

# UGRADNJA SPREMNIKA ELEKTRIČNE ENERGIJE U NN MREŽE S VELIKIM UDJELOM DISTRIBUIRANIH IZVORA

---

Lukarić, Renato

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:715717>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-26**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**UGRADNJA SPREMNIKA ELEKTRIČNE ENERGIJE U NN  
MREŽE S VELIKIM UDJELOM DISTRIBUIRANIH IZVORA**

Rijeka, svibanj 2023.

Renato Lukarić

0069071525

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**UGRADNJA SPREMNIKA ELEKTRIČNE ENERGIJE U NN  
MREŽE S VELIKIM UDJELOM DISTRIBUIRANIH IZVORA**

Mentor: prof. dr. sc. Vitomir Komen

Rijeka, svibanj 2023.

Renato Lukarić

0069071525

Rijeka, 19. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**  
Predmet: **Prijenos i distribucija električne energije**  
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Renato Lukarić (0069071525)**  
Studij: **Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike**  
Modul: **Elektroenergetika**

Zadatak: **UGRADNJA SPREMNIKA ELEKTRIČNE ENERGIJE U NN MREŽE S VELIKIM  
UDJELOM DISTRIBUIRANIH IZVORA / INSTALLATION OF ELECTRICITY  
STORAGE DEVICES IN LV NETWORKS WITH A LARGE SHARE OF  
DISTRIBUTED GENERATION**

### Opis zadatka:

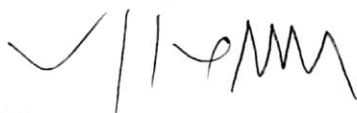
Tehničke karaktersitike NN mreža s velikim udjelom distribuiranih izvora. Pregled i tehničke karaktersitike novih tehnologija baterijskih spremnika električne energije. Izbor i dimenzioniranje baterijskih spremnika za ugradnju u NN mreže sa velikim udjelom distribuiranih izvora.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.



Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:



Prof. dr. sc. Vitomir Komen

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Viktor Sučić

## **IZJAVA**

Sukladno s člankom 8. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, od siječnja 2022. godine, izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad pod naslovom „Ugradnja spremnika električne energije u NN mreže s velikim udjelom distribuiranih izvora“, prema zadatku za diplomski rad od 21.03.2022.



---

Renato Lukarić

## ZAHVALA

*Zahvaljujem se svim profesorima i asistentima na prenesenom znanju tijekom mog studiranja.*

*Hvala svim kolegama i prijateljima koji su godine studiranja znatno olakšali i uljepšali.*

*Veliko Hvala mojim bliskim prijateljima i kolegama zbog kojih će studentski život uvijek ostati u lijepom sjećanju.*

*Za kraj, neopisivo Veliko Hvala svoj mojoj obitelji, a posebice majci Draženi, ocu Emilu i sestri Martini, koji ste vjerovali u mene i podržavali me u svakom pogledu, kako kroz period studiranja, tako i kroz život.*

*Renato*

# Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. KONCEPT, RAZVOJ, ŠIRENJE I UTJECAJ DISTRIBUIRANIH IZVORA.....	3
2.1 Klasifikacija distribuiranih izvora .....	3
2.2 Poticajni čimbenici za integraciju distribuiranih izvora u elektroenergetski sustav .....	6
2.3 Planiranje i pogon mreža sa distribuiranim obnovljivim izvorima .....	7
3. TEHNIČKI ZAHTJEVI PRIKLJUČENJA DISTRIBUIRANIH IZVORA NA MREŽU ...	12
3.1 Osnovni tehnički zahtjevi.....	12
3.2 Tehnički utjecaji distribuiranih izvora na mrežu .....	14
3.2.1 Oscilacije razine napona.....	15
3.2.2 Učinci na gubitke u vodovima .....	16
3.2.3 Varijacije električne energije vjetroelektrana i fotonaponskih elektrana .....	17
3.2.4 Problematika s ekonomskog stajališta .....	18
3.2.5 Prijelazne promjene napona.....	19
3.2.6 Treperenje napona .....	19
3.2.7 Izobličenje harmonika .....	20
3.2.8 Nestabilnost mreže .....	20
3.2.9 Povećanje razine greške i sustav zaštite .....	21
3.3 Prednosti integracije distribuiranih izvora u mrežu.....	22
3.3.1 Ograničenje vršne potrošnje .....	22
3.3.2 Smanjenje gubitaka energije u mreži .....	23
3.3.3 Regulacija frekvencije.....	23
3.3.4 Stabilizacija napona .....	23
3.3.5 Poboľšana pouzdanost i sigurnost opskrbe .....	23
3.3.6 Isporuka pomoćnih usluga.....	24
3.3.7 Ekonomska održivost projekata distribuiranih izvora .....	24
4. SPREMNICI ELEKTRIČNE ENERGIJE I NJIHOVA PRIMJENA U DISTRIBUCIJSKOM SUSTAVU .....	25
4.1 Klasifikacija i tipovi spremnika električne energije .....	27
4.1.1 Elektrokemijski spremnici energije.....	28
4.1.2 Toplinski spremnici energije .....	31
4.1.3 Mehanički spremnici energije.....	34
4.1.4 Kemijski spremnici energije .....	35
4.1.5 Elektromagnetski spremnici energije .....	37
4.1.6 Hibridni spremnici energije .....	41
4.2 Ugradnja, upravljanje i utjecaj spremnika na pogonske parametre u NN mrežama .....	42

4.2.1 Sustavi pohrane energije za distribucijske mreže .....	44
4.2.2 Učinkovita strategija skladištenja .....	44
4.2.3 Izbor sustava pohrane energije za distribucijske mreže .....	45
4.2.4 Ciklus punjenje-pražnjenje sustava za pohranu energije .....	46
4.2.5. Optimalno dimenzioniranje sustava pohrane energije .....	48
4.3 Primjena spremnika energije po razinama električne mreže .....	49
4.3.1 Korisničke usluge .....	50
4.3.2 Usluge neovisnog operatora sustava i regionalnih organizacija za prijenos .....	51
4.3.3 Usluge operatora sustava .....	52
4.3.4 Poslovni modeli .....	53
5. PROCJENE MOGUĆNOSTI PRIMJENE SPREMNIKA ELEKTRIČNE ENERGIJE U EE MREŽAMA .....	54
5.1 Predviđena distribuirana skladišta na europskoj razini .....	55
6. POTENCIJALI SKLADIŠTENJA U SVEZI POVEĆANE INTEGRACIJE OIE U BUDUĆIM MREŽAMA .....	62
6.1 Budući scenariji integracije OIE .....	62
6.3 Utjecaj OIE na buduće scenarije sustava skladištenja energije .....	63
6.4 Analiza tehnologija skladištenja na razini distribucijske mreže .....	65
6.5 Potencijalni budući scenariji virtualnog skladišnog pogona (VSP) .....	67
6.6 Sudjelovanje na tržištu virtualnog skladišnog pogona .....	70
7. TRŽIŠTA POHRANE ELEKTRIČNE ENERGIJE .....	73
7.1 Integracija tržišta distribuirane pohrane energije .....	73
8. RAZRADA PRIMJERA UGRADNJE SPREMNIKA ELEKTRIČNE ENERGIJE .....	83
8.1 Ugradnja spremnika električne energije u NN mreže s velikim udjelom distribuiranih izvora .....	83
8.2 Ugradnja spremnika električne energije u NN potrošačko postrojenje .....	88
9. ZAKLJUČAK .....	90
LITERATURA .....	91
SAŽETAK RADA I KLJUČNE RIJEČI .....	94
ABSTRACT AND KEY WORDS .....	95
PRILOG .....	96
1. Tehnički opis projekta .....	96
2. Priključak sustava na EE mrežu .....	96
2.1 Priključak na NN instalaciju i mjerenje potrošnje električne energije .....	97
3. Fotonaponski moduli, izmjenjivači i baterijski sustav pohrane električne energije .....	98
3.1 Fotonaponski moduli (generatorski blok) .....	98
3.2 Izmjenjivački blok .....	99



