Pri pregledu zakonodajnega okvira smo upoštevali Energetski zakon (Energetski zakon (EZ-1), 2014), Zakon o oskrbi z električno energijo (Zakon o oskrbi z električno energijo (ZOEE), 2021), Zakon o spodbujanju rabe obnovljivih virov energije (Zakon o spodbujanju rabe obnovljivih virov energije (ZSROVE), 2021), Uredbo o samooskrbi z električno energijo iz obnovljivih virov energije (Uredba o samooskrbi z električno energijo iz obnovljivih virov energije, 2022), sistemska obratovalna navodila za distribucijski sistem električne energije SONDSEE (SODO, 2021) ter standard SIST EN 50549-1 za zahteve glede priklopa proizvodnih naprav na nizkonapetostno distribucijsko omrežje (SIST, 2019). Posebej smo analizirali zahteve smernic SZPV 512 za požarno varnost fotovoltaičnih sistemov (Slovensko združenje za požarno varstvo, 2016), ter tehničnih smernic TSG-N-002 za nizkonapetostne električne inštalacije (TSG-N-002:2021, 2021) in TSG-N-003 zaščito pred delovanjem strele (TSG-N-003:2021, 2021).

Kombinacija opisne, analitične in empirične metode v okviru študije primera omogoča, da naloga ne ostane na ravni splošnega opisa, temveč gradi na projektnih dokumentih, tehničnih specifikacijah, izmerjenih vrednostih in praktičnih izkušnjah iz zagona sistema. Takšen pristop zagotavlja, da so sklepi v zaključnem poglavju utemeljeni in preverljivi.

2 TEORETIČNE OSNOVE

2.1 Priključna moč in razpoložljiva moč

Priključna moč je osnovni tehnični parameter vsakega odjemnega mesta v elektrodistribucijskem sistemu. Določena je z nazivno jakostjo omejevalca toka v priključno-merilni omarici in predstavlja največjo trajno moč, ki jo lahko odjemalec prevzema iz distribucijskega omrežja brez proženja omejitvene zaščite. F

Pri trifaznem priključku se izračuna po izrazu:

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \phi,$$

kjer P pomeni priključno moč v vatih, U medfazno napetost, I nazivno jakost omejevalca toka in $\cos \phi$ faktor moči. Pri standardni medfazni napetosti 400 V in priključku z omejevalcem toka 3×25 A znaša teoretična priključna moč 17,3 kW pri $\cos \phi = 1$, oziroma nekoliko manj pri realnih industrijskih bremenih z izrazito induktivno komponento (Bastian, 2013).

Priključna moč ni enaka razpoložljivi moči, ki je dejansko na voljo porabnikom v objektu. V klasični konfiguraciji, kjer objekt nima lastne proizvodne enote ali hranilnika električne energije, sta obe vrednosti enaki, saj vsa energija prihaja neposredno iz omrežja. Ko objekt pridobi lokalno proizvodnjo ali hranilnik, se razpoložljiva moč razlikuje od priključne – kratkotrajno lahko doseže seštevek moči iz omrežja in moči, ki jo prispeva lokalni sistem.

Ta razlika je ključna za reševanje problema, ki ga obravnava pričujoča naloga. V obravnavanem primeru je priključna moč omejena na 17 kW, medtem ko konične zahteve vinarske tehnologije dosegajo do 50 kW. Brez lokalnega energetskega sistema takšnih obremenitev ni mogoče zagotoviti, saj bi vsako kratkotrajno preseganje nazivne jakosti omejevalca toka povzročilo izklop zaščite. Tehnična naloga je torej jasno opredeljena: razpoložljivo moč objekta je treba dvigniti na raven, ki zadošča proizvodnemu procesu, ne da bi se pri tem povečala priključna moč.

Klasični pristop k reševanju takšnih primerov je povečanje priključne moči, ki zahteva poseg v distribucijsko infrastrukturo – menjavo kabla priključnega voda, morebitno krepitev transformatorske postaje ali celo gradnjo novega srednjenapetostnega izvoda. V primerih, ko je lokalno omrežje že na meji svoje zmogljivosti, je takšna pot dolgotrajna, administrativno zahtevna in finančno obremenjujoča. Prav v takšnih okoliščinah postane hibridni sistem s sončno elektrarno in baterijskim hranilnikom električne energije tehnično, ekonomsko in časovno smiselna alternativa, ki problem reši brez posegov v distribucijsko omrežje.

Pri tem je pomembno razlikovati med trajnim in kratkotrajnim povečanjem razpoložljive moči. Hibridni sistem omogoča kratkotrajno preseganje priključne moči toliko časa, dokler ima hranilnik na voljo dovolj energije in dokler fotovoltaična proizvodnja zagotavlja dotok energije za sprotno polnjenje. Trajna povprečna razpoložljiva moč objekta se s tem ne spremeni. Sistem zagotavlja le, da se lahko konične obremenitve, ki so po naravi kratkotrajne, izvedejo brez prekoračitve omrežnih zmogljivosti. Pri pravilnem dimenzioniranju hranilnika in časovni razporeditvi koničnih obratovalnih ciklov je takšen pristop tehnično zanesljiv in ekonomsko upravičen.

2.2 Sestava in delovanje hibridne sončne elektrarne

Hibridna sončna elektrarna (Slika 1) je energetski sistem, ki združuje proizvodnjo električne energije iz sončnega sevanja s shranjevanjem in regulacijo te energije znotraj enega tehnično povezanega sklopa. Za razliko od običajne omrežne sončne elektrarne, ki proizvedeno energijo neposredno oddaja v distribucijsko omrežje ali pokriva trenutno porabo objekta, hibridna sončna elektrarna omogoča tudi shranjevanje energije za poznejšo uporabo in njeno usklajeno distribucijo med različnimi viri in porabniki. Sistem je zasnovan tako, da lahko deluje paralelno z distribucijskim omrežjem in po potrebi tudi otočno, kar pomeni neodvisno delovanje od omrežja v primeru njegovega izpada. (Inženirska zbornica Slovenije, 2021).

Sestavni deli hibridne sončne elektrarne so štirje funkcionalni sklopi. Prvi sklop tvorijo fotovoltaični moduli, ki sončno sevanje pretvarjajo v enosmerno električno energijo. Drugi sklop je baterijski hranilnik električne energije, ki shranjuje viške proizvedene energije in jo sprošča v času, ko porabniki potrebujejo več moči, kot je trenutno na voljo iz omrežja in fotovoltaične proizvodnje. Tretji sklop je hibridni razsmernik, ki povezuje vse vire in porabnike ter v realnem času usklajuje pretok moči med njimi. Četrty sklop je sistem za merjenje in nadzor, ki razsmerniku zagotavlja informacijo o trenutnem stanju odjema na priključnem mestu in omogoča sprotno prilagajanje delovanja. (Inženirska zbornica Slovenije, 2021).

Delovanje hibridne sončne elektrarne temelji na sprotnem usklajevanju štirih energijskih tokov: proizvodnje iz fotovoltaičnih modulov, odjema iz omrežja, polnjenja

oziroma praznjenja hranilnika in porabe znotraj objekta. Hibridni razsmernik na podlagi prednostnih nastavitev, ki jih določi uporabnik ali projektant, sprejema odločitve o tem, kateri vir energije bo v določenem trenutku napajal porabnike. Standardni vrstni red prednosti pri delovanju, usmerjenem v lastno porabo, je naslednji: najprej se uporabi fotovoltaična proizvodnja za neposredno pokrivanje porabe, viški energije se usmerjajo v polnjenje hranilnika, nato se morebitni dodatni viški oddajo v omrežje. Ko porabniki potrebujejo več moči, kot je proizvodnja iz fotovoltaike, razsmernik dodatno energijo najprej črpa iz hranilnika in šele nato iz omrežja.

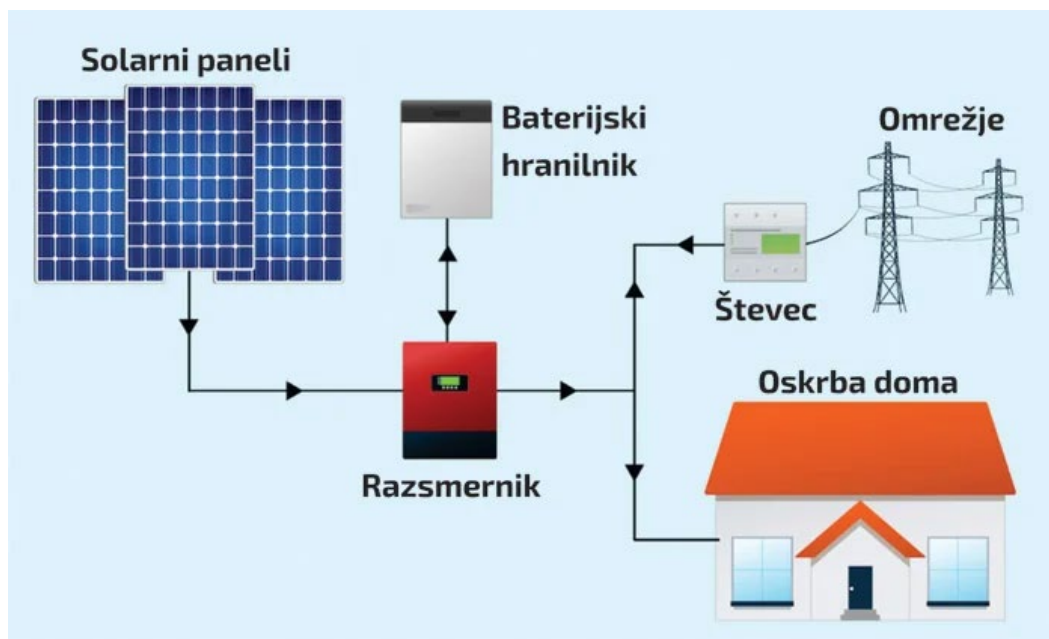
Osrednja tehnika, s katero hibridna sončna elektrarna z baterijskim hranilnikom rešuje problem omejene priključne moči, se imenuje rezanje koničnih obremenitev oziroma peak shaving. Načelo je preprosto: ko trenutna poraba objekta preseže vnaprej določeno mejo, hibridni razsmernik dodatno potrebno moč prevzame iz hranilnika namesto iz omrežja. Odjem iz omrežja tako nikoli ne preseže priključne moči, čeprav dejanska obremenitev objekta lahko občutno presega to vrednost. Hranilnik se v obdobjih nizke obremenitve ponovno napolni, bodisi iz fotovoltaične proizvodnje bodisi iz omrežja v okviru priključne moči, in je tako pripravljen za naslednjo konično obremenitev.

Za pravilno delovanje peak shavinga morata biti moč in kapaciteta hranilnika ustrezno dimenzionirani glede na značilnosti obremenitvenega profila objekta. Moč hranilnika mora pokriti največjo pričakovano razliko med konično obremenitvijo in priključno močjo, kapaciteta pa mora biti dovolj velika, da pokrije skupno trajanje koničnih obdobj med dvema obdobjema polnjenja. Pri premajhni moči hranilnika peak shaving ne deluje učinkovito, saj sistem ne zmore pokriti razlike. Pri premajhni kapaciteti se hranilnik prehitro izprazni in objekt se vrne na omejitev priključne moči pred koncem koničnega obratovanja.

Fotovoltaična proizvodnja v takšnem sistemu nima osrednje vloge pri reševanju problema razpoložljive moči, saj je njena moč odvisna od trenutnega sončnega sevanja in zato časovno spremenljiva. Njena glavna vloga je zmanjšanje neto porabe iz omrežja v sončnih urah ter polnjenje hranilnika, da je ta pripravljen za pokrivanje konic v obdobjih, ko fotovoltaična proizvodnja ni zadostna ali je sploh ni. V kombinaciji z letnim obračunom presežkov fotovoltaike prispeva tudi k znižanju skupnih stroškov električne energije, medtem ko peak shaving v glavnem zagotavlja hranilnik. Ta funkcijska delitev je pomembna, saj določa, kako se dimenzionirajo posamezne komponente sistema in kakšen je njihov medsebojni odnos.

Hibridna sončna elektrarna lahko poleg paralelnega obratovanja z omrežjem deluje tudi v otočnem režimu. V tem režimu se sistem ob izpadu omrežja avtomatsko loči od distribucijskega sistema in nadaljuje napajanje rezerviranih bremen iz hranilnika in fotovoltaične proizvodnje. Otočno obratovanje zahteva poseben izhod razsmernika,

imenovan EPS (angl. Emergency Power Supply), in ustrezno ločitev rezerviranih bremen od ostalega odjema. V obravnavanem primeru otočno obratovanje ni bilo predvideno kot osnovna funkcija sistema, je pa kot tehnična zmožnost razsmernika na voljo za morebitno kasnejšo nadgradnjo.



Slika 1: Hibridna sončna elektrarna – prikaz delovanja
(Vir: Bravc, 2023)

2.3 Hibridni razsmernik

Hibridni razsmernik (Slika 2) je osrednja krmilna naprava hibridne sončne elektrarne. Njegova naloga je pretvorba enosmernega toka v izmenični tok in obratno ter sočasno usklajevanje pretoka moči med fotovoltaičnimi moduli, baterijskim hranilnikom, distribucijskim omrežjem in porabniki. Za razliko od običajnega omrežnega razsmernika, ki opravlja le pretvorbo enosmernega toka iz fotovoltaičnih modulov v izmenični tok za omrežje, hibridni razsmernik združuje več funkcij – pretvorbo, regulacijo, krmiljenje in zaščito – v eni napravi.

Sestavljen je iz dveh glavnih pretvorniških sklopov in skupne krmilne enote. Prvi sklop je fotovoltaični pretvornik DC/DC, ki prilagaja napetost iz fotovoltaičnih modulov in z algoritmom sledenja točki maksimalne moči (MPPT, angl. Maximum Power Point Tracking) zagotavlja, da moduli vedno obratujejo v točki, kjer je njihova oddana moč največja glede na trenutne pogoje sevanja in temperature. Sodobni hibridni razsmerniki srednje moči imajo več neodvisnih MPPT vhodov, kar omogoča, da se različno usmerjeni nizi modulov lahko priključijo na isti razsmernik brez medsebojnega vpliva.

Drugi sklop je dvosmerni baterijski pretvornik DC/DC, ki uravnava napetostno raven med baterijskim hranilnikom in skupnim enosmernim zbiralnim vodilom razsmernika ter omogoča tako polnjenje kot praznjenje hranilnika. Skupno enosmerno zbiralno vodilo nato napaja inverterski sklop DC/AC, ki proizvaja trifazni izmenični tok, sinhroniziran z napetostjo in frekvenco distribucijskega omrežja.

Krmilna enota razsmernika neprekinjeno spremlja stanje vseh priključenih virov in porabnikov ter na podlagi vnaprej določene strategije obratovanja sprejema odločitve o pretoku moči. Pri delovanju, usmerjenem v lastno porabo, krmilnik primerja trenutno proizvodnjo iz fotovoltaičnih modulov s trenutno porabo objekta. Razlika med njima določa, kam bo razsmernik usmeril energijo: če je proizvodnja večja od porabe, se viški usmerjajo v hranilnik in nato po potrebi v omrežje; če je poraba večja od proizvodnje, razsmernik dodatno potrebno moč prevzema najprej iz hranilnika in šele nato iz omrežja. Krmilnik pri tem upošteva tudi parametre, kot so stanje napolnjenosti baterije, omejitve toka razsmernika, dovoljena moč pri oddaji v omrežje in zahteve po kompenzaciji jalove moči.

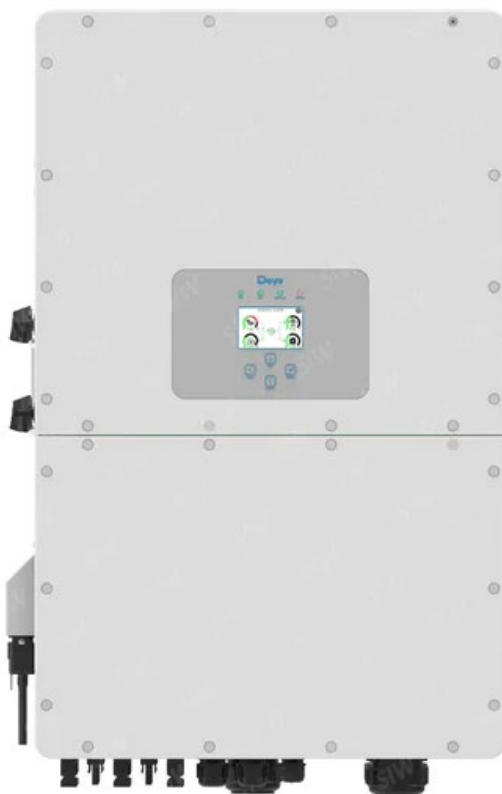
Pri sistemih, ki rešujejo problem omejene priključne moči s peak shavingom, ima krmilnik še eno specifično vlogo. Na podlagi podatkov iz Smart Energy Metra, ki je vgrajen na priključnem mestu, neprekinjeno meri trenutni odjem iz omrežja in primerja izmerjeno vrednost s prednastavljeno mejo, ki ne sme biti presežena. Ko se odjem iz omrežja približa tej meji, krmilnik samodejno aktivira hranilnik in razliko med dejansko porabo in dovoljenim odjemom pokrije iz baterije. Reakcijski čas takšnega regulacijskega procesa je krajši od ene sekunde, kar je ključno za pravilno delovanje sistema pri industrijskih bremenih z naglimi spremembami obremenitve.