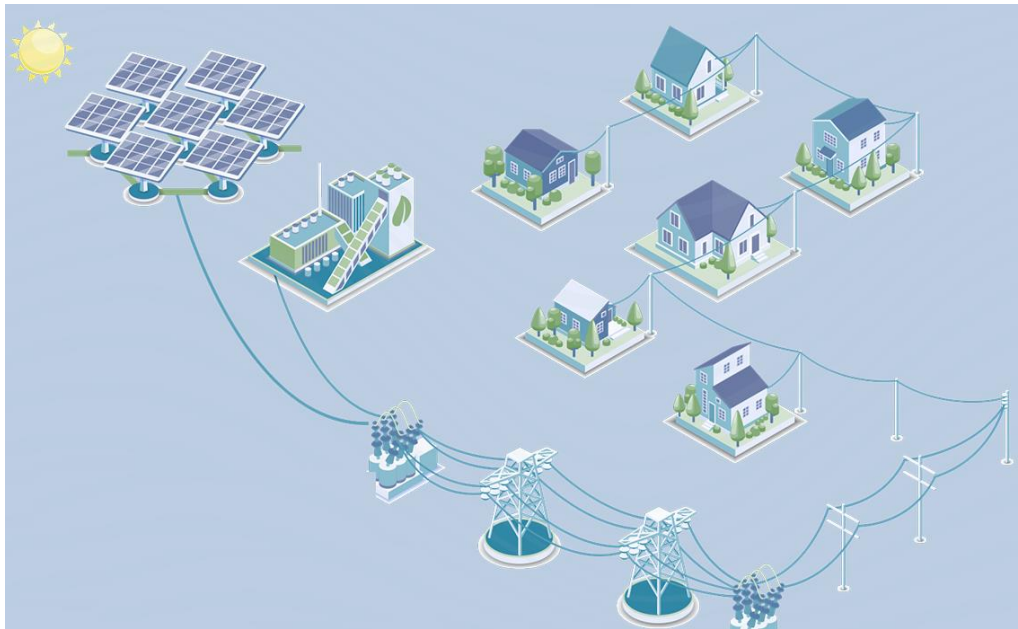
3.3 Baterijski sustav .....	100
4. Tehnički proračuni .....	102
4.1 Solarni potencijal lokacije .....	102
4.2 Proračun opterećenja izmjenjivača .....	102
4.3 Odabir kabela i proračun pada napona po stringu .....	103
4.4 Proračun vršnog opterećenja i vršne struje .....	103
4.5 Odabir kabela i zaštita od preopterećenja .....	104
4.6 Proračun pada napona .....	106
4.7 Zaštita od električnog udara – automatski isklop u slučaju kvara .....	108
5 Grafički prikazi .....	110
5.1 Situacija građevine na ortofoto karti – smještaj opreme .....	110
5.2 Blok shema .....	111
5.3 Jednopolna shema .....	112
5.4 Shema ožičenja PEV .....	113
5.5 Dispozicija FN modula i kabeleske kanalice .....	117
5.6 Dispozicija izmjenjivača, baterijskog sustava i razdjelnika RO-FN .....	118

## 1. UVOD

Ovaj diplomski rad obrađuje pregled postojećih i predviđenih tehnologija pohrane električne energije te njihovu integraciju u mreži. Također rad obuhvaća klasifikaciju distribuirane proizvodnje, izazove integracije distribuiranih izvora u mrežu, praktične opcije korištene u integraciji distribuiranih izvora, iskustva iz zemalja s uspješnim mrežnim integracijama i poticajni čimbenici u rastu distribuiranih izvora.

Operatori prijenosnih i distribucijskih sustava su u potrazi za provjerenim rješenjima za učinkovitu integraciju distribuiranih izvora u mrežu uz minimiziranje troškova. Ova tranzicija je vođena, između ostalog, globalnim klimatskim problemima, sve većom potražnjom za električnom energijom, potrebom za većom fleksibilnošću i starenjem mrežne infrastrukture. Posljednje desetljeće donijelo je značajnu promjenu u strukturi niskonaponskih (NN) mreža. Tehnološki razvoj obnovljivih izvora energije (OIE), sustavi financijske potpore i pravni propisi koji imaju za cilj povećanje energetske učinkovitosti pridonijeli su razvoju proizvodnje električne energije za potrošače. Novi trendovi pokazuju da će važnu ulogu u razvoju mreže u budućnosti imati distribuirana proizvodnja s visokom razinom obnovljivim izvorima. Uloga i značaj spremnika električne energije koji se koriste u konceptu distribuirane proizvodnje također raste svake godine [2]. Napredne mreže također će imati sve važniju ulogu, podupirući tranziciju s niskim emisijama te omogućavanje potrošačima da imaju aktivnu ulogu u energetsom sustavu uz proizvođače, dobavljače i mrežne tvrtke [3]. Količina energije koja se dovodi u elektroenergetsku mrežu iz distribuiranih proizvodnih postrojenja potencijalno može predstavljati izazov za mrežne operatore. Ovi izazovi očituju se kroz oscilacije napona, obrnutog toka snage te pregrijavanja komponenti. Povećan dotok električne energije u elektroenergetsku mrežu zahtijeva značajno mrežno pojačanje, posebno u distribucijskim mrežama gdje je stabilnost napona imperativ. Čimbenici koji stoje iza sve veće integracije obnovljive energije uključuju pouzdanost, sigurnost, napredak u tehnologiji, regulatorna pitanja i zahtjev za smanjenje emisija. Štoviše, sve veća konkurencija na tržištu električne energije, ograničenja opreme i kapaciteta potaknula su usvajanje distribuirane proizvodne tehnologije kao dio novih rješenja ovih izazova [5]. U trenutno dereguliranom sektoru električne energije, investitori su obično skeptični u pogledu ulaganja u energetske projekte koji uključuju ogromne iznose zbog iznimno dugog razdoblja povrata. Ovi čimbenici i deregulacija/decentralizacija elektroenergetskog sektora, zajedno s rastućom globalnom potrošnjom električne energije, učinili su da tehnologije distribuiranih izvora predstavljaju mogućnost održive opskrbe električnom energijom za blisku budućnost.

Kao doprinos, rad predstavlja detaljan pregled složenosti međusobnog povezivanja obnovljivih izvora energije u električne mreže i tržišta, stajališta o problemima i rješenjima koji proizlaze iz prakse koju koriste operatori mrežnih sustava. Rad naglašava praktične primjene metoda u stvarnom okruženju s teorijskim osnovama te ukazuje na pitanja o integraciji obnovljive energije, čime se osigurava da operatori mreže s obnovljivim izvorima energije mogu učiti iz uspjeha integracije istih.



*Slika 1. Prikaz integracije distribuiranog izvora [7]*

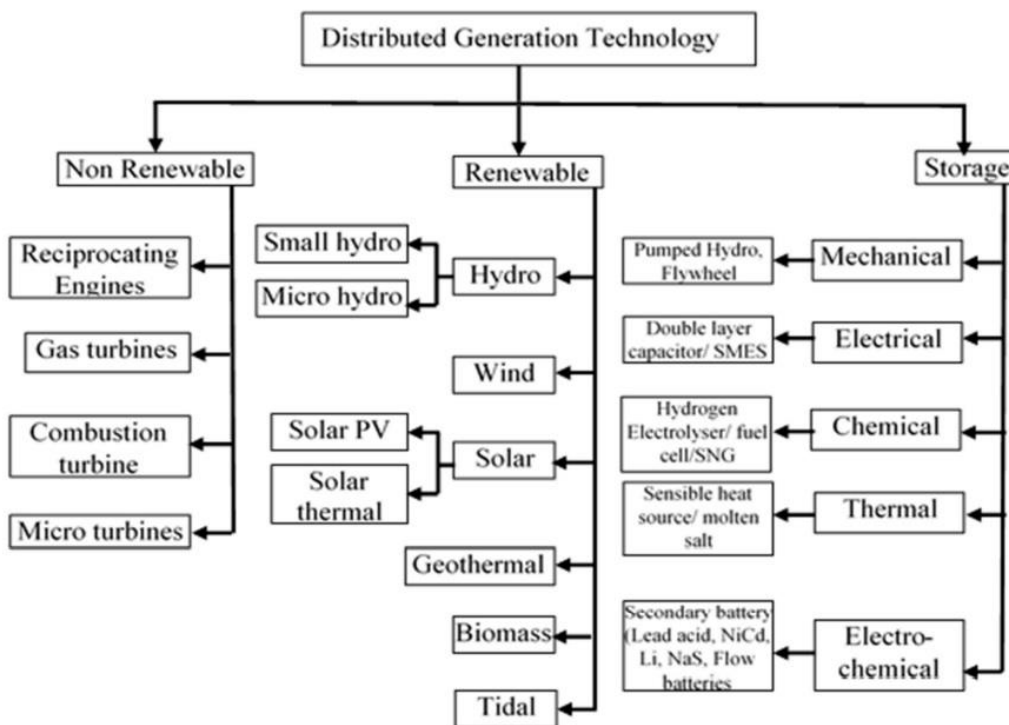
## **2. KONCEPT, RAZVOJ, ŠIRENJE I UTJECAJ DISTRIBUIRANIH IZVORA**

Distribuirani izvor (DI) se definira kao korištenje male, integrirane ili samostalne (električne ili toplinske energije) proizvodne jedinice čija je instalacija u blizini centara potrošnje. Solarne termalne, fotonaponske, vjetroturbine, mikro-hidro turbine, gorivne ćelije, plinske turbine i sustavi na biomasu svi su distribuirani izvori. Ovi distribuirani izvori mogu biti autonomni ili povezani na mrežu [8]. Distribuirane izvore se definira kao objekte za proizvodnju električne energije koji su znatno manjih kapaciteta od centraliziranih elektrana, obično 10 MW ili manje, kako bi se olakšalo njihovo međusobno povezivanje na gotovo bilo kojoj točki unutar elektroenergetske mreže [7]. Distribuirani izvori se također mogu definirati kao mali izvori skladištene energije (obično u rasponu od manje od kW i desetke MW), što nije dio velike, centralizirane elektroenergetske mreže i nalazi se blizu potrošnje [9]. Određene institucije definiraju distribuirane izvore [10] kao proizvodne jedinice s kapacitetom od 30 MW ili manje, s mogućnošću ekonomske podrške distribucijskoj mreži. Tehnologije distribuiranih izvora uključuju sustave kao što su koncentrirana solarna energija, fotonaponski sustavi, mikroturbine i gorivne ćelije. Osim toga, distribuirani izvor je definiran u nekim zemljama s naponskom razinom na koju je priključen, dok druge zemlje smatraju distribuirane izvore izvorima energije koji izravno napajaju potrošače [11]. Strategija upravljanja energijom distribuiranih izvora obično je neovisna od centralne mreže i uglavnom su distribuirani izvori povezani u točkama pri neposrednoj blizini potrošnje.

### **2.1 Klasifikacija distribuiranih izvora**

Postoji više mišljenja u vezi s definicijom distribuiranih izvora u različitim zemljama i profesionalnim tijelima. Različite institucije imaju različite poglede na spojne točke distribuiranih izvora na mrežu. Većina znanstvenika tvrdi da prikladna lokacija postrojenja distribuiranih izvora treba biti na niskonaponskoj (NN) mreži gdje će potrošači lako iskoristiti energiju pri minimalnim gubicima u sustavu [12]. Maksimalni kapacitet distribuiranih izvora koji se može prikladno integrirati u konvencionalnu mrežu je također različito definiran. Kapacitet distribuiranih izvora je bitan čimbenik pri povezivanju s glavnom mrežom budući da svaka priključna točka ima maksimalnu količinu snage koju može preuzeti iznad koje bi sustav mogao postati nestabilan. Distribuirani izvor bi trebao biti sposoban osigurati aktivnu

snagu u mreži na koju je spojen i ponekad bi mogao kompenzirati jalovu snagu i/ili druge pomoćne usluge [12]. Vlasništvo nad objektom distribuiranog izvora može biti kriterij za odrediti treba li ga smatrati distribuiranim izvorom ili ne. Drugi tvrde da vlasništvo nad jedinicom distribuiranih izvora treba posjedovati neovisni proizvođač energije (IPP, *engl. Independent Power Producers*). Međutim, Ackermann [13] je odbacio aspekt vlasništva kao važnu komponentu definicije distribuiranih izvora, navodeći da potrošači, neovisni proizvođači energije i vlade mogu posjedovati postrojenja distribuiranih izvora. Slika 2 prikazuje klasifikaciju tehnologija distribuiranih izvora.



Slika 2. Klasifikacija tehnologija distribuiranih izvora [14]

Tablica 2.1. Klasifikacija distribuiranih izvora po zemljama/institucija [12]

Država/institucija	Kapacitet DI	Lokacija DI	Način rada
Švedska	$\leq 1500$ kW	-	
Novi Zeland	$< 5$ MW	-	
Australski operator tržišta	$\leq 30$ MW	-	
Međunarodno vijeće za velike elektroenergetske sustave	$< 100$ MW	Najčešće u kombinaciji s distribucijskom mrežom	Nije upravljano/isporučeno centralno
Bugarska energetska kompanija	$< 10$ MW	Spojen na distribuciju mrežu	Ne upravlja se centralno
Institut za istraživanje električne energije	$\leq 50$ MW	Najčešće se postavlja u blizini centara opterećenja ili distribucijskih i srednjenaponskih (SN) trafostanica	-
Institut za istraživanje plina	$25 \text{ kW} \leq X \leq 25$ MW	-	-
Tržišta električne energije Engleske i Walesa	$< 100$ MW	-	Ne šalje se na središnje mjesto
Estonska tržišta električne energije	$< 50$ MW	Spojen na distribuciju mrežu	-
Institut za elektrotehniku i elektroniku (IEEE)	$\leq 10$ MW	Povezan na bilo kojoj točki unutar električne mreže	-

## 2.2 Poticajni čimbenici za integraciju distribuiranih izvora u elektroenergetski sustav

Čimbenici koji potiču ubrzani rast integracije distribuiranih izvora su:

- ekološki
- ekonomski i
- regulatorni

### Ekološki poticajni čimbenici

Potreba za dekarbonizacijom električne mreže i smanjenjem emisija stakleničkih plinova jedan je od glavnih pokretačkih čimbenika za distribuirane obnovljive izvore energije. Za implementaciju distribuiranih izvora nije potrebna instalacija novih dalekovoda što povoljno utječe na ekološki čimbenik integracije. Institucije koje se bave zaštitom okoliša izazvale su zabrinutost u vezi s postavljanjem kopnenih vjetroelektrana, navodeći buku i estetske neugodnosti [15]. Stoga je potrebno napraviti kompromis između mogućnosti održive opskrbe energijom i nužnosti očuvanja ljepote krajolika. Drugi tvrde da tehnologije obnovljive energije kao što je vjetar, sa gotovo nikakvim emisijama stakleničkih plinova ili pitanja gospodarenja otpadom, treba poticati. Međutim, ti okolišni čimbenici moraju biti potkrijepljeni propisima koji obvezuju aktere u sektoru vlasti kako bi se zadovoljile smjernice ekološke održivosti. Štoviše, ekonomski poticaji za ekološki prihvatljive izvore energije također bi mogli motivirati ulagače da razmotre ulaganje u sustave čiste energije.

### Ekonomski čimbenici

Budući da su distribuirani izvori relativno malog kapaciteta, uključuju manju kapitalnu investiciju, a time i manji rizik. Ovaj čimbenik mogao bi potaknuti ulagače da se uključe u posao proizvodnje električne energije kroz distribuirane izvore. Troškovi rada i održavanja (O&M, engl. operation and maintenance) distribuiranih izvora su niži, dijelom zato što su uglavnom smješteni oko centara potrošnje gdje se stvaraju minimalni gubici. Osim toga, liberalizacija tržišta električne energije djeluje kao poticajni faktor za razvoj distribuiranih

izvora u smislu da bi slobodno tržište s ograničenim restrikcijama privuklo ulagače. Ulagачi u elektroenergetski sektor bi stoga požurili na tržište električne energije kako bi iskoristili koristi [14]. Nadalje, pad troškova komponenti sustava obnovljive energije kao što su solarni paneli također je poticaj rastućoj implementaciji distribuiranih izvora.

### Nacionalni/regulatorni čimbenici

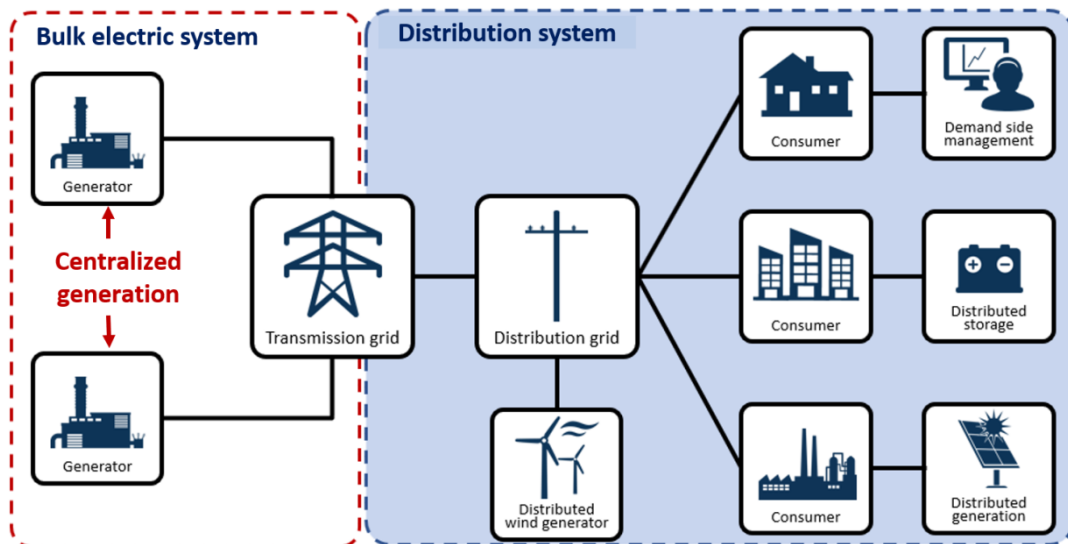
Većina zemalja sve više usvaja politike koje ciljaju na implementaciju distribuiranih izvora, posebice obnovljivih. To je zato što moderna društva uvelike ovise o električnoj energiji, te bi svaki prekid u opskrbi mogao uzrokovati razorne političke, ekonomske i društvene posljedice. Stoga su distribuirani izvori, posebice obnovljivi, povoljno sredstvo za postizanje održivosti opskrbe energijom i sigurnost. Štoviše, zagovornici reforme tržišta električne energije tvrde da će potpuno konkurentno tržište električne energije dovesti do niskih tarifa električne energije i poboljšati pružene usluge. Ova tržišna struktura će potaknuti instaliranje mnogih distribuiranih izvora od strane investitora u elektroenergetskom sektoru [14]. Nadalje, povećanje potražnje za električnom energijom važan je poticajni čimbenik u raspoređivanju distribuiranih izvora kako bi se zadovoljila rastuća potražnja.