Hibridni razsmernik mora pri obratovanju izpolnjevati zahteve standarda SIST EN 50549-1, ki ureja priključitev proizvodnih naprav na nizkonapetostno distribucijsko omrežje. Med temi zahtevami so omejitve glede kompenzacije jalove moči, dovoljene tolerance frekvence in napetosti, sposobnost zagotavljanja podpore omrežju ob motnjah ter avtomatska ločitev od omrežja v primeru napake. Sodobni hibridni razsmerniki podpirajo tudi krivulji $Q(U)$ in $Q(P)$, s katerima lahko prilagajajo svoj izhod glede jalove moči v odvisnosti od napetosti oziroma delovne moči, kar prispeva k stabilnosti distribucijskega omrežja v območjih z visokim deležem decentralizirane proizvodnje (SIST, 2019).

Pomemben tehnični vidik hibridnih razsmernikov je tudi razlika med nazivno navidezno močjo, izraženo v kVA, in delovno močjo, izraženo v kW. Nazivna navidezna moč razsmernika določa največjo moč, ki jo naprava lahko pretvarja, ne glede na faktor moči porabnika ali zahteve omrežja po kompenzaciji jalove moči. Delovna moč, ki je dejansko na voljo porabnikom v obliki uporabne energije, je manjša od nazivne navidezne moči za faktor $\cos \varphi$. Pri faktorju moči 1 sta obe vrednosti enaki, pri faktorju moči 0,95 pa je delovna moč 95 odstotkov nazivne navidezne moči. To

razlikovanje je pomembno pri dimenzioniranju sistema in ocenjevanju, kolikšno koristno moč razsmernik lahko zagotovi pri zahtevanih obratovalnih pogojih distribucijskega operaterja.

Razsmerniki, namenjeni hibridnim sistemom srednje moči, imajo praviloma tudi izhod za otočno obratovanje, znan kot EPS izhod (angl. Emergency Power Supply). V primeru izpada distribucijskega omrežja razsmernik samodejno preide v otočni režim in iz hranilnika ter fotovoltaične proizvodnje napaja rezervirana bremena, ki so na ta izhod priključena. Po vrnitvi omrežja se razsmernik s preverjanjem napetosti in frekvence ponovno sinhronizira in vrne v paralelno obratovanje. Ta funkcionalnost povečuje zanesljivost napajanja kritičnih porabnikov in razširja področje uporabe hibridnih sistemov tudi na objekte, ki zahtevajo neprekinjeno napajanje.



Slika 2: Hibridni razsmernik Deye
(Vir: Deye inverter, 2024)

2.4 Baterijski hranilniki električne energije LiFePO_4

Baterijski hranilnik električne energije (Slika 3) je naprava, ki omogoča shranjevanje električne energije v elektrokemičnih celicah in njeno poznejše sproščanje v sistem, ko se za to pojavi potreba. V kontekstu hibridnih sončnih elektrarn hranilnik povezuje časovno spremenljivo proizvodnjo iz fotovoltaičnih modulov z dejansko porabo objekta in omogoča energetska neodvisnost od trenutnih razmer v distribucijskem omrežju. Hkrati je hranilnik tehnični nosilec funkcije peak shavinga, ki je v jedru obravnavane rešitve.

V sodobnih gospodinskih in poslovnih hibridnih sistemih se uveljavlja tehnologija litij-železo-fosfatnih akumulatorjev z elektrokemično formulo LiFePO_4 . Imenuje se po pozitivni elektrodi, ki je narejena iz litijevega železovega fosfata, medtem ko je negativna elektroda iz grafita. Ta tehnologija predstavlja eno od najuspešnejših različic litij-ionskih baterij in se je v zadnjem desetletju uveljavila kot standard za stacionarne hranilnike električne energije v industrijskih, poslovnih in stanovanjskih objektih.

Glavna prednost LiFePO_4 tehnologije je njena izjemno visoka termična stabilnost. Kemijska struktura litijevega železovega fosfata je odporna na pojav termičnega pobega (angl. *thermal runaway*) – verižne reakcije, pri kateri se notranja temperatura baterije zaradi okvare ali poškodbe nekontrolirano dvigne in lahko privede do požara ali eksplozije. Pri klasičnih litij-ionskih baterijah z nikljevimi ali kobaltnimi elektrodami je tveganje termičnega pobega znatno višje, medtem ko LiFePO_4 celice tudi pri mehanskih poškodbah, prekomernem polnjenju ali kratkem stiku ne razvijejo eksotermne reakcije, ki bi vodila v vžig. Ta lastnost je posebej pomembna pri velikih stacionarnih hranilnikih, kjer je v isti omari shranjenih več deset kilovatnih ur energije.

Druga pomembna lastnost LiFePO_4 baterij je dolga življenjska doba, izražena v številu polnilno-praznilnih ciklov. Sodobne celice te tehnologije zagotavljajo več kot 6000 polnih ciklov ob ohranjeni vsaj 70-odstotni začetni kapaciteti, kar pri vsakodnevnem polnjenju in praznjenju ustreza življenjski dobi, daljši od petnajst let. Tretja prednost je sposobnost hitrega praznjenja brez pretirane obrabe celic. Pri obravnavani rešitvi je ta lastnost ključna, saj morajo baterije pri konicah vinarskega procesa kratkotrajno oddati moč, ki znatno presega njihovo trajno nazivno moč, ne da bi se to bistveno odražalo na njihovi življenjski dobi.

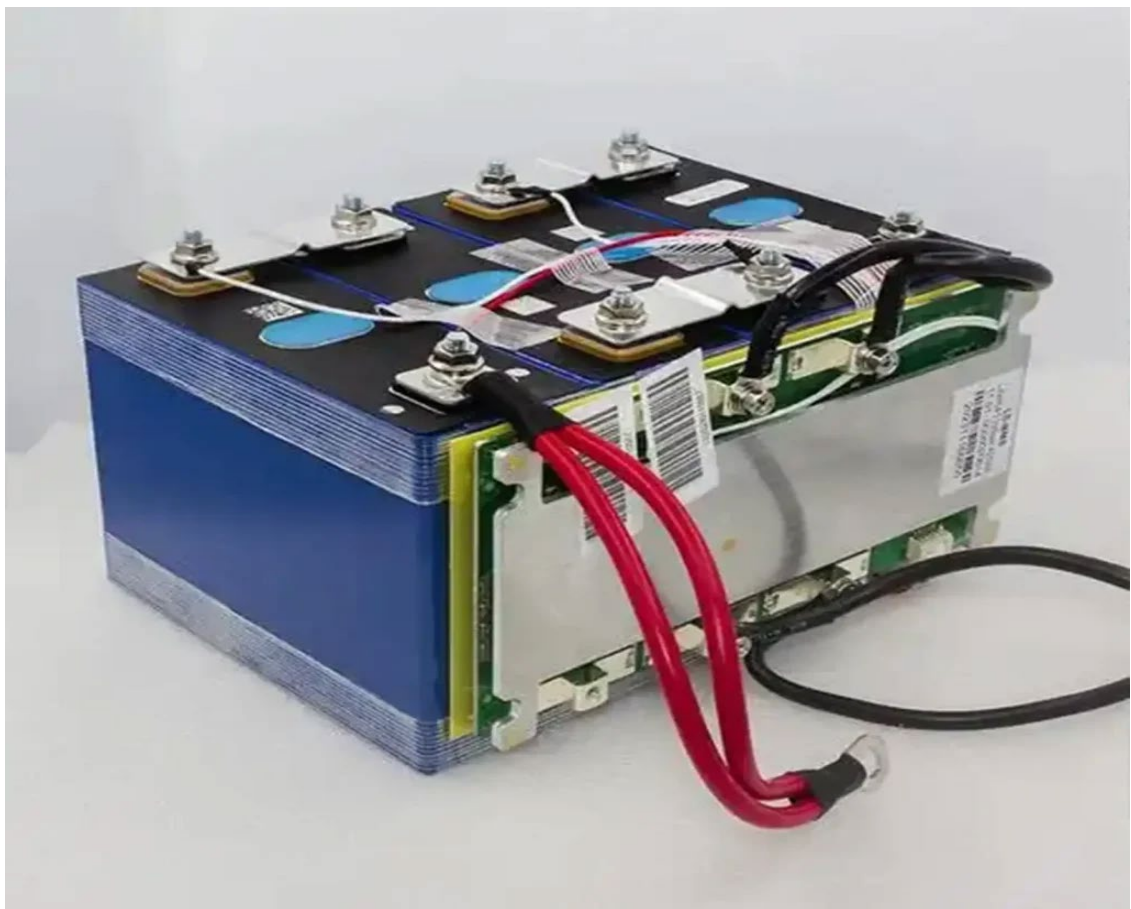
Stacionarni baterijski hranilnik je sestavljen iz več gradnikov. Osnovni element je posamezna celica nazivne napetosti približno 3,2 V, ki predstavlja najmanjšo elektrokemično enoto. Več celic, vezanih zaporedno in vzporedno, sestavlja baterijski modul, ki je samostojna enota z nazivno napetostjo običajno 51,2 V in z lastnim sistemom za upravljanje baterije (BMS, angl. Battery Management System). Več modulov, povezanih zaporedno, tvori baterijski stok ali baterijsko polje. Sistemska

napetost stolpa je odvisna od števila modulov in se v industrijskih sistemih giblje med 200 V in 800 V DC. Več baterijskih stokov se lahko poveže paralelno, kar poveča skupno kapaciteto in moč hranilnika.

Sistem za upravljanje baterije BMS je integralni del vsakega sodobnega baterijskega hranilnika. Njegova naloga je neprekinjeno spremljanje stanja vsake celice in vsakega modula – napetosti, toka, temperature in stanja napolnjenosti (SOC, angl. State of Charge). BMS izenačuje napetosti med posameznimi celicami, ščiti baterijo pred prenapolnjenostjo, prekomernim praznjenjem, prekomernim tokom in pregrevanjem ter komunicira z razsmernikom prek vodila CAN ali RS485. Razsmernik na podlagi podatkov iz BMS prilagaja moč polnjenja in praznjenja, kar zagotavlja varno in optimalno obratovanje hranilnika v celotni življenjski dobi.

Pri dimenzioniranju baterijskega hranilnika za peak shaving sta osrednja parametra nazivna kapaciteta in nazivna moč. Nazivna kapaciteta, izražena v kilovatnih urah (kWh), določa skupno količino energije, ki jo baterija lahko shrani. Uporabna kapaciteta je vedno manjša od nazivne, saj proizvajalec za zagotavljanje dolge življenjske dobe priporoča omejitve globine praznjenja (DOD, angl. Depth of Discharge) na okoli 90 odstotkov. Nazivna moč, izražena v kilovatih (kW), določa, kako hitro lahko baterija oddaja ali sprejema energijo. Hranilnik za peak shaving mora zagotavljati zadostno nazivno moč za pokrivanje razlike med konično obremenitvijo in priključno močjo, hkrati pa zadostno kapaciteto, da pokrije skupno trajanje koničnih obdobj med dvema obdobjema polnjenja.

Pri praktični izvedbi je pomembno tudi fizično okolje, v katerem hranilnik deluje. LiFePO₄ baterije najboljše delujejo v temperaturnem območju med 0 in 35 stopinjami Celzija, kjer je njihova življenjska doba najdaljša in učinkovitost najvišja. Pri nižjih temperaturah se zmanjša razpoložljiva moč, pri višjih pa se pospeši staranje celic. V industrijskih namestitvah se zato hranilniki namestijo v prostore z nadzorovano temperaturo, ali pa so opremljeni z lastnimi hladilnimi in ogrevalnimi sistemi, ki vzdržujejo optimalne pogoje.



Slika 3: LiFePO₄ baterija
(Vir: Ayaatech, 2025)

2.5 Jalova moč in zahteve omrežja (SIST EN 50549-1)

V električnih sistemih z izmeničnim tokom razlikujemo med tremi vrstami moči, ki skupaj opisujejo pretok energije med virom in porabnikom. Delovna moč P , izražena v vatih (W), je tista komponenta, ki se pretvarja v koristno delo – mehansko gibanje motorjev, segrevanje grelcev, svetlobo svetil in podobne uporabne učinke. Jalova moč Q , izražena v voltamperih reaktivnih (VAR), pa ne opravlja koristnega dela, temveč se izmenjuje med virom in porabnikom kot posledica magnetnih in električnih polj v induktivnih ali kapacitivnih bremenih. Skupna moč obeh komponent se imenuje navidezna moč S , izražena v voltamperih (VA), in je vektorska vsota delovne in jalove moči. (Bastian, 2013).

Razmerje med delovno in navidezno močjo se imenuje faktor moči in se običajno označuje s $\cos \varphi$. Pri faktorju moči 1 je vsa pretvarjana energija delovna, pri vrednostih pod 1 pa del energije nastopa kot jalova in povzroča dodatne tokovne obremenitve omrežja, ne da bi prispeval h koristnemu delu. Distribucijsko omrežje

mora to dodatno tokovno obremenitev prenašati, kar povzroča nepotrebne izgube v vodnikih, povečuje obremenitev transformatorjev in lahko vpliva na napetostne razmere v omrežju. Zato distribucijski operaterji omejujejo dovoljeno jalovo moč pri odjemu in proizvodnih napravah, kar je določeno v sistemskih obratovalnih navodilih SONDSEE in v soglasju za priključitev posameznega objekta. (SODO, 2021)

V industrijskih objektih z velikim deležem induktivnih bremen, kot so motorji preš, hladilni kompresorji in črpalke, se faktor moči brez kompenzacije giblje med 0,7 in 0,85. Distribucijski operater Elektro Primorska je v soglasju za priključitev za obravnavani objekt zahteval kompenzacijo jalove energije na $\cos \varphi = 0,95$, kar pomeni, da povprečni faktor moči pri odjemu iz omrežja v obračunskem obdobju ne sme biti slabši od te vrednosti (Elektro Primorska, d.d., 2024). Pri presežku jalove energije nad to mejo distribucijski operater odjemalcu zaračuna dodatno postavko za prevzeto jalovo energijo.

V hibridnih sistemih s sodobnim razsmernikom se kompenzacija jalove moči lahko izvaja brez ločenih kondenzatorskih baterij, saj razsmernik sam zna proizvajati ali kompenzirati jalovo moč v določenem razponu. Razsmernik Deye, ki je vgrajen v obravnavani sistem, podpira faktor moči v območju od 0,8 induktivno do 0,8 kapacitivno, kar omogoča prilagajanje izhodne karakteristike v skladu z zahtevami distribucijskega operaterja (Deye, 2024a). Razsmernik to izvaja tako, da poleg pretvorbe delovne moči generira tudi jalovo komponento toka v ustreznem faznem razmerju glede na napetost. Funkcionalnost je urejena v notranji nastavitvi razsmernika in jo je mogoče prilagoditi po posebnih zahtevah omrežnega operaterja.

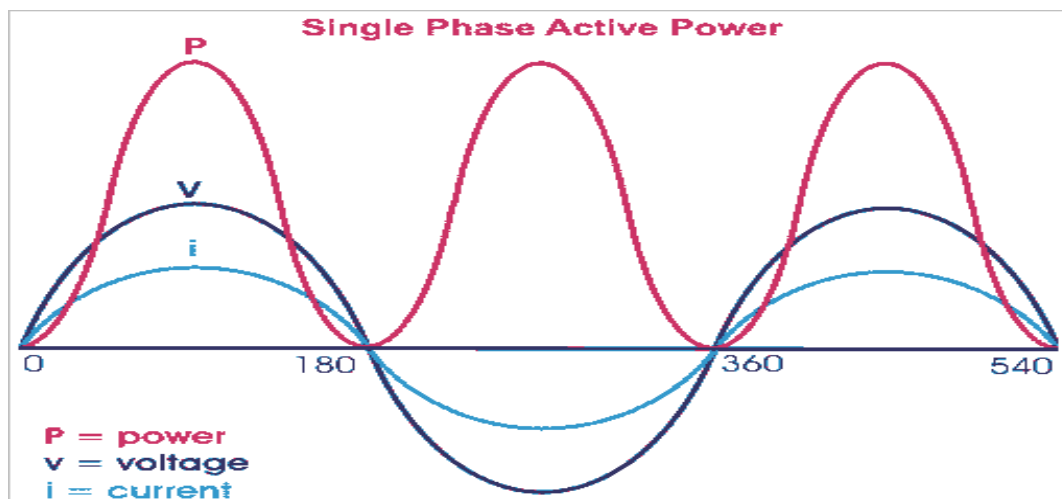
Standard SIST EN 50549-1 določa zahteve za priključitev proizvodnih naprav s skupno nazivno močjo do 1 MW na nizkonapetostno distribucijsko omrežje. Standard ureja tehnične pogoje, zaščitne funkcije, parametre regulacije in postopke preverjanja skladnosti, ki morajo biti izpolnjeni za varno in stabilno paralelno obratovanje proizvodne naprave z omrežjem. Med osrednjimi zahtevami so tolerance napetosti in frekvence, znotraj katerih mora proizvodna naprava obratovati, mejne vrednosti za samodejno ločitev od omrežja v primeru motenj, sposobnost prebroditve kratkotrajnih napetostnih upadov (LVRT, angl. Low Voltage Ride Through) in dinamična podpora omrežju ob napakah. (SIST, 2019)

Posebej pomembne so zahteve standarda glede regulacije jalove moči, ki so opredeljene v dveh karakterističnih krivuljah. Krivulja $Q(U)$ določa, kako naprava prilagaja oddajo ali sprejem jalove moči glede na napetost na priključnem mestu – pri nizkih napetostih naprava jalovo moč sprejema, pri visokih pa jo oddaja in s tem prispeva k stabilizaciji napetostnega profila omrežja. Krivulja $Q(P)$ določa, kako se jalova moč prilagaja delovni moči proizvodne naprave – pri večji delovni moči se jalova moč prilagaja tako, da skupni tok ne preseže nazivnega toka razsmernika. Obe

krivulji sta nastavljivi v razsmerniku in se določita v skladu s krajevnimi razmerami in zahtevami distribucijskega operaterja. (SIST, 2019)

Standard SIST EN 50549-1 določa tudi zahteve glede zaščite ločilnega mesta. Pri proizvodnih napravah, katerih skupna delovna moč presega 30 kW, je obvezna izvedba ločilnega mesta z neodvisnim U-F relejem, ki zagotavlja samodejno ločitev naprave od omrežja v primeru odstopanja napetosti ali frekvence zunaj dovoljenih meja. Zaščitne funkcije morajo biti certificirane in periodično preverjene z meritvami, ki potrjujejo skladnost pragov proženja in izklopnih časov z zahtevami iz soglasja za priključitev. Pri obravnavanem sistemu je bila ta zahteva izpolnjena z vgradnjo U-F releja DOLD RP9811 v shemi Uf-A, ki je opisana v praktičnem delu naloge.