### **2.3 Planiranje i pogon mreža sa distribuiranim obnovljivim izvorima**

U potrazi za održivim razvojem, zemlje su usvojile obnovljive izvore za proizvodnju električne energije za postizanje ciljeva kao što je dekarbonizacija proizvodnje električne energije i povećanje fleksibilnosti pristupa energiji [14]. Napredak tehnologije i pad troškova potaknuli su napredak u integraciji obnovljivih izvora energije.

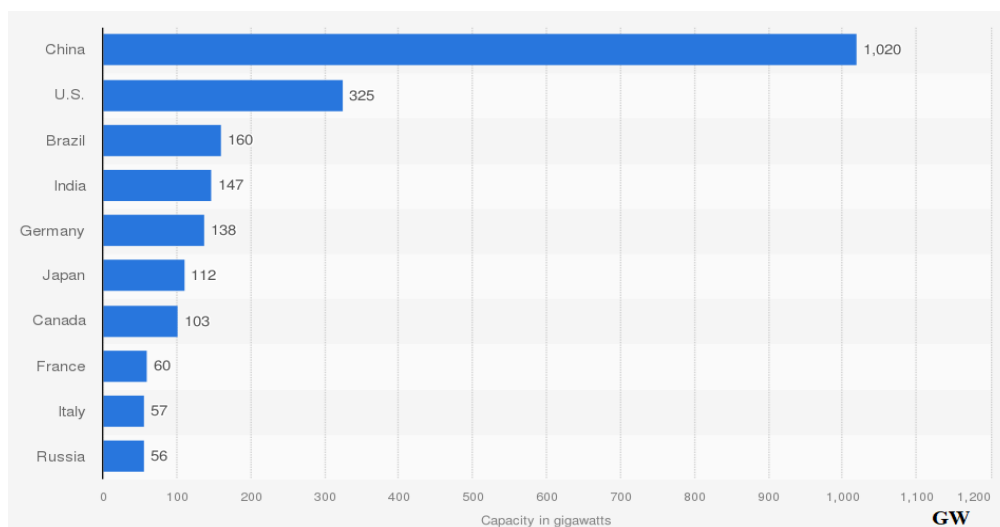
Integracija OIE u mrežu dopušta prihvatljive količine obnovljive energije (solarna, vjetar, biomasa, hidro itd.) za prodiranje u već postojeću električnu mrežu. To uključuje oprez i pozornost u područjima vrste obnovljivih izvora, komponentama OIE, instalaciji i pogonu. Razine integracije obnovljive energije moraju biti učinkovito povezane s mrežom tako da povezanost uzima u obzir učinke na elektroenergetsku mrežu na različitim točkama.





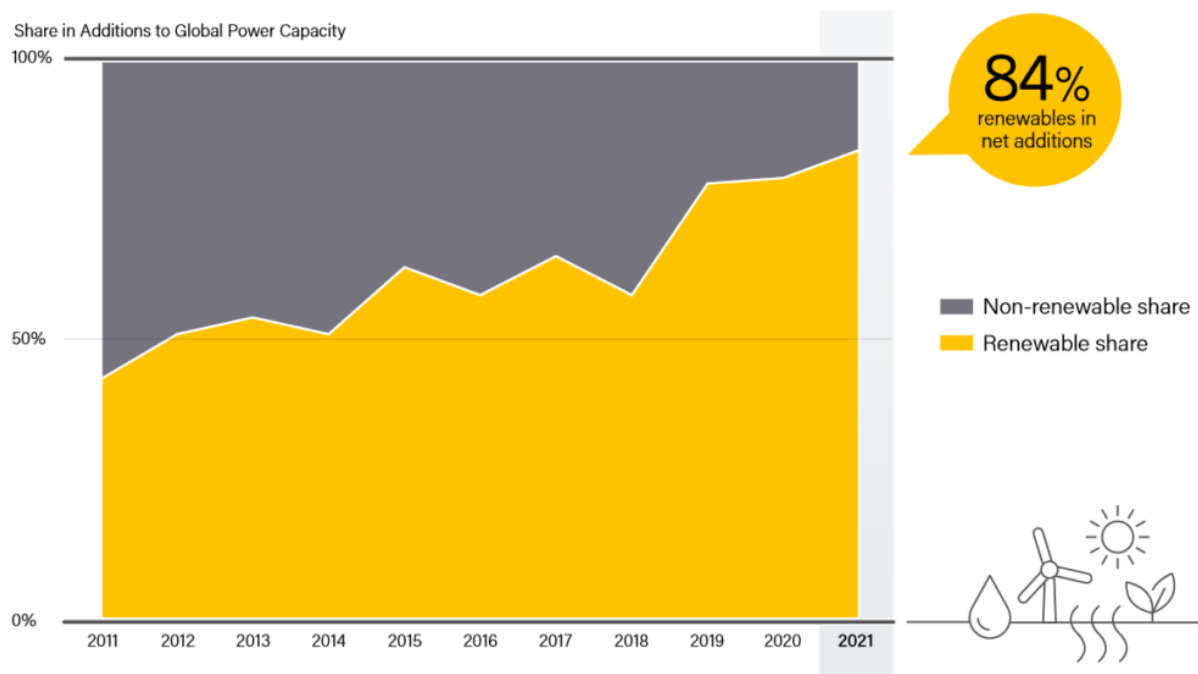
Slika 3. Koncept distribuiranih obnovljivih izvora energije i njihovo povezivanje na mrežu [16]

Na globalnoj razini, dolazi do kontinuiranog povećanja primjene obnovljive energije zemlja u razvoju. Politike za poboljšanje integracije obnovljive energije u mrežu usmjerene su prema strukturi tržišta, upravljanju potrošnjom te poboljšanju distribucijske mreže. Globalna politika za integraciju obnovljive energije s pripadajućim tehnologijama, kao što su sustavi za pohranu stavlja naglasak na potrebu za poboljšanjem fleksibilnosti mreže, kontrole i otpornosti mreže [16]. Slika 4 prikazuje vodeće zemlje u instaliranim kapacitetima obnovljive energije u svijetu 2021.



Slika 4. Vodeće zemlje u instaliranim kapacitetima obnovljive energije u svijetu 2021.[17]

Distribuirani sustavi obnovljive energije, koji su obično raspršena, mala proizvodna postrojenja, čine otprilike 1% mješavine proizvodnje električne energije u svijetu, ali njihovo učešće se ubrzava [18]. Rast usvajanja distribuiranih obnovljivih sustava nudi nove prednosti i izazove. Za stambene i poslovne korisnike, prednosti uključuju mogućnost proizvodnje vlastite električne energije putem obnovljivih izvora energije, smanjujući pretjerano oslanjanje na mrežu. Slika 5 prikazuje razvoj neto godišnjeg povećanja u obnovljivim i neobnovljivim izvorima u mješavini električne energije.



*Slika 5. Neto godišnji prirast kapaciteta proizvodnje električne energije iz obnovljivih i neobnovljivih izvora [13]*

Koncept integriranog planiranja, odnosno metodu elektrifikacije koja obuhvaća proširenje mreže, solarne kućne sustave i mini-mreže usvaja sve veći broj zemalja. Zemlje kao što su Tanzanija, Nepal, Kambodža, Ruanda, Kenija, Mjanmar, Bangladeš i Indija doživjeli su nedavno najdrastičniji porast elektrifikacije [18]. Integracija distribuiranih izvora u mrežu mora uzeti u obzir izbor optimalne spojne točke, odgovarajući kapacitet i vrstu tehnologije distribuiranih izvora. Međutim, neprikladno optimalno planiranje može negativno utjecati na performanse distribucijske mreže. Stoga je imperativ pravilno planirati integraciju distribuiranih izvora na mrežu.

Spajanje distribuiranih izvora na mrežu ima značajan učinak na stabilnost sustava, kvalitetu električne energije i naponske profile. Broj i kapacitet priključenih distribuiranih

izvora na mrežu odrediti će količinu utjecaja na kvalitetu električne energije, a povećano i nekontrolirano priključivanje energije iz ovih sustava moglo bi imati negativan učinak. Kvaliteta električne energije posebno je važan čimbenik u elektroenergetskoj mreži sada kada je došlo do porasta nove električne opreme na tržištu koja je vrlo osjetljiva na svaku promjenu napona. Kvaliteta električne energije uključuje mjerenje aspekata kao što je količina varijacije napona (prenapon/podnapon), varijacije frekvencije i harmonici [18].

U zemljama s naprednim energetske tržištima, zahtjev za povezivanje od strane projektanta energetske projekta distribuiranih izvora slijedi detaljna provjera tehničkih mogućnosti mreže [20] od strane operatora mreže kako bi se utvrdilo koji je čvor ili sabirnica na mreži najpogodnija točka za priključenje snage. Analiza uzima u obzir i troškove proširenja mreže te trošak proizvodnje i transporta električne energije do točke priključka na mrežu.

Procjena utjecaja na mrežu u biti osigurava da napon i struja budu u skladu s ograničenjima komponenti elektroenergetske mreže. Procjena mreže ili provjera kompatibilnosti uzima u obzir dva kritična scenarija [20]: najveća moguća snaga proizvedena uz najmanju moguću potrošnju energije, i minimalna moguća proizvedena snaga uz najveću moguću potražnju za energijom.

Izbor odgovarajuće točke spajanja distribuiranog izvora na mrežu je središnji zadatak u procesu integracije. Priključenje postrojenja distribuiranog izvora blizu centara potrošnje ili distribucijskih transformatorskih stanica uzrokovat će fluktuacije u protoku snage, koje imaju utjecaj na cjelokupni napon mreže [20]. Fluktuacije snage u niskonaponskoj (NN) mreži uzrokuju neželjene varijacije napona, a situacija postaje još gora pri visokim razinama učešća obnovljivih izvora, gdje će uglavnom doći do naglog porasta naponske razine u uvjetima smanjene potrošnje energije. Stoga bi NN mreža trebala biti opremljena automatskim regulatorima napona za kontrolu razine napona.

Stabilnost napona je još jedan važan preduvjet, a u različitim zemljama, regionalnim blokovima (npr. Europske unije) i strukovnih organizacija, poput Instituta za inženjere elektrotehnike i elektronike (IEEE) postavili su standarde za rad elektroenergetskog sustava. Europska norma za ograničenja napona ima toleranciju od  $\pm 10\%$  u dnevnom elektroenergetskom sustavu rada [21], dok standardi IEEE preporučuju toleranciju od  $\pm 5\%$ . Upravljanje komponentama elektroenergetskog sustava treba biti u skladu s ovim ograničenjima napona. Operatori mreže obično koriste transformatorske stanice i

kondenzatorsku bateriju za regulaciju napona u stalno promjenjivoj situaciji opterećenja. Ove radnje omogućavaju održavanje stabilnog napona u mreži.

Integracija distribuiranih izvora u distribucijsku mrežu može biti korisna za operatore mreže i potrošače električne energije. Međutim, ako kritični aspekti kao što su točka spajanja i kapacitet distribuiranog izvora nisu odgovarajuće određeni, to može uzrokovati pogoršanje performansi mreže. Ova situacija bi također mogla dovesti do povećanja gubitaka snage i varijacije napona. Posljedično, spajanje distribuiranih izvora na mrežu, posebice na distribucijsku mrežu, uključivalo bi optimalno planiranje komponenti, određivanje optimalnog kapaciteta pružatelja usluge i odabir optimalnih spojnih točaka. Odabirom optimalne priključne točke distribuiranog izvora poboljšava se pouzdanost sustava i sigurnost uz povećanje razine integracije i smanjenje proizvodnih troškova. Štoviše, kada je kapacitet jedinice distribuiranog izvora pravilno dimenzioniran, smanjuje se kapitalni trošak nabave opreme u velikom sustavu i stoga se povećava učinkovitost mreže [22].

### **3. TEHNIČKI ZAHTJEVI PRIKLJUČENJA DISTRIBUIRANIH IZVORA NA MREŽU**

#### **3.1 Osnovni tehnički zahtjevi**

Na razini trafostanice VN/SN transformatori prilagođeni regulaciji napona koriste se za podešavanje napona u prijelazu između VN/SN mreže. Većina operatora mreže u prošlosti je koristila regulatore napona uglavnom kao intervencijski mehanizam za kompenzaciju varijacije napona na VN mreži i stabilizaciju SN na prilično konstantnu razinu napona. S pojavom integracije obnovljivih izvora energije u mreže, operatori mreže u Njemačkoj [19] uključili su energetske elektrone i softverske aplikacije za regulaciju napona na SN razini s obzirom na postotak integracije obnovljive energije i situaciju tokova snage u trafostanici. Ova izvedba omogućuje regulaciju rastućeg napona na SN mreži u situacijama priključenja obnovljivih izvora. Međutim, ovaj pristup ima niz izazova. Na primjer, varijacije napona mogu negativno utjecati na komercijalne proizvodne pogone spojene na električnu mrežu sredjenaponske (SN) razine, što ograničava široku primjenu dinamičke kontrole napona. Štoviše, mogućnost smanjenja napona u mreži ovisit će o fizičkoj rasprostranjenosti sustava obnovljive energije u određenom SN mrežnom području, tako da energetske sustavi koji su udaljeni od trafostanice mogu predstavljati probleme pri smanjenju napona. Bez obzira na to, primjenu ove metode njemački operatori distribucijske mreže smatraju kao jedan od najisplativijih postupaka za povećanje kapaciteta mreže [19].

#### **Izmijenjena konfiguracija mreže**

Proširenje mreže dodavanjem distribuiranih izvora zahtijeva optimizaciju strukture postojeće mreže na način koji smanjuje gubitke snage, pomaže u otkrivanju/ispravljanju grešaka [19]. Uz povećanu integraciju obnovljivih izvora te posljedično potrebom za širenjem mreže, javlja se tehno-ekonomski problem koji iziskuje operatore sustava da pokušaju izbjeći što je više moguće izgradnju novih dalekovoda ili trafostanica. Ovaj dodatni cilj smanjenja širenja elektroenergetske mreže u sukobu je s prethodno navedenom optimizacijskom shemom.

Radnje usmjerene na smanjenje impedancije mreže poboljšale bi smještajni kapacitet obnovljivih izvora energije u elektroenergetskoj mreži. Praktičan pristup kojim se često koriste njemački operatori sustava za smanjenje impedancije mreže je primjena zatvorene

petlje SN mreže [19], gdje se radijalna konfiguracija SN mreže transformira u zatvorene prstene gdje je svaka trafostanica spojena na više od jednog voda za opskrbu energijom. Ovaj pristup povezuje prethodno autonomne dalekovode koji su bili napajani zajedničkom transformatorskom stanicom u rasklopnu stanicu, čime se stvara zatvorena petlja. Međutim, ova metoda čini otkrivanje kvarova i popravak kvarova vrlo teškim i pristup ostaje kontroverzan među operatorima mreže. Stoga, održive metode koje ravnomjerno distribuiraju priključene obnovljive izvore energije u cijelu mrežu, potrebno je razviti za optimalno iskorištenje postojećeg kapaciteta mreže.

### **Ugradnja distribuiranih izvora kao rezerve**

Još jedna tehnika koju operatori sustava koriste za povećanje razine integracije obnovljivih izvora energije je uspostavljanje izvora obnovljive energije koji će služiti kao rezerva, tako da, kada dođe do kvara u jednom dijelu mreže, rezerva napaja mrežu. Sustavi obnovljive energije mogu se kontinuirano dodavati u mrežu prema zahtjevima energetske potražnje i stabilnosti mreže, međutim ukoliko je stabilnost mreže ugrožena potrebno ih je odvojiti. Trafostanica može biti opremljena dodatnim VN/SN transformatorom u svrhu održavanja mreže tijekom održavanja sustava ili drugih nepredviđenih događaja. Ovaj transformator bi se mogao koristiti za smještaj više postrojenja distribuiranih izvora u određenoj SN mreži. Iako bi ova metoda poboljšala iskorištenost raspoloživog kapaciteta mreže, ona, međutim, čini rad elektroenergetskog sustava složenijim [19]. Moraju se razviti jednostavnije metode uz jasne provedbene smjernice i mjere zaštite kako bi sustavi obnovljive energije mogli jednostavno dodavati u mrežu.