Sistemska obratovalna navodila SONDSEE poleg zahtev iz SIST EN 50549-1 določajo tudi posebnosti, ki veljajo za slovensko distribucijsko omrežje. Med njimi so podrobnosti glede tipskih priključnih shem, postopkov priklopa in odklopa, komunikacijskih zahtev za izmenjavo obratovalnih podatkov ter pravil za priklop proizvodnih naprav v različnih izvedbenih razredih (tip A, tip B, tip C in tip D), ki so razvrščeni glede na nazivno moč naprave. Obravnavani sistem v obeh segmentih – proizvodna naprava in baterijski hranilnik – sodi v razred A, kar je razvidno iz soglasja za priključitev in določa nabor zahtev, ki jih mora sistem izpolnjevati v vseh fazah obratovanja. (SIST, 2019)



Slika 4: Krivulja moči
(Vir: IC components limited, 2025)

3 OBSTOJEČE STANJE VINSKE KLETI

3.1 Analiza stanja v vinarni

Obravnavana vinarna v Vipavski dolini je sodobni proizvodni obrat, ki obsega vinsko klet s tehnološkimi prostori za sprejem in predelavo grozdja, fermentacijo, zorenje vina v lesenih sodih in nerjavečih cisternah ter prostori za stekleničenje in skladiščenje. Objekt je vinogradniško-predelovalna celota, kjer različne tehnološke faze potekajo sezonsko in časovno usklajeno z naravnim ciklom dozorevanja grozdja. Glavni proizvodni vrhunec nastopi v jesenskih mesecih, ko se v razmeroma kratkem obdobju nekaj tednov predela skoraj celoten letni pridelek grozdja.

V obratu je nameščena vrsta električno napajanih tehnoloških naprav, ki skupaj tvorijo proizvodno linijo. Pnevmatiski stiskalniki s pripadajočimi kompresorji izvajajo nežno stiskanje grozdja, hladilni agregati nadzorovano znižujejo temperaturo mošta in vina v fermentacijskih cisternah, črpalke prečrpavajo tekočine med posameznimi fazami procesa, sistemi za kontrolirano fermentacijo pa vzdržujejo temperaturo procesa znotraj zelo ozkega temperaturnega območja. Posamezne naprave imajo nazivne moči od nekaj sto vatov do več kilovatov, pri sočasnem obratovanju med trgatvijo in predelavo pa skupna obremenitev objekta lahko doseže vrednosti do 50 kW.

Električno napajanje objekta je urejeno preko obstoječe priključno-merilne omarice na fasadi, ki je opremljena z direktnim trifaznim dvosmernim števcem delovne in jalove energije. Priključek je bil pred postavitvijo hibridnega sistema namenjen izključno odjemu iz omrežja in opremljen z omejevalcem toka 3×25 A, kar ustreza priključni moči 17 kW. Oskrba z električno energijo poteka iz transformatorske postaje TN0151 Šempas, ki je del distribucijskega omrežja Elektra Primorska. Napajanje transformatorske postaje izvira iz srednjenapetostnega izvoda JA18 Ajdovščina iz razdelilne transformatorske postaje RTP Gorica 110/20/10 kV. (Elektro Primorska, d.d., 2024).

Poraba objekta pred povečanjem proizvodnega obrata ni bila relevantna za potrebe pričujoče naloge, saj se pri tedanji tehnološki zasnovi niso pojavljale konične obremenitve, ki so predmet obravnave. Tehnične potrebe objekta po izvedeni povečavi smo zato ocenili na podlagi seznama vgrajenih proizvodnih naprav, njihovih nazivnih moči in projekcije sočasnosti njihovega obratovanja v koničnih sezonskih obdobjih. Iz teh podatkov izhaja ocena, da konična obremenitev objekta v vrhuncu predelovalne sezone doseže do 50 kW, kar predstavlja skoraj trikratnik priključne moči 17 kW. To neskladje je izhodišče vse nadaljnje analize.

Delovanje vinarske tehnologije je po naravi šaržno in dinamično. Posamezni cikli predelave in obdelave vina trajajo od nekaj minut do več ur, pri čemer se obremenitev

objekta v tem času hitro spreminja. Pnevmatški sistemi delujejo v tlačnih ciklih s sunkovitimi obremenitvami pri zagonu kompresorjev, hladilni agregati se vključujejo in izklapljajo glede na termostatsko regulacijo posameznih cistern, medtem ko stekleničenje predstavlja kontinuirano obremenitev v krajših obdobjih dneva. Posledica te dinamike so kratke konice z visoko močjo, ki se izmenjujejo z obdobji bistveno nižje povprečne porabe. Takšen obremenitveni profil je pri klasičnem omrežnem priključku problematičen, saj povzroča pogoste izklope omejevalca toka, hkrati pa je idealen za reševanje s hibridnim sistemom, ki konice pokrije iz hranilnika in se v tihih obdobjih ponovno napolni.

Stavba vinarne ima ravne in poševne strešne površine z ustrezno orientacijo in naklonom za namestitev fotovoltaičnih modulov. Glavna strešna površina je orientirana proti jugu z rahlim odklonom proti vzhodu, naklon strešine pa znaša 15 stopinj. Strešne površine niso zasenčene s strani sosednjih objektov, dreves ali drugih ovir, kar omogoča optimalno izkoriščanje sončnega sevanja skozi ves dan. Lokacija je hkrati izpostavljena vplivu burje, kar je narekovalo izbiro nosilne konstrukcije s trojnim pritrdilnim sistemom modulov za zagotavljanje mehanske stabilnosti pri močnih vetrovih.

V neposredni bližini vinarne se nahaja tudi stanovanjska hiša, ki je priključena na svojo ločeno priključno-merilno omarico in ima enako priključno moč 17 kW kot vinska klet. Hibridni sistem napaja izključno vinsko klet, kar je tudi pogoj iz soglasja za priključitev, izdanega za merilno mesto vinske kleti. Stanovanjska hiša ostaja v ločeni napajalni shemi z lastnim odjemom iz distribucijskega omrežja in pri reševanju obravnavanega problema razpoložljive moči ne sodeluje.



*Slika 5: Slika objekta vinarne v Vipavi
(Lastni vir)*

3.2 Energetske potrebe objekta

Posnetek stanja, opisan v prejšnjem podpoglavju, omogoča kritično ovrednotenje izhodiščnega položaja in opredelitev temeljnih razlogov, zaradi katerih je bila klasična rešitev neustrezna. Analiza pokaže, da problem omejene priključne moči izhaja iz prepleta tehničnih, časovnih in ekonomskih dejavnikov, ki jih posamično ne bi bilo mogoče rešiti, skupaj pa so vodili v iskanje alternativne rešitve.

Tehnična ovira leži na strani distribucijskega omrežja. Transformatorska postaja TN0151 Šempas, ki napaja obravnavani objekt, je dimenzionirana za obstoječi obseg odjema v širšem napajalnem območju in je v koničnih obdobjih že obratovala blizu meje svoje zmogljivosti. Povečanje priključne moči obravnavanega objekta na vrednost, ki bi pokrila konice do 50 kW, bi zahtevalo poseg v transformatorsko postajo ali premik priključne točke na drug izvod srednjenapetostnega omrežja. V obeh primerih bi šlo za zahteven sistemski poseg, ki presega okvir posameznega odjemalca in zahteva sodelovanje distribucijskega operaterja v okviru njegovega srednjeročnega načrta razvoja omrežja. (Elektro Primorska, d.d., 2024)

Časovna ovira je bila enako pomembna kot tehnična. Postopki povečanja priključne moči pri distribucijskem operaterju vključujejo izdelavo elaborata o vplivu na omrežje, sklenitev nove pogodbe o priključitvi, izdajo soglasja za priključitev z določeno priključno močjo ter dejansko izvedbo gradbenih in elektromontažnih del. Skupna doba teh postopkov se v praksi meri v letih, kar je za uporabnika, ki potrebuje delujočo

tehnično rešitev pred začetkom naslednje predelovalne sezone, nesprejemljivo. Sezonska narava vinarske dejavnosti zahteva, da je proizvodna linija pripravljena vsako leto v jesenskem obdobju, sicer celoten letni pridelek tvega zamude ali okrnjeno predelavo.

Finančna ovira je dopolnila tehnično in časovno. Stroški povečanja priključne moči v primerih, ko je potrebna krepitev transformatorske postaje ali izgradnja novega srednjenapetostnega izvoda, so znatni in bi morali biti pokriti s strani uporabnika prek prispevka za priključno moč. Ti stroški bi pri obravnavanem objektu lahko dosegali ali presejali stroške naložbe v lokalni hibridni sistem, pri čemer bi uporabnik še vedno ostal popolnoma odvisen od distribucijskega omrežja in bi moral plačevati polno omrežnino tudi za najvišje stopnje moči.

Drugačen vidik analize je usmerjen v naravo obremenitvenega profila. Vinarska tehnologija ima izrazito sezonski značaj – visoke konice se pojavljajo v omejenem obdobju jeseni, medtem ko je v ostalem delu leta poraba bistveno nižja. Klasično povečanje priključne moči bi pomenilo, da bi uporabnik celo leto plačeval omrežnino za visoko priključno moč, ki bi jo dejansko izkoristil le dva mesca letno. To je z vidika ekonomske učinkovitosti neugodno, saj bi velik del plačane priključne moči ostajal neuporabljen več kot deset mesecev na leto. Hibridni sistem v tem pogledu deluje povsem drugače – investicija je enkratna, sistem pa se obratovalno prilagaja dejanskim potrebam objekta tako v koničnih obdobjih kot v obdobjih nizke porabe.

Iz analize obremenitvenega profila izhaja še en pomemben vidik. Konične obremenitve v vinarski tehnologiji niso trajne, temveč so kratkotrajne in ciklične. Pnevmatiski stiskalniki, hladilni agregati in črpalke ne obratujejo neprekinjeno z največjo močjo, temveč v krajših obratovalnih ciklih, med katerimi se sistem vrača v stanje nizke porabe. Takšen profil je še posebej primeren za reševanje s peak shavingom, saj baterijski hranilnik konice pokrije iz svoje rezerve, v vmesnih obdobjih pa se ponovno napolni. Pri obremenitvenih profilih s trajno visoko porabo peak shaving ne bi deloval učinkovito, saj bi se hranilnik prehitro izpraznil in ne bi imel časa za obnovo zaloge energije. V obravnavanem primeru pa narava vinarskega procesa zagotavlja prav potrebne premore med konicami.

Sklepna ugotovitev kritične analize je torej naslednja: problema omejene priključne moči obravnavane vinarne ni mogoče reševati po klasični poti zaradi tehničnih, časovnih in finančnih razlogov, hkrati pa narava obremenitvenega profila objekta omogoča uspešno reševanje problema z lokalnim hibridnim sistemom. Ti ugotovitvi predstavljata tehnično utemeljen razlog za odločitev o postavitvi sončne elektrarne s hranilnikom električne energije, ki je predmet praktičnega dela naloge. Konkretno zasnovo, izbiro komponent, izvedbo in zagon obravnavamo v naslednjem poglavju.

4 PRAKTIČNI DEL

4.1 Zasnova in dimenzioniranje sistema

Zasnova hibridnega sistema za obravnavano vinarno je izhajala iz dveh temeljnih izhodišč: priključna moč objekta znaša 17 kW in je ni mogoče povečati, medtem ko konične obremenitve proizvodne linije dosegajo do 50 kW. Razlika med tema vrednostma znaša 33 kW in predstavlja moč, ki jo mora hibridni sistem dodatno zagotoviti porabnikom v obdobjih koničnega obratovanja. Ta podatek je določil najmanjšo zahtevano nazivno moč razsmernika in baterijskega hranilnika ter postal izhodišče za vse nadaljnje dimenzioniranje.

Pri dimenzioniranju razsmernika smo upoštevali, da mora ta v koničnih trenutkih sočasno pretvarjati moč iz fotovoltaičnih modulov in moč iz baterijskega hranilnika ter oba usmerjati v porabnike. Hkrati je razsmernik tisti, ki regulira tudi kompenzacijo jalove moči v skladu z zahtevo $\cos \varphi = 0,95$ iz soglasja za priključitev. Na podlagi seštevka vseh teh zahtev smo izbrali razsmernik z nazivno navidezno močjo 50 kVA, ki zagotavlja zadostno rezervo nad zahtevanih 33 kW delovne moči. Izbrana navidezna moč razsmernika je bila usklajena tudi z dejstvom, da soglasje za priključitev dovoljuje oddajo presežkov v omrežje do 13,6 kW, kar postavlja dodatno omejitev pri delovanju sistema. (Elektro Primorska, d.d., 2024).

Pri dimenzioniranju baterijskega hranilnika smo izhajali iz dveh parametrov – nazivne moči in nazivne kapacitete. Nazivna moč hranilnika mora biti dovolj velika, da krije razliko med konično obremenitvijo in priključno močjo, torej najmanj 33 kW. Pri tem smo upoštevali, da mora hranilnik to moč zagotavljati zanesljivo tudi pri višjih temperaturah okolja in nižjem stanju napolnjenosti, zato smo dimenzionirali z ustrezno rezervo. Izbrana konfiguracija dveh baterijskih stolpov, vsak z desetimi moduli LiFePO_4 in skupno nazivno močjo, ki znatno presega 33 kW, zagotavlja pokritje konic z dovolj rezerve za zanesljivo obratovanje skozi celotno življenjsko dobo sistema.

Nazivna kapaciteta hranilnika je bila določena na podlagi pričakovanega trajanja koničnih obratovalnih ciklov in časovnih razmikov med njimi. Vinarski tehnološki procesi v koničnih obdobjih trajajo od nekaj minut do več ur, pri čemer se konice in obdobja nizke porabe izmenjujejo skozi delovni dan. Nazivna kapaciteta 102,4 kWh, ki jo dosežemo z dvema stolpoma po 51,2 kWh, omogoča pokritje več zaporednih koničnih ciklov pred potrebo po popolni obnovi zaloge energije. Pri uporabni globini praznjenja 90 odstotkov, ki jo proizvajalec priporoča za zagotavljanje dolge življenjske dobe, znaša razpoložljiva kapaciteta hranilnika približno 92 kWh. Ob predpostavljeni razliki 33 kW med konično obremenitvijo in priključno močjo lahko hranilnik to razliko krije skoraj tri ure neprekinjeno, kar znatno presega pričakovano trajanje koničnih obratovalnih obdobj v vinarski tehnologiji.

Maksimalna moč PV generatorja	34 kWp
Moč posameznega PV modula	425 Wp
Tip PV modula	Hyundai HiE-S425HG(FB)
Število PV modulov	80 kosov
Maksimalna moč razsmernika	50 kVA
Tip razsmernika	Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4, 1 kos
Tip hranilnika	Deye BOS-G Pro 5.12
Število hranilnikov	20 kosov
Skupna nazivna kapaciteta	102,4 kWh

Tabela 1: Osnovni podatki hibridne elektrarne
(Lastni vir)

Pri dimenzioniranju fotovoltaičnega dela sistema smo izhajali iz drugačnega kriterija. Fotovoltaika v obravnavani rešitvi nima primarne vloge pri pokritju koničnih obremenitev, saj njena trenutna moč ni zanesljivo razpoložljiva – odvisna je od trenutnega sončnega sevanja. Glavna naloga fotovoltaičnih modulov je polnjenje hranilnika in pokrivanje povprečne porabe objekta v sončnih obdobjih, kar zmanjšuje skupni odjem iz omrežja. Pri izbiri nazivne moči 34 kWp smo upoštevali razpoložljivo strešno površino, dovoljeno priključno moč oddaje v omrežje 13,6 kW iz soglasja za priključitev ter razmerje med močjo modulov in nazivno močjo razsmernika. Izbrano razmerje je takšno, da razsmernik pri obratovanju ne presega svoje navidezne moči, hkrati pa fotovoltaični del zagotavlja zadostno proizvodnjo za zanesljivo polnjenje hranilnika tudi v obdobjih z manj ugodnimi vremenskimi pogoji.