### **Regulacija jalove snage**

Budući da priključenje djelatne snage u mrežu uzrokuje porast napona, sposobnost distribuiranih sustava obnovljive energije da proizvode jalovu snagu operatori sustava koriste za kontrolu kvalitete napona. Pomoću jalove snage se regulira porast napona, čime se poboljšava sposobnost mreže da prihvati sustav obnovljive energije [19]. Operatori sustava napredne metode kao što su automatski nadzorni kontrolni sustavi za regulaciju reaktivnih

priključenja snage koriste na visokonaponskoj razini. Kontrola reaktivne snage se također može koristiti za izravnavanje neravnoteže jalove snage u SN mreži, što se obično napaja pomoću generatora.

### **Izgradnja izravnih vodova u mreži**

Neki operatori mreže odlučili su se za izgradnju izravnih vodova koji povezuju VN/SN trafostanice s distribuiranim izvorima za evakuaciju energije. Izravni vodovi sastoje se od dalekovoda s velikim presjecima ( $500\text{--}800\text{ mm}^2$ ) s mogućnošću prijenosa velikih količina električne energije do potrošača. Pad napona na ovim vodovima je nizak zbog velikog poprečnog presjeka i, posljedično, smanjeni pad napona može značajno povećati kapacitet SN mreža [23]. Ovaj pristup se pokazao ekonomičnim u područjima gdje se uočavaju promjene napona zbog velikog učešća obnovljivih izvora.

### **3.2 Tehnički utjecaji distribuiranih izvora na mrežu**

Energetske mreže koje se sastoje od distribuiranih izvora u blizini centara potrošnje s promjenjivim zahtjevima za snagom predstavljaju izazove u smislu pogona i upravljanja cijelim sustavom [24]. Ovi problemi sežu od podnapona, harmonika i prenapona do prolaznih pojava stabilnosti [25]. U prošlosti su procesi proizvodnje, prijenosa i distribucije električne energije bili pokrenuti kao autonomni procesi. S povećanjem integracije distribuiranih izvora u mreži, tradicionalna metoda upravljanja elektroenergetskim sustavima polako se mijenja. Moderna električna mreža ima distribuirane izvore kao važne komponente. Integracija distribuiranih izvora u mrežu mogla bi imati pozitivne i negativne učinke na prijenos i distribuciju mreže. Utjecaji na distribucijsku mrežu su veći, s obzirom na to da su najvećim dijelom distribuirani izvori priključeni na distribucijsku mrežu. Ovi utjecaji se moraju pažljivo ispitati kako bi se mogla postići optimalna učinkovitost mreže. Kako distribuirani izvori energije postaju prevladavajući u električnoj mreži, priroda mreže i njezin rad se mijenja kako bi se mogao nositi s protokom snage u oba smjera [25].

### 3.2.1 Oscilacije razine napona

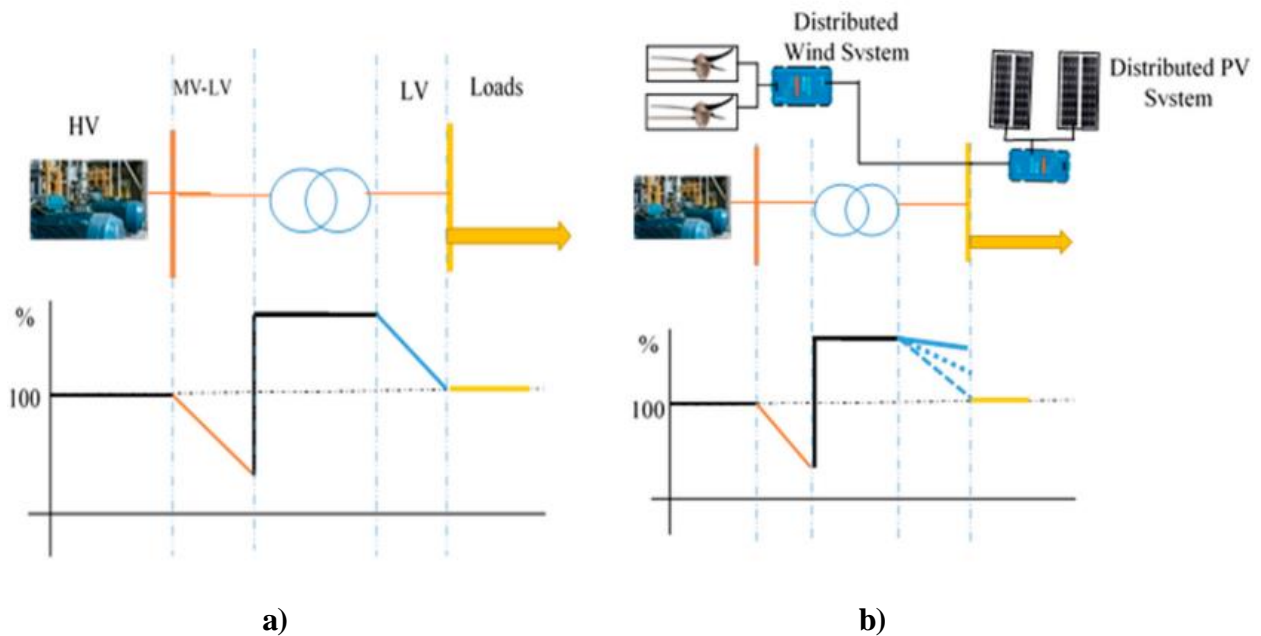
Održavanje relativno stabilne razine napona u električnoj mreži ključno je za funkcioniranje komponenti mreže. Trenutačno se većina distribuiranih izvora nalazi u blizini centara opterećenja, gdje opskrbljuju potrošače električnom energijom, te svaka značajnija promjena toka snage će utjecati na napon napajanja jer su tok snage i napon pod velikim utjecajem promjenjive potražnje i proizvodnje. Protok električne struje do trošila u distribucijskoj mreži čija je konfiguracija radijalna sklona je pozitivnom padu napona, a to bi moglo uzrokovati osciliranje amplitude napona u mrežnim čvorovima [14]. Dodavanje distribuiranog sustava obnovljive energije u električnoj mreži utječe na kvalitetu električne energije na isti način kao i smetnja opterećenja budući da također mogu emitirati takve smetnje kao što su dugotrajne i kratkoročne varijacije napona, treperenja napona i harmonijska izobličenja. U mreži s distribuiranim izvorima, ovisno o scenariju mogu se uočiti porasti i padovi napona. Priroda sustava solarne energije (tj. proizvodnja električne energije koja se ne može regulirati kako bi odgovarala promjenjivoj potražnji za električnom energijom) je potencijalni izvor oscilacija napona u mreži. Električna mreža mora biti projektirana tako da se svaka promjena napona sustava stabilizira pomoću nekog kruga za regulaciju napona [14].

Kada distribuirani izvor daje snagu u mrežu, dolazi do utjecaja na regulaciju napona jer ona uvelike ovisi o protoku snage u mreži. Neće doći do narušavanja naponskih granica ako se distribuirani izvori nalaze u blizini opterećenja i ako je faktor snage u skladu s onim opterećenja [26]. Ukoliko električna energija proizvedena u distribuiranom postrojenju ide izvan okvira razine opterećenja, ili pri ekstremnom faktoru snage, doći će do povećanja napona. Ovo povećanje napona je uzrokovano obrnutim protokom snage i ovisi o kapacitetu distribuiranog izvora, faktoru snage i impedanciji mreže. Povećanje napona na spojnoj točki je rezultat snage koja se dovodi u mrežu, a za radijalne vodove ta promjena napona može biti izračunata sljedećom jednačbom [27]:

$$\Delta V = \frac{(P_S - P_L)R + (Q_S - Q_L)X}{V} \quad (1)$$

gdje su  $P_S$  i  $Q_S$  djelatna i jalova snaga distribuiranih izvora, a  $P_L$  i  $Q_L$  djelatna i jalova snaga vodova.  $R$  i  $X$  su otpor i reaktancija spojnog voda distribuiranog izvora do trafostanice.  $V$  je linijski napon na mjestu gdje je spojen distribuirani izvor. Ovaj scenarij je ilustriran na slici 6 u nastavku.