Skupna zasnova sistema je bila dokumentirana v projektni dokumentaciji izvedenih del (PID), ki je vključevala enopolno shemo, izbrane komponente s tehničnimi specifikacijami, pripadajoče zaščitne naprave, nosilno konstrukcijo s trojnim pritrdilnim sistemom modulov za zaščito pred burjo ter ureditev ločilnega mesta z U-F relejem DOLD RP9811. Dokumentacija navodil za uporabo je bila pripravljena v skladu z zahtevami SIST EN 50549-1, sistemskih obratovalnih navodil SONDSEE in tehničnih smernic TSG-N-002 ter TSG-N-003. Skladnost z zahtevami požarne varnosti je bila zagotovljena po smernicah SZPV 512 (Velog d.o.o., 2024b) .



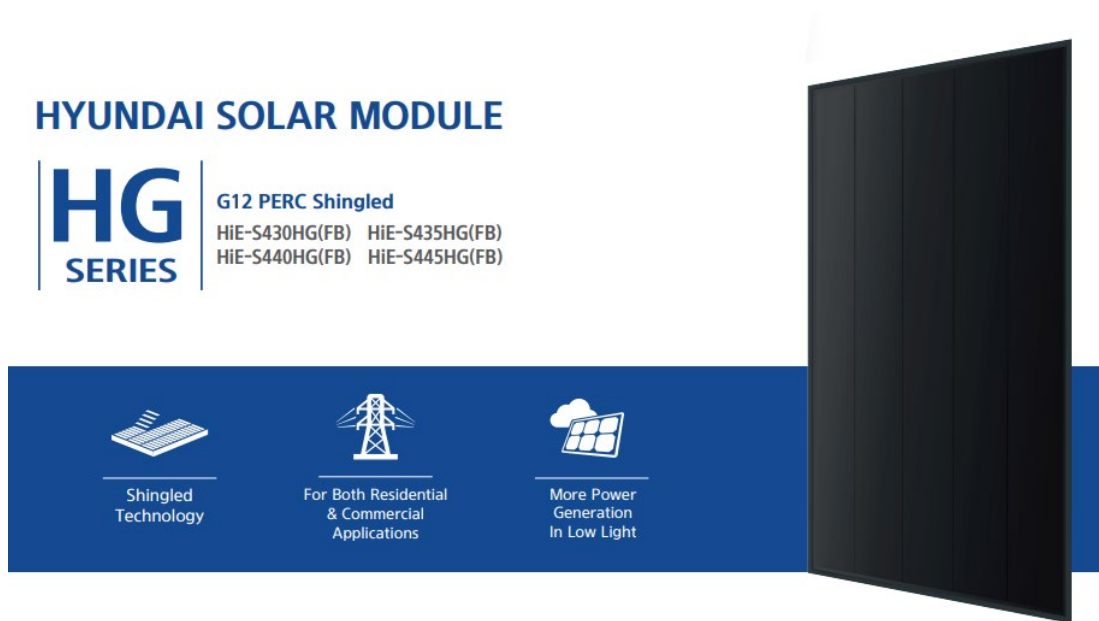
Slika 6: Izris PV modulov
(Vir: SolarEdge designer, 2024)

4.2 Izbira komponent

Po zaključeni zasnovi in dimenzioniranju sistema smo izbrali konkretne komponente, ki sestavljajo hibridno sončno elektrarno. Pri izbiri smo upoštevali tehnične zahteve projekta, skladnost z evropskimi standardi za priklop na nizkonapetostno distribucijsko omrežje, dostopnost rezervnih delov ter izkušnje izvajalca s posameznimi proizvajalci. Komponente sistema lahko razdelimo v štiri sklope: fotovoltaični moduli z modulskimi optimizatorji, hibridni razsmernik, baterijski hranilnik in oprema ločilnega mesta.

4.2.1 Fotovoltaični moduli Hyundai HiE-S425HG(FB)

Za fotovoltaični del sistema smo izbrali monokristalne module Hyundai HiE-S425HG(FB) iz serije HG s tehnologijo PERC Shingled (Slika 7). Posamezni modul ima nazivno moč 425 W in je dimenzij $1899 \times 1096 \times 30$ mm, kar pri 80 moduli daje skupno nazivno moč 34 kWp. Moduli imajo 320 zaporedno povezanih celic v shingled konfiguraciji, ki povečuje aktivno površino v primerjavi s klasičnimi moduli s pravokotnimi celicami in zagotavlja boljše obratovanje pri delnem senčenju.



Slika 7: PV modul Hyundai
(Vir: Hyundai Energy Solutions, 2022)

Tehnologija PERC Shingled je bila pri izbiri ključna iz dveh razlogov. Prvi razlog je višja učinkovitost pri šibki svetlobi, kar je v vipavskem podnebj s pogostimi jutranjimi meglami in dolgimi spomladanskimi prehodi pomembna prednost. Drugi razlog je odpornost proti pojavom degradacije zaradi indukcijskih učinkov svetlobe (LID) in razlike potencialov (PID), ki bi sicer zmanjšali letno proizvodnjo modulov. Proizvajalec za module zagotavlja 25-letno linearno garancijo na zmogljivost, kjer je v začetnem letu zajamčena 98-odstotna nazivna moč, v 25. letu pa najmanj 84,8-odstotna, kar ustreza povprečni letni degradaciji 0,55 odstotka. (Hyundai Energy Solutions, 2022)

Električni parametri modula so prilagojeni nizkonapetostnim nizom. Pri standardnih testnih pogojih ima modul napetost odprtih sponk 43,5 V in kratkostični tok 13,01 A, pri točki maksimalne moči pa 36,4 V in 12,23 A. Maksimalna sistemska napetost znaša 1500 V DC, kar omogoča daljše nize z več zaporednimi moduli. Mehanska konstrukcija s kaljenim steklom debeline 3,2 mm in eloksiranim aluminijevim okvirjem prenese obtežbo do 5400 Pa s sprednje strani in 2400 Pa z zadnje strani, kar zadošča tudi pri močnejši burji v Vipavski dolini. (Hyundai Energy Solutions, 2022)

Proizvajalec	Hyundai
Tip	HiE-S425HG(FB)
Maksimalna moč (Pmpp)	425 W
Toleranca moči	0~ + 5 W
Napetost pri maksimalni moči (Umpp)	36,4 V
Tok pri maksimalni moči (Impp)	12,23 A

Napetost odprtih sponk (U_{oc})	43,5 V
Kratkostični tok (I_{sc})	13,01 A
Maksimalna sistemska napetost	1500 V DC
Dimenzije (D x V x Š)	1899 x 1096 x 30 mm
Število PV modulov	80

Tabela 2: Osnovni podatki PV modula Hyundai
(Vir: Hyundai Energy Solutions, 2022)

4.2.2 Modulski optimizatorji Tigo TS4-O-A

Vsak fotovoltaični modul je opremljen z modulskim optimizatorjem Tigo TS4-A-O (Slika 8), ki opravlja tri funkcije: optimizacijo proizvodnje na nivoju posameznega modula, spremljanje obratovanja in hitri izklop sistema v primeru nevarnosti. Optimizator deluje neodvisno od izbire razsmernika, saj ne vsiljuje fiksne napetosti v niz, temveč prilagaja delovanje modula trenutnim razmeram. Pri obratovanju brez senčenja optimizator ne posega v delovanje, pri delnem senčenju ali odstopanjih posameznega modula pa samodejno prilagodi delovno točko, da se vpliv okvarjenega ali zasenčenega modula ne prenese na celoten niz. (Ažbe, 2025).



Slika 8: Optimizator Tigo TS4-O-A
(Vir: Tigo Energy, 2023)

Funkcija hitrega izklopa (angl. *rapid shutdown*) je certificirana po standardu UL 1741 in zagotavlja, da se v primeru aktivacije zaščite vsak modul samodejno preklopi v varno stanje z napetostjo pod 1 V DC v manj kot 30 sekundah. Ta funkcija je posebej pomembna pri intervencijah gasilcev in pri vzdrževanju sistema, saj odpravi nevarnost visoke enosmerne napetosti na DC strani sistema. Z izvedbo hitrega izklopa na nivoju posameznega modula sistem izpolnjuje tudi zahteve smernice SZPV 512 za požarno varnost fotovoltaičnih sistemov, ki za večje sisteme priporoča oziroma zahteva izvedbo deenergizacije DC strani v primeru intervencije. Spremljanje obratovanja na nivoju posameznega modula pa omogoča pravočasno odkrivanje napak in posledično daljšo življenjsko dobo celotnega sistema. (Slovensko združenje za požarno varstvo, 2016).

Optimizator je prek brezžične povezave povezan s centralno enoto Tigo Cloud Connect Advanced (CCA), ki podatke iz vseh modulov zbira in posreduje v sistem za nadzor in upravljanje. Ta arhitektura omogoča daljinski vpogled v stanje vsakega modula, preverjanje proizvodnje v realnem času in beleženje zgodovinskih podatkov za potrebe vzdrževanja (Tigo Energy, 2023).

4.2.3 Hibridni razsmernik Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4

Za centralno enoto sistema smo izbrali trifazni hibridni razsmernik Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4 z nazivno močjo 50 kVA (Sika 2). Razsmernik združuje fotovoltaični vhod s sledenjem točki maksimalne moči, dvosmerni baterijski vhod, omrežni izhod in poseben izhod za otočno obratovanje. Štirje neodvisni vhodi za sledenje točki maksimalne moči omogočajo priklop različno usmerjenih nizov modulov brez medsebojnega vpliva, dva baterijska vhoda pa omogočata priklop dveh ločenih baterijskih stokov, kot jih imamo v obravnavanem sistemu.

Pri izbiri razsmernika so bili odločilni naslednji parametri. Maksimalna moč na fotovoltaični strani znaša 65 kW, kar zadošča pri vgrajenih 34 kWp modulih in omogoča rezervo za morebitno kasnejšo razširitev. Napetostni razpon vhoda je od 180 V do 850 V DC pri sledenju točki maksimalne moči, kar ustreza obratovalnim napetostim izbranih nizov modulov. Maksimalni izhodni tok znaša 75,8 A na fazo, kar pri trifaznem sistemu z medfazno napetostjo 400 V daje izhodno moč nad 50 kW. Maksimalna učinkovitost razsmernika znaša 97,6 odstotka, evropsko merjeni izkoristek pa 97 odstotkov, kar so vrednosti, primerljive z najboljšimi napravami v razredu. (Deye, 2023).

Razsmernik podpira faktor moči v razponu od 0,8 induktivno do 0,8 kapacitivno, kar omogoča izvedbo zahteve distribucijskega operaterja po kompenzaciji jalove moči na $\cos \varphi = 0,95$. Skladnost s standardi SIST EN 50549-1, VDE 0126-1-1 in IEC 61727 je zagotovljena s certifikati proizvajalca, kar je bil pogoj za izdajo soglasja za

priključitev s strani Elektra Primorska. Komunikacija z baterijskim hranilnikom poteka po vodilih CAN in RS485, povezava z obračunskim Smart Energy Metrom pa prek vmesnika RS485 v protokolu Modbus. (Deye, 2023).

Razsmernik ima tudi izhod za otočno obratovanje (EPS), ki omogoča napajanje rezerviranih bremen iz hranilnika in fotovoltaike v primeru izpada distribucijskega omrežja. V obravnavanem projektu otočno obratovanje ni bilo predvideno kot osnovna funkcija, je pa kot tehnična zmožnost ohranjeno za morebitno kasnejšo nadgradnjo.

Proizvajalec	Deye
Tip	SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4
Vhodna stran razsmernika (DC)	
Max. DC napetost (Uvoc, max)	1000 V
Št. neodvisnih MPPT in nizov	4/2+2+2+2
Max. vhodni tok (Ivp, max)	4 x 36 A
Max. vhodna DC moč	80 kW
MPPT razpon DC napetosti	150–850 V
Tip baterije	LiFePO ₄
Razpon vhodne napetosti baterije	160–800 V
Max. polnilni / praznilni tok	50 + 50 A
Št. baterijskih vhodov	2
Komunikacija z baterijo	BMS
Izhodna stran razsmernika (AC)	
AC moč, nominalna (Pac, nom)	50 kVA
AC moč, maksimalna (EPS)	1.5 x nazivne moči 10 s
Max. izhodni tok na fazo (Iac, max)	75,8 A
Nazivna napetost (Uac, nom)	3 x 400 VAC
Nazivna frekvenca (fac, nom)	50 Hz
Faktor jalove moči	0,8–0,8 (indukt. , kapac.)

Tabela 3: Osnovni podatki razsmernika Deye
(Vir: Deye inverter, 2024)

4.2.4 Baterijski hranilnik Deye BOS-G Pro

Za baterijski del sistema smo izbrali »rack montirani« hranilnik Deye BOS-G Pro v izvedbi LiFePO₄. Hranilnik je sestavljen iz dveh ločenih baterijskih stolpov, kjer je vsak stolp narejen iz desetih baterijskih modulov BOS-G-Pack 5.1 z nazivno napetostjo

51,2 V in nazivno kapaciteto 5,12 kWh na modul. Skupna nazivna kapaciteta sistema znaša 102,4 kWh, sistemska napetost vsakega stolpa pa 512 V DC, kar je v ustreznem napetostnem oknu za baterijski vhod razsmernika Deye (Deye, 2024b).

Pri izbiri smo upoštevali, da hranilnik ni le pasivni sestavni del sistema, temveč njegov osrednji delovni element, ki dejansko zagotavlja kratkotrajno povečanje razpoložljive moči. Tehnologija LiFePO_4 je bila izbrana iz več razlogov, ki so bili podrobno opisani v Poglavlju 2.4. V okolju vinarne, kjer baterijski hranilnik deluje v pomožnih prostorih z manjšim nadzorom temperature, je termična stabilnost LiFePO_4 izjemno pomembna varnostna lastnost (Velog d.o.o., b.d.).

Posamezen modul BOS-G-Pack 5.1 zagotavlja nazivni tok polnjenja in praznjenja 100 A ter konični tok 120 A v trajanju do dveh minut. Pri sistemske napetosti 512 V to pomeni, da lahko vsak stolp dostavi nazivno moč 51,2 kW in konično moč 61,4 kW. Skupaj oba stolpa tako lahko dostavita do 102,4 kW nazivne moči in 122,8 kW konične moči, kar znatno presega zahtevano razliko 33 kW med konično obremenitvijo in priključno močjo. Realna izhodna moč sistema je seveda omejena z razsmernikom, kar pomeni, da hranilnik nima pomanjkanja zmogljivosti.

Sistem za upravljanje baterije je integralni del vsakega modula in komunicira z razsmernikom prek vodila CAN. BMS neprekinjeno spremlja napetost vsake celice, temperaturo, tok in stanje napolnjenosti ter izvaja izenačevanje napetosti med celicami in zaščito pred prenapolnjenostjo, prekomernim praznjenjem, prekomernim tokom in pregrevanjem. Globina praznjenja je priporočena na 90 odstotkov, kar pri 102,4 kWh nazivne kapacitete daje uporabno energijo približno 92 kWh. Garancijska doba znaša 10 let, življenjska doba pa najmanj 6000 polnih ciklov ob ohranjenih najmanj 70 odstotkih začetne kapacitete pri standardnih testnih pogojih (Deye, 2024b).

Proizvajalec	Deye
Tip	BOS-G-Pro
Nazivna napetost	51,2 V
Tehnologija baterijskih celic	LiFePO_4
Nazivna kapaciteta	51,2 kWh
Moč praznjenja / polnjenja	100 A
Temperaturno območje delovanja	0–35 °C
Komunikacijski protokol	CAN 2.0 / RS485
Priporočena globina praznjenja	90 %

Cikli	$25 \pm 2^\circ \text{ C}, 0.5 \text{ C} / 0.5 \text{ C}$, EOL 70 % ≥ 6000
Maksimalno število na sklop	16

Tabela 4: Osnovni podatki hranilnika Deye
(Vir: Deye, 2024b)

4.2.5 Oprema ločilnega mesta

Ločilno mesto med proizvodno napravo in distribucijskim omrežjem je opremljeno z napravami, ki zagotavljajo skladnost z zahtevami sheme Uf-A iz sistemskih obratovalnih navodil SONDSEE. Osrednji element je U-F rele DOLD RP9811 (Slika 9), ki neprekinjeno meri napetost in frekvenco na priključnem mestu ter v primeru odstopanj zunaj dovoljenih meja samodejno preklopi izhodne kontakte in s tem aktivira ločilno stikalo. Rele je nastavljiv v širokem razponu pragov in izklopnih časov, kar omogoča prilagoditev konkretnim zahtevam soglasja za priključitev. (DOLD, 2023a).



Slika 9: U-F rele DOLD
(Vir: DOLD, 2023b)

Ločilno stikalo je izvedeno s kontaktorjem Schneider LC1 D95 z nazivnim tokom 95 A, ki je dimenzioniran z dovolj rezerve nad maksimalnim izhodnim tokom razsmernika. Kontaktor se aktivira prek izhodnih kontaktov U-F releja in v primeru odstopanj omrežnih parametrov v kratkem času loči celoten sistem od distribucijskega omrežja. Med opremo ločilnega mesta sodijo še glavni tokokrogi, varovalke, prenapetostne zaščite in ozemljitvene povezave, ki vsi skupaj zagotavljajo varno obratovanje sistema in skladnost z zahtevami tehničnih smernic TSG-N-002 in TSG-N-003.