Slika 6. Prikaz naponskog profila mreže prije i nakon integracije: (a) Naponski profil na NN mreži bez distribuiranih obnovljivih izvora energije; (b) Profil napona u NN mreži s distribuiranim obnovljivim izvorima energije [26]

Promjene u naponu mogle bi dovesti do situacije narušavanja granica napona, gdje sustav nailazi na napone izvan standardnog raspona propisanog od strane regulatorne agencije. Ove oscilacije napona mogu dodatno dovesti do oštećenja električnih uređaja i mrežne opreme [26].

### 3.2.2 Učinci na gubitke u vodovima

Protok električne energije u vodiču uzrokovat će određene gubitke snage, što se može odrediti Ohmovim zakonom. U biti, gubici nastali zbog protoka struje se mogu analizirati sljedećom jednačinom:

$$P_G = \frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 R dt \quad (2)$$

Za sinusoidnu struju,  $i(t) = I_{\max} \sin \omega t$ , prosječni gubitak snage,  $P_G$ , tijekom kompletnog ciklusa ( $T = 2\pi$ ) izračunava se kao:

$$P_G = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (I_{\max}^2 \sin^2 \omega t) \times R d\omega t \quad (3)$$

pojednostavljeno:

$$P_G = I^2 R \quad (4)$$

gdje je:

$P_G$  = prosječni djelatni gubitci;

$I$  = korijen srednje vrijednosti struje voda;

$R$  = linijski otpor

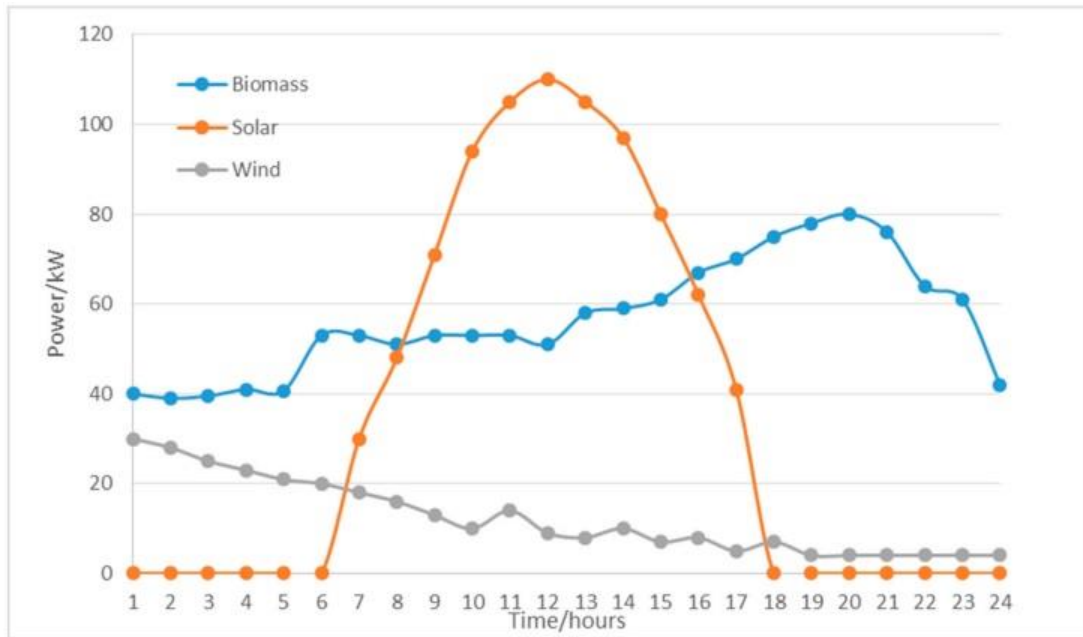
Kao što se vidi u jednadžbi gubitka snage, struja je funkcija toka snage u vodovima, a sve promjene u toku snage utječu na gubitke uvodu. Iznos nastalog gubitka u elektroenergetskom sustavu kao rezultat integracije distribuiranih izvora ovisit će o količini priključene električne energije i točki spajanja na mrežu. Kada su distribuirani izvori povezani s opterećenjem u distribucijskom dovodu, energija koju isporučuje distribuirani izvor izravno će se koristiti za električne uređaje i to smanjuje protok energije kao i gubitke u dovodu. Štoviše, smanjen je tok snage iz glavne mreže (VN/SN mreža) do potrošača, a rizik od preopterećenja mreže je sveden na minimum (prednost integracije) [27]. U situaciji u kojoj je energija koju distribuirani izvori isporučuju u distribucijsku mrežu veća od one za koju su vodiči predviđeni, doći će do povećanja gubitaka snage u mreži. Kumulativni učinak gubitaka snage može značajno utjecati na trošak upravljanja mrežom, a najčešće se taj trošak prebacuje na potrošače putem povećane tarife.

### 3.2.3 Varijacije električne energije vjetroelektrana i fotonaponskih elektrana

Količina električne energije koju proizvede sustavi solarne/vjetro elektrane ovisi o dostupnosti izvora sunca i vjetra na određenoj lokaciji. To je zato što solarno zračenje i brzina vjetra variraju, što čini učinak ovih energetske sustava promjenjivim. Budući da proizvodnja električne energije iz ovih izvora varira s vremenom i lokacijom, oscilacije u izlaznoj snazi mogu dovesti do nestabilnosti mreže i niske pouzdanosti [28].

Na primjer, ako je potražnja za energijom noću niska, a snaga vjetroturbine velika zbog velike brzine vjetra, više energije će se prenositi u glavnu mrežu i to će povećati gubitke. Ova situacija se može riješiti dodavanjem lokalnog sustava za pohranu energije radi lokalnog

stabiliziranja protoka energije i izbjegavanja prijenosa električne energije [28]. Slika 8 u nastavku prikazuje varijacije u obnovljivoj energiji resursa na određenoj lokaciji.



Slika 7. Primjer modela proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije [29]

### 3.2.4 Problematika s ekonomskog stajališta

Postrojenja distribuiranih izvora mogla bi biti izazovna kada se promatra iz perspektive upravljanja odnosima između operatora mreže i potrošača električne energije. Standardno poslovanje odnosno model koji koristi većina operatora mreže, je prodaja električne energije kao jedini akter u upravljanju mrežnom infrastrukturom. U slučaju da korisnik mreže postavi solarne panele na krovu, to će značiti da će korisnik nadoknaditi dio svoje električne energije i vjerojatno prodati nešto operatoru mreže. Očigledno, postoji sve veća zabrinutost oko ekonomske održivosti prihoda operatora mreže u kontekstu porasta distribuiranih obnovljivih izvora energije. Nekontrolirano priključenje energije iz distribuiranih izvora u glavnu mrežu može uzrokovati pregrijavanje komponenta mreže, što dovodi do smanjenja životnog vijeka opreme. Priključenje snage iz distribuiranih jedinica iznad određene razine integracije uzrokuje istrošenost transformatora i vodiča do kojih dolazi prije nego što je proizvođač predvidio. Kada se oprema istroši prije vremena koje je naveo proizvođač, dolazi do povećanja operativnih troškova za operatore mreža i to bi moglo utjecati na tarife električne energije.

### 3.2.5 Prijelazne promjene napona

Spajanje određenih tipova distribuiranih izvora na distribucijsku mrežu može dovesti do pojava promjena napona zbog sklopnih operacija u distribucijskom postrojenju, obično u fazi pokretanja/zaustavljanja opreme ili prekidača u kondenzatorskoj bateriji. Međunarodno, trenutno, nema posebnih naznaka prijelazne promjene napona i nema graničnih vrijednosti za ovu smetnju [5]. Distribuirano postrojenje može izazvati prijelazne promjene napona u sustav ako su dopuštene relativno velike varijacije struje tijekom procesa priključenja i isključenja distribuiranih izvora s mreže. Veličina struje pri prijelaznim pojavama može se u većoj mjeri kontrolirati tijekom faze projektiranja distribuiranih izvora. Međusobno povezivanje sinkronih generatora distribuiranih jedinica u mreži uzrokuje neznatne smetnje kada je sinkronizacija ispravno obavljena, a anti-paralelne komponente mekog pokretanja ("soft start") koriste se za smanjenje struje magnetiziranja indukcijskih generatora na vrijednost koja je manja od nazivne struje. S druge strane, isključivanje generatora koji radi na punom kapacitetu mogao bi uzrokovati znatne padove napona.