4.3 Enopolna shema in večpolna shema ločilnega mesta U-F rele

Projektna dokumentacija izvedenih del vsebuje dva ključna dokumenta, ki skupaj prikazujeta električno strukturo hibridne sončne elektrarne. Prvi je enopolna shema celotnega sistema, ki povzema električno strukturo na enem mestu in prikazuje vse glavne komponente, njihove medsebojne povezave, dimenzije kablov, zaščitne naprave in priključne točke. Drugi je večpolna shema ločilnega mesta z U-F relejem DOLD RP9811, ki podrobneje prikazuje krmilne in močnostne tokokroge sheme zaščitnih funkcij Uf-A, kot jih zahtevajo sistemska obratovalna navodila SONDSEE. Enopolna shema je bila izdelana v programskem okolju SchrackDesign (Velog d.o.o., 2024a), večpolna pa v programskem okolju Eplan (Velog d.o.o., 2024c). Obe shemi sta sestavni del projektne dokumentacije, ki je bila predana investitorju in distribucijskemu operaterju.

4.3.1 Enopolna shema MFE

Sistem je strukturno razdeljen na dva dela: enosmerni del s fotovoltaičnimi moduli in baterijskim hranilnikom ter izmenični del z razsmernikom, ločilnim mestom in priključkom na distribucijsko omrežje. Na enosmerni strani je vidno, da je 80 fotovoltaičnih modulov razporejenih v štiri neodvisne nize, označene s simboli +G1, +G2, +G3 in +G4. Prvi trije nizi vsebujejo po 22 modulov, četrti niz pa 14 modulov. Vsak niz je vezan prek ločenega prenapetostnega odvodnika DC -V2 do -V5 in DC inštalacijskega odklopnika -F6 do -F9 z nazivnim tokom 20 A do priključka v razsmernik. Razdelitev v štiri neodvisne nize ustreza številu MPPT vhodov razsmernika. Ker je lega PV modulov ista, so lahko 4 neodvisni moduli vezani v dva MPPT vhoda.

Baterijski del sistema je sestavljen iz dveh ločenih stolpov, označenih z -B1 in -B2. Vsak stolp vsebuje deset baterijskih modulov Deye BOS-G-Pack 5.1 s skupno kapaciteto 51,2 kWh, kar pri obeh stolpih daje skupno nazivno kapaciteto 102,4 kWh. Stolpi so povezani z razsmernikom prek dvosmernih baterijskih vhodov, vsak s svojo povezavo preseka $2 \times 25 \text{ mm}^2$. Komunikacija med baterijskimi moduli in razsmernikom poteka prek vodila UTP, ki prenaša signale BMS sistema za upravljanje baterij.

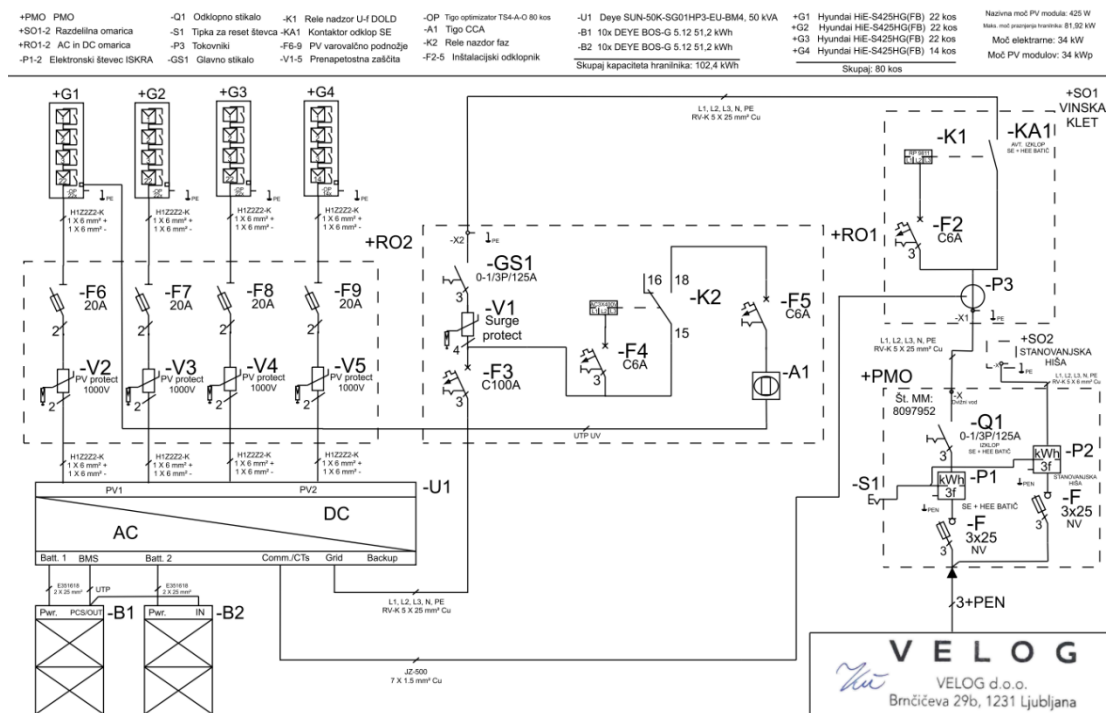
Razsmernik -U1 tipa Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4 je osrednja krmilna naprava sistema. Na njegovi izmenični strani je razvidna trifazna povezava L1, L2, L3, N, PE z razdelilno omarico +RO1, ki je izvedena s kablom RV-K $5 \times 25 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$. V tej omarici je nameščena oprema ločilnega mesta – glavno stikalo -GS1 z nazivnim tokom 125 A, prenapetostni odvodnik -V1 in inštalacijski odklopnik -F3 z nazivnim tokom 100 A. Ti elementi tvorijo varnostno verigo, ki zagotavlja zanesljivo ločitev sistema od distribucijskega omrežja v primeru napake.

Na izmenični strani sheme je razvidna tudi povezava do priključno-merilne omarice +PMO, kjer je nameščen direktni trifazni dvosmerni števec delovne in jalove energije Iskra (P2) z nazivnim merilnim tokom in komunikacijskim vmesnikom za daljinski odčitek. Skozi števec poteka glavni dovod od distribucijskega omrežja s presekom $5 \times 25 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ in oznako 3+PEN, kar potrjuje, da je priključek izveden v sistemu TN. Glavna varovalka pred števcem je tipa NV z nazivnim tokom $3 \times 25 \text{ A}$, kar ustreza priključni moči 17 kW.

Iz sheme je razvidno tudi, da je samooskrbna razdelilna omarica +SO1 namenjena izključno napajanju vinske kleti. Stanovanjska hiša, ki je narisana v desnem zgornjem delu sheme z oznako +SO2, ima ločen merilni odjem in svojo priključno-merilno omarico z ločenimi varovalkami in dovodom. Ta del sheme je vključen zaradi pregleda nad celotno električno infrastrukturo na lokaciji, vendar v sistem samooskrbe ni vključen.

Del sheme prikazuje tudi povezave optimizatorjev Tigo TS4-A-O prek centralne enote Tigo Cloud Connect Advanced (CCA), ki je povezana z razsmernikom in omogoča spremljanje proizvodnje na nivoju posameznega modula. CCA enota komunicira z optimizatorji prek brezžičnega protokola in podatke posreduje na portal Tigo Energy Intelligence ter v aplikacijo Deye Cloud, kjer ima uporabnik vpogled v celotno proizvodnjo, porabo in stanje hranilnika v realnem času.

Skupni preseki kablov so dimenzionirani glede na pričakovane obremenitve in izgube. Glavni dovod od distribucijskega omrežja in povezava med razsmernikom in razdelilno omarico sta izvedena s kablom $5 \times 25 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$, povezave med fotovoltaičnimi nizi in razsmernikom pa s kablom H1Z2Z2-K s presekom $1 \times 6 \text{ mm}^2$ za pozitivni in negativni vodnik. Ozemljitvene povezave in glavna izenačitev potencialov so izvedene v skladu s tehnično smernico TSG-N-003 za zaščito pred delovanjem strele, kar je posebej pomembno pri sistemih s strešnimi fotovoltaičnimi moduli, ki so izpostavljeni atmosferskim razelektritvam.



Slika 10: Enopolna shema MFE+HEE

(Vir: SchrackDesign, 2024)

4.3.2 Večpolna shema ločilnega mesta z U-F relejem DOLD RP9811

Ločilno mesto je v sistemih s skupno delovno močjo nad 30 kW obvezno izvedeno kot samostojen tokokrog z neodvisno zaščitno funkcijo, ki zagotavlja samodejno ločitev proizvodne naprave od distribucijskega omrežja v primeru odstopanja napetosti ali frekvence zunaj dovoljenih meja. Pri obravnavanem sistemu je ta zahteva izpolnjena z izvedbo sheme Uf-A, ki je v skladu s sistemskimi obratovalnimi navodili SONDSEE in zahtevami iz soglasja za priključitev. Večpolna shema ločilnega mesta natančno prikazuje povezave med U-F relejem, krmilnimi kontaktorji in glavnim močnostnim stikalom, ki skupaj sestavljajo varnostno verigo zaščite.

Glavni element sheme je U-F rele DOLD RP9811, označen s simbolom -A1. Rele je opremljen s tremi napetostnimi vhodi za fazne napetosti L1, L2 in L3 ter z nevtralnim priključkom N in zaščitnim PE, ki tvorijo merilno bazo za neprekinjeno spremljanje fazne napetosti in frekvence omrežja. Napetostni del releja izvaja štiristopenjsko napetostno zaščito ($U>$, $U>>$, $U<$, $U<<$) in dvostopenjsko frekvenčno zaščito ($f>$, $f<$). Pragovi proženja in izklopni časi so nastavljivi v širokem razponu, kar omogoča prilagoditev zahtevam soglasja za priključitev.

Na izhodni strani releja so trije pari kontaktov, ki so povezani s krmilnimi kontaktorji -K2 in -K3 ter glavnim močnostnim kontaktorjem -K1. Krmilna kontaktorja -K2 in -K3 sta povezana zaporedno in tvorita dvojno varnostno zanko, kar pomeni, da mora biti

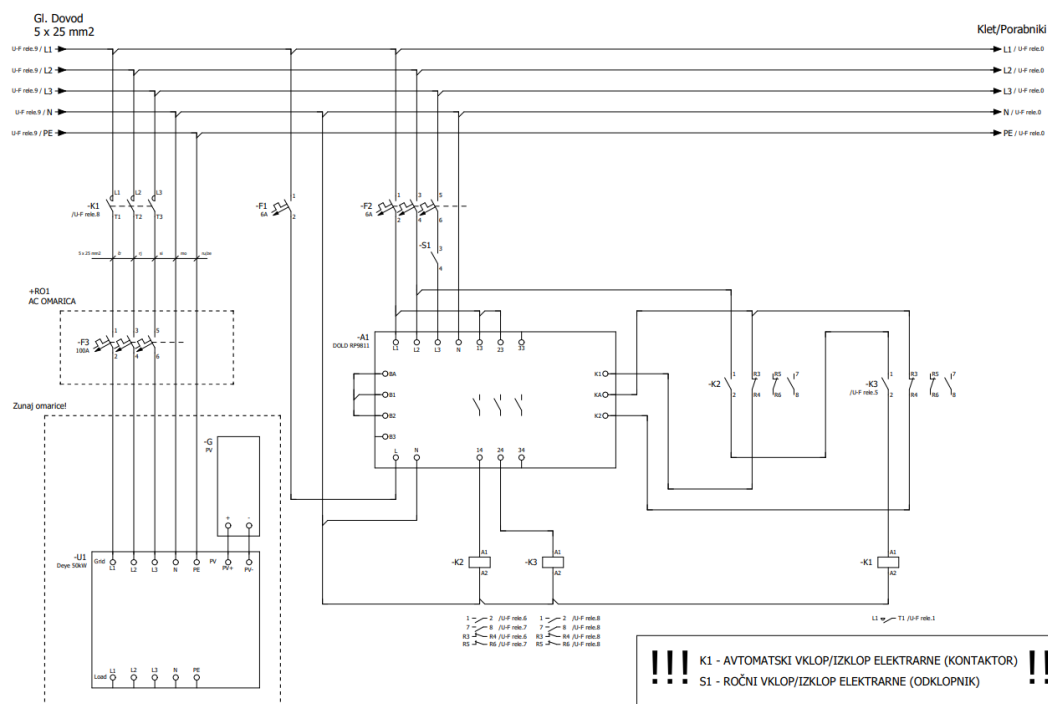
za sklenitev močnostnega stikala -K1 izpolnjen pogoj sočasne sklenitve obeh krmilnih kontaktov. Takšna izvedba zagotavlja redundantnost zaščite v primeru, da bi eden od krmilnih elementov odpovedal — ob napaki katerega koli kontakta v zanki se glavno stikalo -K1 samodejno odpre in razsmernik se loči od distribucijskega omrežja.

Glavni močnostni kontaktor -K1 je izveden s kontaktorjem Schneider LC1 D95 z nazivnim tokom 95 A. Ta nazivna jakost zagotavlja zadostno rezervo nad maksimalnim izhodnim tokom razsmernika 75,8 A na fazo. Skozi kontaktor potekajo vse tri fazne povezave glavnega dovoda iz razsmernika v razdelilno omarico, kar pomeni, da kontaktor v aktivnem stanju prenaša celotno moč proizvodne naprave. Ob proženju zaščite kontaktor preklopi v stanje izklopa in v kratkem času loči razsmernik od distribucijskega omrežja, pri čemer izklopni čas ustreza zahtevam standarda SIST EN 50549-1.

V shemi sta vključena tudi pomožna elementa -S1 in -F1. -S1 je ročno upravljano stikalo za izklop ločilnega mesta, ki omogoča prisilno ločitev sistema od omrežja v primeru servisnih posegov ali izrednih razmer. Stikalo je nameščeno tako, da je dostopno uporabniku kot servisnemu osebju, kar je v skladu s tehničnimi smernicami za varnost pri delu na električnih napravah. Inštalacijski odklopnik -F1 z nazivnim tokom 6 A varuje krmilni tokokrog releja in zagotavlja njegovo zanesljivo delovanje tudi v primeru kratkega stika v krmilnih povezavah.

Glavni dovod v ločilno mesto je izveden s kablom $5 \times 25 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$, kar zagotavlja prenos celotne nazivne moči razsmernika z minimalnimi izgubami. Vodniki so označeni standardno z barvami: črna L1, rjava L2, siva L3, modra N in rumeno-zelena PE. Med ločilnim mestom in razsmernikom je povezava izvedena tako, da omogoča enostavno servisno možnost z odklopom močnostnega stikala in razklopom DC strani razsmernika preko ločilnih stikal pri vsakem fotovoltaičnem nizu in pri obeh baterijskih stolpih.

Skupna izvedba ločilnega mesta sledi shemi Uf-A z dvojnim krmilnim kontaktorjem v varnostni zanki, kar je rešitev, ki presega minimalne zahteve standarda in zagotavlja višjo stopnjo zanesljivosti. Pravilnost izvedbe in skladnost z zahtevami iz soglasja za priključitev sta bili preverjeni z meritvami pragov proženja in izklopnih časov, ki so opisane v Poglavju 4.6.



Slika 10: U-F rele shema
(Vir: Eplan, 2024)

4.4 Montáža komponent

Montaža hibridnega sistema je potekala v zaporedju, ki je optimalno z vidika varnosti, učinkovitosti dela in minimalnega motenja proizvodnih procesov vinarne. Glavni segmenti montaže so bili priprava strešne podkonstrukcije in postavitve fotovoltaičnih modulov, namestitvev DC ožičenja in optimizatorjev, montaža razsmernika in baterijskega hranilnika v notranji prostor, izvedba ločilnega mesta in povezava z obstoječo priključno-merilno omarico. Vsa dela so bila izvedena v skladu s tehničnimi smernicami TSG-N-002 za nizkonapetostne električne instalacije in TSG-N-003 za zaščito pred delovanjem strele ter v skladu s smernicami SZPV 512 za požarno varnost fotovoltaičnih sistemov.

4.4.1 Strešna podkonstrukcija in fotovoltaični moduli

Postavitev strešne podkonstrukcije je predstavljala tehnično zahteven del montaže, saj je zaradi izpostavljenosti lokacije burji morala zagotavljati izjemno mehansko trdnost ter hkrati ohraniti vodotesnost obstoječe opečne kritine. Klasično dvojno vpetje modulov, ki je standardno za večino fotovoltaičnih instalacij v notranjosti Slovenije, v razmerah Vipavske doline ne zadostuje, saj burja redno dosega hitrosti nad 20 m/s, v koničnih obdobjih pa lahko preseže tudi 40 m/s. (Investitor, 2024) Iz tega razloga smo izbrali trojno vpetje modulov s tremi pritrdilnimi točkami na vsak modul, kar daje

konstrukciji občutno višjo togost in odpornost na dvigovanje pri vzgonskih sunkih vetra.

Strešni nosilci so pritrjeni neposredno na zgornji val obstoječe kritine, ki je izvedena v obliki izolirane aluminijaste pločevine v imitaciji strešnikov. Vsak nosilec je fiksiran z osmimi vijaki, kar je dvakrat več od števila vijakov v klasični izvedbi pri običajnih vetrovnih razmerah. Takšna ojačana fiksacija je bila izbrana zaradi izpostavljenosti lokacije burji in zagotavlja zadostno odpornost konstrukcije na vlečne obremenitve, ki se pri vetrnih sunkih najmočneje izrazijo na zadnji strani modulov. Vijaki so opremljeni s tesnilnimi podložkami, ki ohranjajo vodotesnost kritine na mestih prebojev. Aluminijasta nosilna konstrukcija z ustreznimi profili je zagotovila ravno in stabilno podlago za polaganje modulov ter hkrati omogočila prosto ekspanzijo zaradi temperaturnih sprememb skozi letne čase.

Fotovoltaični moduli so razporejeni v štiri neodvisne nize, ki ustrezajo dvem MPPT vhodom razsmernika. Razporeditev na strehi sledi obliki strešne površine in optimalnemu izkoriščanju razpoložljivega prostora. Vsi moduli so nameščeni z naklonom 15 stopinj in orientacijo proti jugu z rahlim odklonom proti vzhodu, kar je optimalno za doseganje največje letne proizvodnje v razmerah Vipavske doline. Razpored modulov v nizih je takšen, da posamezni nizi tvorijo zaključene celote in omogočajo lažje servisne posege brez vpliva na druge nize.



Slika 10: Montirani PV moduli na strehi
(Lastni vir)

4.4.2 DC ožičenje in modulski optimizatorji

Po postavitvi modulov so bili na vsakem modulu nameščeni modulski optimizatorji Tigo TS4-A-O, ki se pritrdijo neposredno na okvir modula in priključijo na pozitivni in negativni izvod modula preko standardnih konektorjev MC4. Optimizator je bil predhodno parametriran s skenerjem QR kode na ohišju, ki je registriral serijsko

številko v centralni enoti Tigo CCA. Brezžična povezava se vzpostavi avtomatsko po prvem zagonu, kar pomeni, da posebnih naslavljanj med posameznimi optimizatorji ni potrebno izvajati ročno.

DC ožičenje med moduli, optimizatorji in razsmernikom je izvedeno s solarnim kablom H1Z2Z2-K s presekom $1 \times 6 \text{ mm}^2$ za pozitivni in negativni vodnik. Kabel je zaščiten pred UV sevanjem in izveden v dvojnem izolacijskem plašču, ki preprečuje stik s konstrukcijo in obstoječimi kovinskimi elementi strehe. Po strehi je kabel speljan v zaščitni cevi, odporni na UV žarke, na prehodu skozi opaž pa skozi vodotesni prehodni element, ki preprečuje vdor vode v notranjost objekta. V notranjosti se kabli nadaljujejo v kovinski kabelski trasi do razsmernika.

Pri vsakem nizu je na DC strani razsmernika nameščen ločilni element – DC inštalacijski odklopnik z nazivnim tokom 20 A in DC prenapetostni odvodnik tipa 2 z nazivno napetostjo 1000 V, kar je razvidno iz enopolne sheme. Te zaščite omogočajo varno servisno odklopitev posameznega niza in zaščito razsmernika pred prenapetostmi zaradi atmosferskih razelektritev. Ozemljitev nosilne konstrukcije je izvedena s kablom preseka 16 mm^2 in povezana z glavno izenačitvijo potencialov na objektu, kar zagotavlja zaščito pred posrednimi nevarnostmi električnega udara in skladnost s tehnično smernico TSG-N-003.

4.4.3 Razsmernik in baterijski hranilnik

Razsmernik Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4 in baterijski hranilnik z dvema stolpoma sta nameščena v notranji prostor objekta – v posebej pripravljen tehnični prostor v vinski kleti, ki je naravno hladen in ima ustrezno temperaturno območje za optimalno delovanje LiFePO_4 baterij. Razsmernik je pritrjen na steno prek predpisanih sidrišč proizvajalca, pri čemer je bil ohranjen najmanjši predpisani odmik od stropa in stranskih sten zaradi prezračevanja. Naprava ima naravno hlajenje s ventilatorji, ki se aktivirajo glede na obremenitev, zato je zadosten pretok zraka okoli ohišja ključen za zanesljivo delovanje pri visokih obremenitvah.

Baterijski moduli so nameščeni v dveh ločenih stojalih, vsako z desetimi moduli BOS-G-Pack 5.1 in pripadajočo krmilno enoto BOS-G-PDU-2. Moduli so med seboj povezani z visokonapetostnimi DC vodniki in s komunikacijskim vodilom, ki povezuje BMS sistem vsakega modula s krmilno enoto stolpa in nato z razsmernikom. Pri vstavljanju modulov je bilo treba upoštevati njihovo težo (46 kg na modul) in pravilno zaporedje sestave od spodaj navzgor v stojalu. Vsak stolp je opremljen z lastnim glavnim ločilnim stikalom in DC inštalacijskim odklopnikom, kar omogoča neodvisno servisno odklopljanje brez vpliva na drugi stolp.

Komunikacijske povezave med razsmernikom in baterijskimi stolpi potekajo prek UTP kabla z RJ45 konektorji, ki prenaša signale BMS sistema po protokolu CAN. Po prvem

zagonu je razsmernik samodejno prepoznal oba baterijska stoka in vzpostavil komunikacijo z njihovimi krmilnimi enotami, kar je razvidno iz logov v aplikaciji Deye Cloud. Inicializacija je vključevala usklajitev parametrov polnjenja in praznjenja, kalibracijo SOC-a in preverjanje delovanja zaščitnih funkcij vsakega modula.



*Slika 11: Deye sistem z AC/DC zaščitami
(Lastni vir)*

4.4.4 Ločilno mesto in povezava s priključno-merilno omarico

Ločilno mesto je izvedeno v ločeni omarici, ki je nameščena ob razsmerniku in vsebuje vso opremo iz 4.3.2: U-F rele DOLD RP9811, krmilna kontaktorja, glavni močnostni kontaktor Schneider LC1 D95, varovalke krmilnega tokokroga in ročno ločilno stikalo. Omarica je izvedena v zaščitnem razredu IP42 in označena v skladu z zahtevami za samostojno razdelilno omaro z električnimi napravami nad 1 kW. Notranji vodniki krmilnega tokokroga so dimenzionirani z minimalnim presekom 1,5

mm², močnostni vodniki pa s presekom 25 mm², kar ustreza nazivnemu izhodnemu toku razsmernika.

Povezava med ločilnim mestom in obstoječo priključno-merilno omarico (PMO) je izvedena s kablom RV-K 5 × 25 mm² Cu. Kabel je položen v zemeljski cevi kletnega prostora in povezan z razdelilno omarico samooskrbe (+SO1), iz katere se napaja vinska klet. V priključno-merilni omarici je bila ob montaži zamenjana glavna varovalka in posodobljena oznaka odjemnega mesta v skladu z novim soglasjem za priključitev. Tehnične spremembe na priključno-merilni omarici je v skladu s pristojnostmi izvedel distribucijski operater Elektro Primorska, ki je tudi opravil prvi pregled priključka in formalno izdal dovoljenje za začetek obratovanja.

Po končani montaži je bilo izvedeno celotno preverjanje povezav in funkcionalno testiranje vsake komponente posebej, preden se je sistem priključil na omrežje. Postopek zagona in funkcionalnega testiranja je opisan v naslednjem podpoglavju.

4.5 U-F rele DOLD RP9811

Ločilno mesto je sklop naprav, ki samodejno loči proizvodno napravo od distribucijskega omrežja v primeru odstopanj napetosti ali frekvence zunaj dovoljenih meja. Pri sistemih, katerih skupna delovna moč presega 30 kW, sistemska obratovalna navodila SONDSEE in standard SIST EN 50549-1 zahtevajo izvedbo ločilnega mesta v shemi Uf-A, ki vsebuje neodvisni U-F rele kot zaščitno enoto. Naloga ločilnega mesta je dvojna: ščiti distribucijsko omrežje pred neželenim oddajanjem energije v primeru izpada omrežja (otočno obratovanje) in ščiti proizvodno napravo pred poškodbami zaradi napetostnih ali frekvenčnih nepravilnosti v omrežju. (DOLD, 2023a).

V obravnavanem sistemu je vlogo zaščitne enote prevzel U-F rele DOLD RP9811, ki je univerzalna naprava za nadzor napetosti in frekvence v trifaznih omrežjih. Rele je nameščen v razdelilni omarici kleti skupaj s krmilnim in močnostnim sklopom, ki sta neposredno povezana z izhodi razsmernika. Konfiguracija celotnega ločilnega mesta sledi shemi Uf-A z dvojno krmilno zanko, kar zagotavlja redundantnost zaščite v primeru odpovedi posameznega elementa.

Rele neprekinjeno meri tri fazne napetosti L1, L2 in L3 ter omrežno frekvenco. Pri merjenju napetosti izvaja štiristopenjsko zaščito s pragovi $U>$, $U>>$, $U<$ in $U<<$, kar pomeni dvojno nadnapetostno in dvojno podnapetostno zaščito z ločenimi pragovi proženja in izklopnimi časi. Pri merjenju frekvence izvaja dvostopenjsko zaščito s pragovi $f>$ in $f<$ (DOLD, 2023a). Pragovi so nastavljivi v širokem razponu, kar omogoča prilagoditev zahtevam soglasja za priključitev. Distribucijski operater Elektro Primorska je v soglasju za priključitev številka 1457986 določil naslednje vrednosti pragov in izklopnih časov:

- napetostna zaščita prve stopnje ($U>$): 110 % nazivne napetosti, izklopni čas 2 sekundi;
- napetostna zaščita druge stopnje ($U>>$): 115 % nazivne napetosti, izklopni čas 0,2 sekunde;
- napetostna zaščita prve stopnje ($U<$): 90 % nazivne napetosti, izklopni čas 2 sekundi;
- napetostna zaščita druge stopnje ($U<<$): 70 % nazivne napetosti, izklopni čas 0,2 sekunde;
- frekvenčna nadtočka ($f>$): 50,10 Hz, izklopni čas 0,2 sekunde;
- frekvenčna podtočka ($f<$): 49,80 Hz, izklopni čas 0,2 sekunde;
- čas avtomatskega ponovnega vklopa (APV): 60 sekund.

Pragovi so izbrani v skladu z razredom proizvodne naprave tipa A iz sistemskih obratovalnih navodil SONDSEE. Dvojna stopnja zaščite zagotavlja, da pri manjših in dolgotrajnejših odstopanjih sistem dovoljuje selektivno proženje s časovnim zamikom 2 sekundi, pri večjih in nevarnejših odstopanjih pa hitri izklop v 0,2 sekunde. Frekvenčni pragovi sledijo evropski praksi za nizkonapetostne sisteme in zagotavljajo, da proizvodna naprava ne poskuša obratovati v omrežju, kjer je sistemska frekvenca zunaj varnih meja (SODO, 2021).

Krmilni del ločilnega mesta je izveden z dvema krmilnima kontaktorjema -K2 in -K3, ki sta povezana zaporedno in tvorita varnostno zanko med U-F relejem in glavnim močnostnim kontaktorjem -K1. Tak način vezave je značilen za shemo Uf-A in zagotavlja, da mora biti za sklenitev močnostnega stikala izpolnjen pogoj sočasne aktivacije obeh krmilnih kontaktov. Ob napaki katerega koli kontakta v zanki – ne glede na to, ali gre za napako kontakta v releju, krmilnem kontaktorju ali povezavi med njimi – se glavno stikalo -K1 samodejno odpre in razsmernik se loči od distribucijskega omrežja. Krmilni tokokrog je varovan z inštalacijskim odklopnikom -F1 nazivnega toka 6 A, ki zagotavlja zanesljivo delovanje tudi v primeru kratkega stika v krmilnih povezavah.

Glavni močnostni kontaktor -K1 je izveden s kontaktorjem Schneider LC1 D95 z nazivnim tokom 95 A. Kontaktor v aktivnem stanju prenaša celotno trifazno moč iz razsmernika v razdelilno omarico samooskrbe, ob proženju zaščite pa preklopi v stanje izklopa in v kratkem času loči razsmernik od omrežja. Izklopni čas kontaktorja, skupaj z odzivnim časom U-F releja in zakasnitvijo krmilnih kontaktorjev, daje skupni izklopni čas ločilnega mesta, ki ustreza zahtevam standarda SIST EN 50549-1 (SIST, 2019).



*Slika 12: Fizična vezava U-F releja
(Lastni vir)*

Pred predajo sistema v obratovanje je bil opravljen obvezen pregled in preizkus ločilnega mesta, ki ga je 25. julija 2024 izvedel pooblaščen preglednik. Preizkus je bil opravljen z merilnim inštrumentom Omicron CMC 256-6, ki je certificiran za preverjanje zaščitnih relejev v energetskih sistemih in ima sledljivo umerjanje skladno s standardom ISO 9001. Pri preizkusu so bili sistematično preverjeni vsi pragovi proženja in izklopni časi za vsako fazo posebej, kar je razvidno iz uradnega merilnega poročila številka 2024/128 (Pooblaščen merilec, 2024).

Rezultati meritev so potrdili pravilno delovanje vseh zaščitnih funkcij. Pri prenapetostni zaščiti prve stopnje so bili izmerjeni izklopni časi 2,02 sekunde za vse tri faze pri pragu vzbuditve 257 V, kar je v okviru tolerance projektiranih 2 sekund pri 110 % nazivne napetosti. Pri prenapetostni zaščiti druge stopnje so bili izmerjeni izklopni časi 0,21 sekunde pri pragu vzbuditve 265 V, kar prav tako ustreza projektirani vrednosti 0,2 sekunde pri 115 % nazivne napetosti. Podnapetostna zaščita prve stopnje se je sprožila pri 196 V z izklopnim časom 2,03 sekunde, druga stopnja pa pri 161 V z izklopnim časom 0,21 sekunde, oboje v okviru tolerance projektiranih vrednosti. Pri frekvenčni nadtočki je bil izmerjen izklopni čas 0,22 sekunde pri pragu 52,01 Hz, pri frekvenčni podtočki pa 0,21 sekunde pri pragu 47,00 Hz. Avtomatski ponovni vklop je bil potrjen pri 60 sekundah, blokada vklopa in ročni izklop ločilnega mesta pa sta delovala brez napak (Pooblaščen merilec, 2024).

Sklepna ugotovitev merilnega poročila se glasi, da so bile zaščitne naprave pravilno umerjene in preizkušene na zapisane vrednosti ter da delujejo skladno z zahtevami sheme Uf-A. Ločilno stikalo je v vseh testnih scenarijih pravilno izklopilo ob delovanju zaščit. Pooblaščen preglednik je določil tudi termin naslednjega obveznega

periodičnega pregleda, ki bo izveden pred 1. avgustom 2026, kar ustreza priporočeni dveletni periodi za sisteme te kategorije (Pooblaščen merilec, 2024).

Z uspešnim opravljenim preizkusom ločilnega mesta je bil izpolnjen ključni pogoj distribucijskega operaterja za izdajo dovoljenja za priklop sistema na distribucijsko omrežje. Merilno poročilo je sestavni del projektne dokumentacije izvedenih del in se hrani v dokumentaciji uporabnika ter pri distribucijskem operaterju kot dokaz skladnosti sistema z veljavnimi predpisi.

4.6 Zagon in testiranje sistema

Postopek zagona hibridnega sistema je bil izveden v jasno zaporedju korakov, ki zagotavlja varnost obratovalnega osebja in pravilno postopno preverjanje vsake komponente pred priklopom celotnega sistema na distribucijsko omrežje. Zagon je sledil priporočilom proizvajalca razsmernika in vključeval kontrolne preglede, meritve in preizkuse delovanja v vsakem od štirih segmentov sistema: enosmerni del s fotovoltaičnimi moduli, baterijski del, izmenični del z razsmernikom in ločilno mesto.

Pred prvim zagonom je bil opravljen vizualni pregled celotne instalacije. Preverili smo pravilno povezavo vseh kablov, ujemanje z enopolno shemo, ustreznost dimenzij varovalk in odklopnikov, pravilno zategnjenost vseh vijačnih spojev v razdelilnih omaricah, prisotnost in pravilno označitev ozemljitvenih povezav ter splošno stanje opreme. Posebna pozornost je bila namenjena DC strani sistema, kjer je napetost ob brezvetrju in soncu lahko presegla 850 V DC, kar predstavlja resno nevarnost za neusposobljene posege. Vsi optimizatorji Tigo TS4-A-O so bili na začetku preverjenega zagona v stanju hitrega izklopa, kar pomeni, da je bila izhodna napetost vsakega fotovoltaičnega modula 1 VDC.

Po zaključenem vizualnem pregledu je bila opravljena meritev izolacijske upornosti DC vodov. Meritev je bila opravljena pri napetosti 1000 V med pozitivnim in negativnim vodnikom ter med posameznim vodnikom in ozemljitvijo. Izmerjene vrednosti so morale biti večje od 1 M Ω , kar je standardna mejna vrednost za nove fotovoltaične instalacije. Pri obravnavanem sistemu so vse meritve pokazale vrednosti nad 200 M Ω , kar potrjuje pravilno izvedeno izolacijo in odsotnost napak v izolacijskem materialu kablov ali konektorjev (Pooblaščen merilec, 2024).

Naslednji korak je bilo polnjenje baterijskega hranilnika in inicializacija sistema BMS. Po vklopu glavnega DC stikala vsakega baterijskega sklopa je razsmernik prek komunikacijskega vodila CAN samodejno prepoznal sklope in vzpostavil komunikacijo s krmilnimi enotami BOS-G-PDU-2. Razsmernik je nato izvedel postopek mehkega zagona s počasnim dvigovanjem napetosti, da se izogne udaru toka v začetni fazi. Po vzpostavljeni komunikaciji je BMS sistem za upravljanje baterij prikazal začetno stanje napolnjenosti vsakega modula, napetost in temperaturo celic

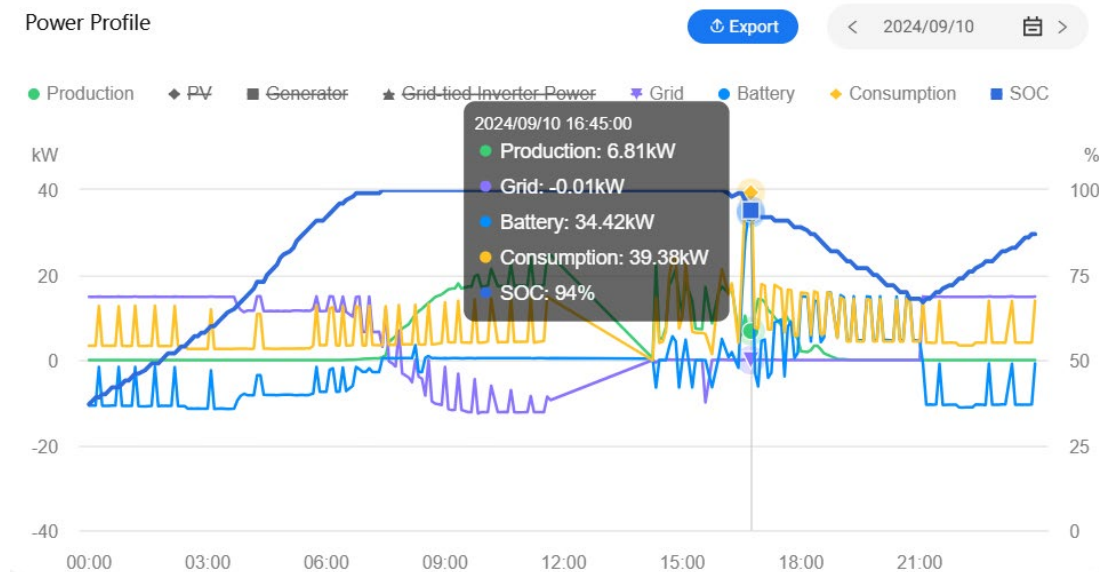
ter pravilno delovanje izenačevanja napetosti med celicami. Pri prvem zagonu je bilo stanje napolnjenosti baterij na okoli 50 odstotkov, kar je standardno transportno stanje, in sistem je samodejno pričel z mirnim polnjenjem do dosega obratovalne ravni.

Zagon razsmernika je vključeval konfiguracijo osnovnih obratovalnih parametrov preko zaslona naprave in aplikacije Deye Cloud. Med konfiguriranimi parametri so bili: nastavitev standarda omrežja SIST EN 50549-1, način obratovanja (mešani, paralelno z distribucijskim sistemom za lastne potrebe in oddajo), nastavitev kompenzacije jalove moči na $\cos \varphi = 0,95$, omejitev oddaje moči v omrežje na 13,6 kW skladno s soglasjem za priključitev, omejitev odjema iz omrežja v skladu s priključno močjo 17 kW in nastavitev krivulj $Q(U)$ in $Q(P)$ za regulacijo jalove moči. V prvotni izvedbi sistema je bil za merjenje pretoka moči na priključnem mestu uporabljen sklop tokovnikov, ki so neprekinjeno spremljali tokove v vseh treh fazah in podatke posredovali razsmerniku.

Po končani konfiguraciji razsmernika in baterij smo pred priklopom na distribucijsko omrežje preverili delovanje ločilnega mesta. Preverjanje je vključilo simulacijo proženja napetostne in frekvenčne zaščite z merilnim inštrumentom Omicron CMC 256-6, ki je opisana v Poglavju 4.5. Po uspešnem preizkusu zaščitnih funkcij je bilo ločilno stikalo -K1 sklenjeno in razsmernik se je sinhroniziral z napetostjo in frekvenco distribucijskega omrežja. Sinhronizacija je potekala v krajšem času od ene minute, kar potrjuje, da napetost in frekvenca omrežja v trenutku zagona niso odstopali izven dovoljenih meja.

Po sinhronizaciji z omrežjem je sistem prešel v normalni obratovalni način. Razsmernik je pričel sprejemati moč iz fotovoltaičnih modulov in jo pretvarjati v izmenični tok za napajanje porabnikov in polnjenje hranilnika. V prvih urah obratovanja smo spremljali pretok moči prek aplikacije Deye Cloud in preverjali, ali sistem deluje skladno s pričakovanji. Pri tem smo opazovali predvsem štiri ključne parametre: trenutno proizvodnjo iz fotovoltaičnih modulov, trenutni odjem iz omrežja, trenutno polnjenje oziroma praznjenje hranilnika in trenutno porabo objekta. Vrednosti so se medsebojno usklajevale tako, da je njihov seštevek v vsakem trenutku ustrezal energijski bilanci sistema.

Test peak shavinga je bil izveden z umetno povzročeno konično obremenitvijo, kjer smo s hkratnim zagonom več tehnoloških naprav vinarne ustvarili obremenitev nad 35 kW. Razsmernik je samodejno aktiviral hranilnik in razliko med dejansko porabo ter dovoljeno priključno močjo pokrival iz baterije. Odjem iz omrežja je v koničnem trenutku ostal pod 17 kW, kar je razvidno iz beleženja podatkov v aplikaciji Deye Cloud. Reakcijski čas razsmernika ob nastopu konice je bil krajši od ene sekunde, kar potrjuje pravilno delovanje algoritma peak shavinga pri delovni moči.



*Slika 13: Začetna faza testiranja – zagon vseh strojev pri porabi 40 kW
(Vir: Deye Cloud, 2024)*

Po končanem zagonu in osnovnih preizkusih je bila izvedena daljša obratovalna preizkusna doba, v kateri smo spremljali sistem v različnih obratovalnih razmerah – pri visoki sončni proizvodnji, ob slabem vremenu, pri koničnih obremenitvah vinarske tehnologije in pri običajni dnevni porabi. Sistem je v večini razmer deloval stabilno in skladno s projektiranimi parametri pri merjenju delovne moči.

V daljšem obratovalnem obdobju pa so se začele pojavljati težave, povezane s pojavom jalove moči v omrežju in z natančnostjo merjenja, ki jo zagotavljajo vgrajeni tokovniki. Te težave so občasno povzročale neustrezne meritve (tokovniki ne zaznajo jalove moči) in izklapljanje obračunskega števca, kar je zahtevalo dodatne posege v sistem in vgradnjo dodatnega merilnega elementa Smart Energy Meter.

Reševanje teh tehničnih izzivov, identifikacija njihovih vzrokov, izbrane rešitve in njihova izvedba so podrobno obravnavani v naslednjem podpoglavju.

4.7 Reševanje tehničnih izzivov

V daljšem obratovalnem obdobju po zagonu so se pojavili trije medsebojno povezani tehnični izzivi, ki so zahtevali dodatne posege v sistem in dopolnitev prvotne instalacije. Prvi izziv se je nanašal na natančnost merjenja moči s prvotno vgrajenimi tokovniki, drugi na pojav jalove moči v omrežju in posledično občasno izklapljanje obračunskega števca, tretji pa na potrebo po centralnem merilnem elementu, ki bi razsmerniku posredoval točne podatke o pretoku energije na priključnem mestu. Vsi trije izzivi so bili rešeni z vgradnjo Smart Energy Metra v kombinaciji s prilagoditvami nastavitvev razsmernika.

4.7.1 Tolerance in pomanjkljivosti vgrajenih tokovnikov

V prvotni izvedbi sistema je bilo merjenje pretoka moči na priključnem mestu izvedeno s sklopom treh tokovnikov, po enega na vsako fazo. Tokovniki so neprekinjeno merili tokove v vseh treh fazah in pretvarjali izmerjene vrednosti v signale, ki jih je razsmernik uporabljal za regulacijo peak shavinga. Tak način merjenja je tehnično preprost in cenovno ugoden, vendar je ob praktičnem obratovanju pokazal pomembne pomanjkljivosti.

Glavna pomanjkljivost tokovnikov je v tem, da merijo le velikost toka, ne pa tudi njegove fazne razlike glede na napetost. Pri izračunu moči razsmernik tokovniško izmerjeno vrednost množi z napetostjo, kar daje točen rezultat le pri čisto delovni obremenitvi s faktorjem moči 1. Pri industrijskih bremenih z izrazito induktivno komponento, kakršna so vinarske naprave s hladilnimi kompresorji in motorji preš, je faktor moči pogosto v območju 0,7 do 0,85, kar pomeni, da se večji del izmerjenega toka pretvarja kot jalova in ne delovna komponenta (Bastian, 2013). Tokovniki te razlike ne razpoznajo in razsmernik na tej podlagi sprejema napačne odločitve glede aktivacije hranilnika.

Posledica te tehnične omejitve je dvojna. Prva posledica je, da razsmernik pri industrijskih bremenih z nizkim faktorjem moči preceni dejansko delovno porabo in po nepotrebnem aktivira hranilnik tudi v razmerah, ko bi omrežje samo zlahka pokrilo trenutno delovno porabo. Druga posledica je, da v koničnih obdobjih z velikim deležem jalove moči razsmernik ne razpozna pravilno, kdaj se priključni odjem približuje meji 17 kW, kar lahko vodi v prekoračenje dovoljene priključne moči in proženje omejevalca toka. Obe posledici sta povzročali nestabilno obratovanje sistema in nezadovoljstvo uporabnika zaradi pogostih izpadov proizvodnje.

Toleranca tokovnikov sama po sebi prav tako ni bila zanemarljiva. Tipični tokovniki za sisteme te kategorije imajo natančnost meritve okoli 1 odstotka pri nazivni vrednosti tokovnika (v našem primeru 350 A). V obdobjih, ko je dejanski odjem objekta blizu meje priključne moči, je razlika med izmerjeno in dejansko vrednostjo lahko presegala 1,5 kW, kar je v razmerju do priključne moči 17 kW pomembna napaka.

4.7.2 Pojav jalove moči in izklapljanje obračunskega števca

Druga skupina težav se je pojavila zaradi neustrezne kompenzacije jalove moči v sistemu. Razsmernik Deye je bil pri zagonu nastavljen za kompenzacijo jalove moči na $\cos \varphi = 0,95$, kar je zahteva iz soglasja za priključitev, vendar je to nastavitev izvajal le na strani lastne proizvodnje. Jalova energija, ki so jo proizvajala industrijska bremena vinarne, je še vedno tekla skozi obračunski števec proti distribucijskemu omrežju, kjer je bila zaznana kot prejeta energija nad dovoljenimi mejami.

Pri obravnavanem sistemu je obračunski števec pri večjih količinah jalove energije, ki je v nekaterih trenutkih tekla iz razsmernika v omrežje, sproščal začasne izklope, ki so motili obratovanje proizvodne linije vinarne. Ti izklopi so bili posebej moteči v koničnih obdobjih predelovalne sezone, ko je bila stabilnost napajanja ključna za pravilen potek tehnoloških procesov.

Vzrok te težave je bil prepleten. Po eni strani so bremena vinarne v obdobjih obratovanja kompresorjev in motorjev močno induktivna in neposredno generirajo jalovo moč. Po drugi strani razsmernik s prvotno konfiguracijo te jalove moči ni kompenziral, ker je bil njegov regulacijski algoritem usmerjen le v lastno proizvodnjo in ne v celoten pretok moči na priključnem mestu. Pomanjkanje natančnih podatkov o pretoku moči s strani tokovnikov je še dodatno otežilo, da bi razsmernik pravilno reguliral kompenzacijo.

4.7.3 Vgradnja Smart Energy Metra in prilagoditev nastavitvev

Rešitev opisanih izzivov je bila izvedena z vgradnjo Smart Energy Metra na priključno mesto in z ustreznimi prilagoditvami nastavitvev razsmernika. Smart Energy Meter je naprednejši merilni instrument, ki razlikuje med delovno in jalovo komponento moči ter natančno meri faktor moči v vseh treh fazah. Naprava je nameščena na začetku napajalne verige, takoj za priključno-merilno omarico, in spremlja celoten pretok energije med distribucijskim omrežjem in objektom – torej energijo, ki jo objekt prejema iz omrežja, in energijo, ki jo morebiti oddaja v omrežje.

Smart Energy Meter komunicira z razsmernikom Deye preko vmesnika RS485 v protokolu Modbus. Razsmernik na podlagi natančnih podatkov iz Smart Energy Metra v realnem času ugotavlja, kakšen je delovni pretok moči na priključnem mestu in kakšna je trenutna potreba po kompenzaciji jalove moči. To je razsmerniku omogočilo, da je svojo regulacijsko strategijo razširil iz lastne proizvodnje na celoten energijski pretok pri uporabniku in se začel obnašati kot aktivni regulator faktorja moči za celoten objekt.

Po vgradnji Smart Energy Metra in prilagoditvi parametrov je razsmernik samodejno generiral jalovo komponento toka v takšnem faznem razmerju glede na napetost, da se skupna jalova energija, ki teče skozi obračunski števec proti omrežju, ohranja v okviru zahtevanih meja $\cos \varphi = 0,95$. To pomeni, da razsmernik aktivno kompenzira jalovo moč induktivnih bremen vinarne s svojo obratno jalovo komponento, kar je tehnologija, ki jo standard SIST EN 50549-1 ureja s krivuljama $Q(U)$ in $Q(P)$. (SIST, 2019)

Hkrati je natančna meritev s Smart Energy Metrom odpravila tudi prvi del problema – toleranco prvotnih tokovnikov. Razsmernik je z natančnimi podatki o trenutnem delovnem in jalovem pretoku moči lahko bistveno bolj natančno reguliral peak shaving

in zagotovil, da odjem iz omrežja v koničnih trenutkih ne preseže priključne moči 17 kW. Posredno to pomeni tudi, da hranilnik ni nepotrebno aktiviran v razmerah, ko bi omrežje samo lahko pokrilo trenutno porabo, kar pozitivno vpliva na število ciklov polnjenja in praznjenja in s tem na življenjsko dobo baterijskih modulov.

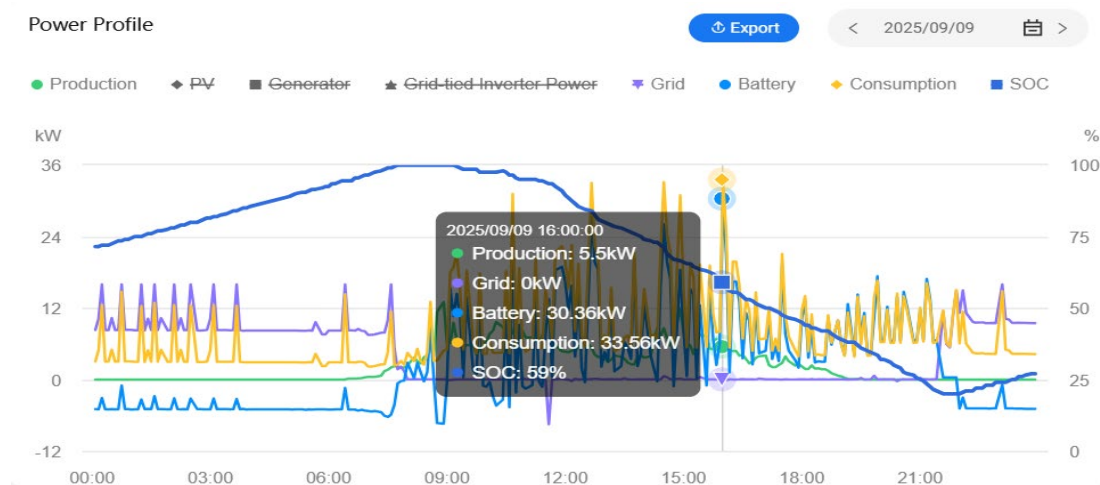
Po izvedeni nadgradnji se je obratovanje sistema stabiliziralo. Občasni izklopi obračunskega števca zaradi presežene jalove energije so prenehali, peak shaving je deloval natančneje in zanesljiveje, faktor moči na priključnem mestu pa se je ohranjal v okviru $\cos \varphi = 0,95$, kot zahteva soglasje za priključitev. Nadgradnja je tudi pokazala, da uporaba sodobnih merilnih instrumentov v hibridnih sistemih ni le priporočena, temveč nujna za zanesljivo obratovanje pri industrijskih bremenih z izrazito induktivno komponento.



Slika 14: Smart Energy Meter Eastron
(Vir: Eastron Europe, 2026)

4.7.4 Druge manjše prilagoditve

Poleg vgradnje Smart Energy Metra so bile izvedene še nekatere manjše prilagoditve, ki so prispevale k stabilnejšemu obratovanju sistema. Med njimi je bila optimizacija strategije polnjenja hranilnika, kjer smo dovolili tudi nočno polnjenje iz omrežja v obdobju nizke tarife, da je hranilnik vedno dovolj napolnjen za pokrivanje koničnih obremenitev v jutranjih urah, ko fotovoltaična proizvodnja še ne dosega zadostnih moči. Druga prilagoditev je bila nastavitev pragov in časovnih oken za peak shaving, ki je bila prilagojena dejanskemu obremenitvenemu profilu vinarne in tako zagotovila optimalno izkoriščanje hranilnika.



Slika 15: Stabilno delovanje sistema 2025
(Vir: Deye Cloud, 2025)

5 KOMENTAR IN ZAKLJUČEK

Diplomska naloga je obravnavala konkretni primer reševanja problema omejene priključne moči na kmetijsko-predelovalnem obratu s pomočjo hibridnega fotovoltaičnega sistema. Obravnavana vinarna v Vipavski dolini je predstavljala tipičen primer objekta, kjer priključna moč distribucijskega omrežja ne zadošča sodobnim tehnološkim potrebam, hkrati pa klasična pot povečanja priključne moči zaradi tehničnih, časovnih in finančnih razlogov ni bila izvedljiva. Iz tega izhodišča smo izpeljali tehnično rešitev, ki je problem reševala z drugačnim pristopom – z dvigom razpoložljive moči objekta s pomočjo lokalnega energetskega sistema.

V prvem delu naloge smo analizirali tehnično ozadje problema. Pokazali smo, da priključna moč in razpoložljiva moč nista isti pojem, in da je razlika med njima ključna za razumevanje rešitve. Priključna moč objekta je določena z omejevalcem toka v priključno-merilni omarici in se v obravnavanem primeru ni dala povečati brez sistemskih posegov v distribucijsko omrežje. Razpoložljiva moč pa se lahko poveča s postavitvijo lokalnega proizvodnega vira in baterijskega hranilnika, ki v koničnih obdobjih iz svoje rezerve dopolnjuje omrežno moč. Ta tehnika, znana kot peak shaving, je v jedru obravnavane rešitve.

V teoretičnem delu smo predstavili sestavne dele hibridne sončne elektrarne in razložili, zakaj prav baterijski hranilnik prevzema osrednjo vlogo pri reševanju problema razpoložljive moči, medtem ko fotovoltaična proizvodnja deluje predvsem kot vir za polnjenje hranilnika in za zmanjšanje neto porabe iz omrežja. Posebej smo izpostavili pomembne vidike izbire baterijske tehnologije LiFePO_4 , ki zaradi termične stabilnosti, dolge življenjske dobe in sposobnosti hitrega praznjenja predstavlja primerno izbiro za industrijske hranilnike. Obravnavali smo tudi zahteve standarda SIST EN 50549-1, sistemska obratovalna navodila SONDSEE in tehnične smernice TSG-N-002 ter TSG-N-003, ki urejajo priklop proizvodnih naprav na nizkonapetostno distribucijsko omrežje, ter smernice SZPV 512 za požarno varnost fotovoltaičnih sistemov.

V praktičnem delu smo predstavili konkretno izvedbo sistema. Hibridni sistem je sestavljen iz fotovoltaičnih modulov skupne moči 34 kWp, trifaznega hibridnega razsmernika nazivne navidezne moči 50 kVA in baterijskega hranilnika nazivne kapacitete 102,4 kWh. Vse komponente so med seboj povezane v enoten sistem, ki sprotno usklajuje pretok energije med viri in porabniki. Zasnova sistema je sledila tehničnim zahtevam projekta in zahtevam distribucijskega operaterja iz soglasja za priključitev številka 1457986. Uporabili smo trojno vpetje fotovoltaičnih modulov z osmimi vijaki na nosilec, kar je dvakratno število v primerjavi s standardno izvedbo in zagotavlja varnost konstrukcije pri burji v Vipavski dolini.

Pri ločilnem mestu smo izvedli shemo Uf-A z U-F relejem DOLD RP9811, ki neprekinjeno spremlja napetost in frekvenco na priključnem mestu in v primeru odstopanj samodejno loči razsmernik od distribucijskega omrežja. Pravilnost izvedbe je bila preverjena z neodvisnim merilnim preizkusom, ki ga je opravil pooblaščen preglednik. Vsi merjeni pragovi proženja in izklopni časi so se ujemali s projektiranimi vrednostmi v okviru predpisanih toleranc, kar je razvidno iz uradnega merilnega poročila.

Med obratovanjem so se pokazali trije medsebojno povezani tehnični izzivi, ki jih je bilo treba rešiti za zagotavljanje stabilnega delovanja sistema. Prvi izziv je bil povezan s prvotno vgrajenimi tokovniki, ki niso pravilno razpoznavali jalove komponente moči, drugi z neustrezno kompenzacijo jalove moči bremen, tretji pa s posledičnim občasnim izklapljanjem obračunskega števca zaradi prevelike jalove energije, ki je tekla skozi merilno mesto. Vsi trije izzivi so bili rešeni z vgradnjo Smart Energy Metra, ki je razsmerniku omogočil natančno spremljanje pretoka moči in aktivno regulacijo faktorja moči za celoten objekt. Po nadgradnji se je obratovanje sistema stabiliziralo, izklopi obračunskega števca pa so prenehali.

Predpostavke, ki smo jih postavili v Poglavju 1.4, so se v praksi izkazale za pravilne. Sistem dejansko zagotavlja kratkotrajno razpoložljivo moč do 50 kW kljub priključni moči 17 kW, baterijska tehnologija LiFePO_4 se je izkazala kot zanesljiva izbira za industrijsko uporabo, oprema ločilnega mesta z U-F relejem DOLD RP9811 izpolnjuje zahteve sheme Uf-A in vse zahteve distribucijskega operaterja, kompenzacija jalove moči na $\cos \varphi = 0,95$ pa se po dograditvi Smart Energy Metra izvaja dosledno. Tudi omejitve raziskave, kot smo jih opredelili na začetku, ostajajo veljavne – rezultati naloge se nanašajo na konkreten projekt in jih ni mogoče neposredno prenašati na druge objekte z drugačno strukturo odjema ali drugačnimi omrežnimi razmerami.

Iz izvedbe in obratovanja sistema lahko izpeljemo nekaj splošnih ugotovitev, ki presegajo okvir posameznega projekta. Prva ugotovitev je, da hibridni sistemi predstavljajo tehnično, ekonomsko in časovno ustrezno alternativo klasičnemu povečevanju priključne moči, zlasti v ruralnih in vinorodnih območjih, kjer distribucijsko omrežje ni dimenzionirano za sodobne visoke obremenitve. Druga ugotovitev je, da pravilna izbira merilne opreme ni le priporočljiva, temveč nujna za zanesljivo obratovanje hibridnih sistemov pri industrijskih bremenih. Smart Energy Meter kot napreden merilni instrument je v sistemih s trifaznimi industrijskimi porabniki bistvena nadgradnja prvotne instalacije s tokovniki, saj omogoča natančno regulacijo tako delovne kot jalove moči.

Tretja ugotovitev je, da je hibridni sistem tehnični objekt, ki zahteva začetno postavitve in nato trajno spremljanje ter prilagajanje delovanja. Začetne nastavitve, ki temeljijo na projektnih predpostavkah, se v realnih obratovalnih razmerah vedno nekoliko prilagodijo specifičnostim posameznega uporabnika. Sposobnost izvajalca, da te

prilagoditve identificira in pravilno izvede, je ključna za dolgoročno uspešnost sistema in zadovoljstvo uporabnika. Iz obravnavanega primera izhaja, da naročnik tovrstnega sistema ne pridobi le opreme, temveč tudi tehnično podporo v daljšem časovnem obdobju.

Diplomska naloga je s podrobnim prikazom konkretnega primera pokazala, kako se sodobne tehnologije fotovoltaike, hibridnih razsmernikov in baterijskih hranilnikov povezujejo v rešitev specifičnega problema pomanjkanja odjemne moči objektov v vsakdanji praksi. Predstavljena rešitev je primer dobre prakse, ki ga je mogoče prenesti tudi na druge industrijske in obrtne objekte v podobnih okoliščinah – povsod tam, kjer obstaja neskladje med priključno močjo iz distribucijskega omrežja in dejanskimi koničnimi potrebami proizvodnega procesa. Z razvojem tehnologije in nižanjem stroškov baterijskih hranilnikov se področje uporabe takšnih sistemov tudi v prihodnje pričakovano širi, kar prispeva k razogljičenju proizvodnih procesov in večji energetski neodvisnosti gospodarskih subjektov.

6 LITERATURA IN VIRI

Bastian, P. (ur.). (2013). *Elektrotehniški priročnik*. Tehniška založba Slovenije.

Ažbe, T. (2025). *Požarnovarnostni izzivi sončnih elektrarn in baterijskih hranilnikov električne energije*. *Elektrotehniška revija*, 9(1). Pridobljeno 2. 5. 2026 z naslova <https://elektrotehniska-revija.si/pozarnovarnostni-izzivi-soncnih-elektrarn-in-hranilnikov/>

Deye. (2023). *Three Phase Hybrid Inverter SUN-29.9/30/35/40/50K-SG01HP3-EU-BM3/BM4: Technical datasheet*. Pridobljeno 2. 5. 2026 z naslova https://www.deyeinverter.com/deyeinverter/2023/12/18/datasheet_sun-29.9-50k-sg01hp3-eu-bm4_231218_en.pdf

Deye. (2024a). *Three Phase Hybrid Inverter SUN-25/30/40/50K-SG01HP3-EU-BM2/3/4: Hybrid Inverter — User Manual*. Pridobljeno 2. 5. 2026 z naslova https://www.deyeinverter.com/deyeinverter/2024/02/03/rand/1198/instructions_sun-29.9-50k-sg01hp3-eu-bm4_240203_en.pdf

Deye. (2024b). *Rack-Mounted Battery (HV) BOS-G Pro Series: Brochure*. Pridobljeno 2. 5. 2026 z naslova <https://www.deyeinverter.com>

Deye Cloud (2024). *Obratovalni podatki sistema MFE Vinarna Vipava iz aplikacije Deye Cloud*. Ljubljana: Velog d.o.o. Pridobljeno 2.5.2026 z naslova <https://www.deyecloud.com/station/new-main?t=1780841316478&id=61107147>

Deye inverter. (2024). *SUN-29.9/30/35/40/50K-SG01HP3-EU-BM3/BM4* Pridobljeno 2.5. 2026 z naslova <https://www.deyeinverter.com/product/three-phase-high-voltage-hybrid-inverter/sun29-9-30-35-40-50ksg01hp3eubm3-4-29-950kw-three-phase-2-3-4-mppt-hybrid-inverter-hv-battery-supported-339.html>

DOLD. (2023a). *Spannungs- und Frequenzwächter RP 9811: Technische Daten und Bedienungsanleitung*. Pridobljeno 2. 5. 2026 z naslova https://www.dold.com/media/pdf/c3/51/85/RP9811_en.pdf

DOLD. (2023b). *VARIMETER NA — Measuring relays for power generation systems*. Furtwangen: Pridobljeno 2. 5. 2026 z naslova <https://www.dold.com/en/products/relay-modules/monitoring-devices/measuring-relays-monitoring-relays/measuring-relays-for-power-generation-systems/>

Eastron Europe (2026). *SDM630 Series*. Pridobljeno 7. 6. 2026 z naslova <https://www.eastroneurope.com/products/view/sdm630modbus>

Elektro Primorska, d.d. (2024). *Soglasje za priključitev št. 1457986 (EVPrik-6156/2023) za individualno samooskrbo, vinska klet Vipava*. Nova Gorica: Elektro Primorska, d.d.

Pooblaščen merilec (2024). *Merilno poročilo o pregledu in preizkusu ločilnega mesta, št. 2024/128*, MFE Vinarna Vipava.

Energetski zakon (EZ-1). (2014). *Uradni list RS*, št. 17/14. Pridobljeno 2. 5. 2026 z naslova <https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/2014-01-0538>

Hyundai Energy Solutions. (2022). *HG Series HiE-S430HG(FB)/S435HG(FB)/S440HG(FB)/S445HG(FB) Hyundai Solar Module: Technical datasheet*. Pridobljeno 2. 5. 2026 z naslova <https://www.hyundai-es.co.kr>

Inženirska zbornica Slovenije, Matična sekcija elektro inženirjev. (2021). *Pregled zakonodaje, standardov in izrazoslovja s področja fotonapetostnih sistemov*. Ljubljana: IZS. Pridobljeno 2. 5. 2026 z naslova https://www.izs.si/assets/media/izsnovo/2021/MSE/IZS_PREGLED%20ZAKONODAJE%20STANDARDOV%20FOTONAPETOSTNIH%20SISTEMOV-april-2021.pdf

SIST. (2019). *SIST EN 50549-1:2019 — Zahteve za vzporedno vezavo generatorskih postrojev z razdelilnim omrežjem — 1. del: Priključitev na nizkonapetostno distribucijsko omrežje — Proizvodni postroji do vključno tipa B*. Ljubljana: Slovenski inštitut za standardizacijo. Pridobljeno 2. 5. 2026 z naslova <https://www.sist.si/zahteve-za-vzporedno-vezavo-generatorskih-postrojev-z-razdelilnim-omrezjem-sist-en-50549-12019-prevod-v-slovenscino.html>

Slovensko združenje za požarno varstvo. (2016). *Smernica SZPV 512 — Požarna varnost sončnih elektrarn*. Ljubljana: SZPV. Pridobljeno 2. 5. 2026 z naslova http://www.szpv.si/wp-content/uploads/SZPV-512_2016.pdf

SODO. (2021). *Sistemska obratovalna navodila za distribucijski sistem električne energije (SONDSEE)*. Uradni list RS, št. 7/21. Pridobljeno 2. 5. 2026 z naslova <https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/2021-01-0152/sistemska-obratovalna-navodila-za-distribucijski-sistem-elektricne-energije>

SODO. (2025). *Obvestila o SONDSEE — Tolmačenja in informativne objave*. Maribor: Sistemski operater distribucijskega omrežja. Pridobljeno 2. 5. 2026 z naslova <https://www.sodo.si/sl/kdo-smo/zakonodaja/sondsee/obvestila-o-sondsee>

Tigo Energy. (2023). *TS4-A-O Module-level optimization, monitoring, and rapid shutdown: Specifications and Ordering Information*. Campbell, CA: Tigo Energy, Inc. Pridobljeno 2. 5. 2026 z naslova <https://www.tigoenergy.com>

TSG-N-002:2021. (2021). *Tehnična smernica za nizkonapetostne električne inštalacije*. Ljubljana: Ministrstvo za okolje in prostor. Pridobljeno 2. 5. 2026 z naslova https://www.gov.si/assets/ministrstva/MNVP/Dokumenti/Graditev/TSG-N-002_2021_nizkonapetostne_instalacije.pdf

TSG-N-003:2021. (2021). *Tehnična smernica za zaščito stavb pred delovanjem strele*. Ljubljana: Ministrstvo za okolje in prostor. Pridobljeno 2. 5. 2026 z naslova https://www.gov.si/assets/ministrstva/MNVP/Dokumenti/Graditev/TSG-N-003_2021_strela.pdf

Uredba o samooskrbi z električno energijo iz obnovljivih virov energije. (2022). *Uradni list RS*, št. 43/22. Pridobljeno 2. 5. 2026 z naslova <https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/2022-01-0867/uredba-o-samooskrbi-z-elektricno-energijo-iz-obnovljivih-virov-energije>

Velog d.o.o. (b. d.). *LiFePO₄ ali LFP baterije — prednosti in slabosti. faq.akumulator.si*. Pridobljeno 2. 5. 2026 z naslova <https://faq.akumulator.si/index.aspx?category=17&id=117>

Velog d.o.o. (2024a). *Projektna dokumentacija izvedenih del (PID) za fotovoltaično elektrarno MFE Vinarna Vipava, načrt št. 17.3/24*. Ljubljana: Velog d.o.o.

Velog d.o.o. (2024b). *Navodila za obratovanje sistema MFE Vinarna Vipava, verzija 2*. Ljubljana: Velog d.o.o.

Velog d.o.o. (2024c). *U-F rele shema MFE Vinarna Vipava, verzija 2*. Ljubljana: Velog d.o.o.

Zakon o oskrbi z električno energijo (ZOOE). (2021). *Uradni list RS*, št. 172/21. Pridobljeno 2. 5. 2026 z naslova <https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/2021-01-3349>

Zakon o spodbujanju rabe obnovljivih virov energije (ZSROVE). (2021). *Uradni list RS*, št. 121/21. Pridobljeno 2. 5. 2026 z naslova <https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/2021-01-2570>

Ayaatech. (2025). *Why LiFePO₄ Battery Is Essential for Energy Storage Solutions*. Pridobljeno 2.5.2026 z naslova <https://www.ayaatech.com/es/news/lifepo4-battery/>

IC components limited. (2025). *Understanding True, Reactive, and Apparent Power*. Pridobljeno 2.5.2026 z naslova <https://www.ic-components.com/blog/understanding-true,reactive,and-apparent-power.jsp>

Bravc, K. (2023). *Kakšno sončno elektrarno naj postavim?* Pridobljeno 2. 5. 2026 z naslova <https://www.varcevanje-energije.si/fotovoltaične-elektarne/kaksno-soncno-elektarno-naj-postavim/>