### 3.2.6 Treperenje napona

Integracija nekih distribuiranih obnovljivih izvora energije kao što je energija vjetra, unijeti će treptanje napona u sustavu električne mreže. To je zato što njihov izlazni napon varira s promjenom brzine i smjera vjetra. Prema British Standards Institution, procjena treperenja napona trebala bi se provesti u sustavu u fazi projektiranja [30] za sustave energije vjetra koji se spajaju na VN ili srednje naponske (SN) mreže. Indekse treperenja  $P_{st}$  i  $P_{st}$  treba procijeniti pomoću sljedeće formule:

$$P_{st} = P_{st} = C(\varphi_k, v_a) \frac{S_n}{S_k''} \quad (5)$$

$C(\varphi_k, v_a)$  = koeficijent treperenja vjetroelektrane dobiven nizom ispitivanja vjetroturbinama;

$\varphi_k$  = fazni kut impedancije mreže;

$v_a$  = prosječna brzina vjetra;

$S_n$  = nazivna snaga vjetroelektrane;

$S_k''$  = snaga kratkog spoja u točki zajedničkog spoja

### 3.2.7 Izobličenje harmonika

Distribuirani obnovljivi sustavi kao što su vjetroturbine, koji imaju električne komponente kao što su pretvarači, u nekom trenutku u procesu pretvorbe energije, mogu uvesti strujne harmonike praćene izobličenjem napona [9]. Redoslijed i veličina strujnih harmonika uvelike će ovisiti o vrsti pretvarača, karakteristikama pretvarača i načinu rada. Unatoč tome, najnoviji pretvarači koji povezuju distribuirane izvore s elektroenergetskom mrežom imaju sposobnost aktivnog oblikovanja svoje trenutne snage uz prihvatljivo ograničenje. Neke od priključenih harmoničkih struja mogu izobličiti profil napona, koji se može proširiti kroz cijelu mrežu [9]. Za vjetroturbine koje imaju ugrađeni indukcijski generator, može doći do pojave harmonika unutar kratkog vremenskog intervala pri pokretanju, uzrokovanog energetskim elektroničkim uređajem. Neka opterećenja također mogu biti izvor harmonika, gdje višestruko unose neželjene frekvencije u električnu mrežu od 50 ili 60 Hz, a to može uzrokovati neispravnost elektroenergetskog sustava [31]. Prisutnost harmonika u mreži dovodi do raznih problema uključujući porast temperature opreme, pada faktora snage komponenti elektroenergetskog sustava, neispravan odziv zaštitnih uređaja, komunikacijske smetnje signala, kvar susjedne opreme zbog rezonancije, buke, neželjene vibracije elektromotora itd. [32].

### 3.6.8 Nestabilnost mreže

U prošlosti su elektroenergetske mreže bile radijalne, s jednosmjernim protokom energije. Međutim, integracija veće snage iz distribuiranih izvora postao je problematičan jer je priključena snaga dosegla neprihvatljive razine. Kada je spojen na mrežu, distribuirani izvor istiskuje znatnu količinu energije iz glavne mreže, što utječe na dinamiku rada elektroenergetskog sustava. Mreža će biti izložena nestabilnosti, posebno za razinu uporabe snage distribuiranih izvora od preko 30%, u situaciji kada distribuirana jedinica zamjenjuje glavni konvencionalni generator glavne mreže, uzrokujući pad postojeće inercije u mreži. Međutim, razina integracije uvelike ovisi o granicama mreže.

Kada mrežni sustav ima odgovarajuću rotacijsku inerciju, to pomaže u stabilizaciji uobičajene velike neravnoteže koja se javlja tijekom rada između ponude i potražnje za energijom [28]. S druge strane, kada distribuirani izvor zamijeni središnji generator u glavnoj mreži, dolazi do pada postojeće inercije i može doći do povećanja stupnja neravnoteže između

ponude i potražnje za energijom. U slučaju pada rotacijske inercije i povlačenja velikog kapaciteta distribuiranih izvora, stabilnost mreže postaje narušena.

Posljedično, nestabilnosti u mreži uzrokovane integracijom distribuiranih izvora mogu se riješiti korištenjem kriterija „prolaska kroz grešku”, gdje su definirana standardna vremenska trajanja pri kojima distribuirani izvori ostaju priključeni na mrežu tijekom porasta ili pada napona (kvarovi). Ovo standardno trajanje obično se postavlja za velike generatore u glavnoj mreži i postaje imperativ za postavljanje istih standarda za distribuirane izvore povezane s mrežom na razini distribucije. Kriteriji također mogu pomoći u stabilizaciji frekvencije i napona tijekom kvarova; međutim, ovo ovisi o kapacitetu distribuiranog izvora. Budući da su distribuirani izvori kontinuirano povezani s mrežom tijekom lokalnih kvarova, moglo bi doći do smetnji u radu lokalnih zaštitnih uređaja odnosno oporavak i identifikacija kvara postaju otežani [28]. Stoga rastuća integracija distribuiranih izvora u mrežu zahtijeva sinkronizaciju među lokalnim zaštitnim uređajima, a potrebno je provesti opsežno istraživanje kako bi se osigurala stabilna mreža s distribuiranim izvorima.

### 3.2.9 Povećanje razine greške i sustav zaštite

Integracija distribuiranih izvora u distribucijsku mrežu može utjecati na osjetljivost mreže budući da bi eventualno mogli pridonijeti struji kvara. Način na koji je distribuirano postrojenje povezano s mrežom uvelike utječe na razinu doprinosa struje kvara, a to bi moglo značiti da su nazivne vrijednosti opreme prekoračene. Na primjer, distribuirani izvori koji su spojeni na mrežu preko pretvarača rijetko povećavaju struju kvara u usporedbi na one s izravnim priključkom na mrežu, gdje se dodaju značajne razine struje kvara [33]. Kada distribuirani izvori dodaju značajne količine struje kvara u mrežu, dolazi do negativnog utjecaja na zaštitne uređaje u mreži uzrokujući neispravan rad zaštitnih sustava i poteškoće u otkrivanju kvarova. Stoga će distribuirano postrojenje za povezivanje na mreže trebati imati sustav upravljanja zaštite opremljen sposobnošću podrške za dvosmjerni tok snage [33].

Toplinsko preopterećenje predstavlja problem za distribucijsku mrežu kao rezultat grijanja u mreži zbog snage koja prelazi nazivne snage komponenti sustava [34]. Transformatori su jedna od najskupljih komponenti elektroenergetskog sustava i bilo koje preopterećenje bi uzrokovalo oštećenje nekoliko mehanizama i ponekad dovelo do potpunog kvara.

Maksimalni kapacitet struje nadzemnog dalekovoda ovisi o ukupnom prijenosu topline s vodiča u okolinu, kao što je prikazano u jednadžbi (6) ;

$$I_L = \sqrt{\frac{\Delta H}{R}} \quad (6)$$

gdje je  $I_L$  struja nadzemnog dalekovoda (A),  $R$  je otpor vodiča, a  $\Delta H$  je toplina prenesena s vodiča u okolinu. Kada su komponente preopterećene, postoji potreba za nadogradnjom opreme na višu razinu. Stoga, kada se veće količine obnovljive energije priključe na mrežu, elektroenergetski sustavi morati će biti spremni i sposobni podržati priključenu energiju.

### 3.3 Prednosti integracije distribuiranih izvora u mrežu

Zbog brojnih prednosti integracije distribuiranih izvora u mrežu, raste interes za povećanje integracije. Prednosti postaju još veće integracijom distribuiranih postrojenja s tehnologijom obnovljivih izvora, gdje postoje dodatne značajne prednosti kao što su smanjenje razine emisija i kapitalnih troškova ulaganja u sustav OIE u usporedbi s konvencionalnom proizvodnjom energije temeljenom na fosilnim gorivima [8]. Općenito, priključenje električne energije iz distribuiranih izvora (obnovljivih i neobnovljivih) u osnovnu mrežu pruža brojne prednosti, kao što su smanjenje stvarnih gubitaka snage, stabilizacija napona, stabilnost mreže, pouzdanost sustava, smanjenje vršne potrošnje, podršku jalovoj snazi, kontrolu frekvencije i smanjenje troškova proizvodnje. Prednosti su ukratko objašnjeno u nastavku.

#### 3.3.1 Ograničenje vršne potrošnje

Budući da su distribuirani izvori uglavnom smješteni oko krajnjih korisnika, mogli bi nadoknaditi potražnju za električnom energijom tijekom vršnih razdoblja i pomoći u rasterećenju mreže. Ovo će izbjeći situacije koje bi mogle prouzročiti nestabilnosti i time poboljšati pouzdanost mreže. Količina kompenzacije vršne potrošnje ovisi o kapacitetu distribuiranih izvora, njegovom obrascu rada i profilu potražnje napajanja [29]. Kada se distribuiranim postrojenjem upravlja na način da smanjuje vršnu potrošnju na trafostanici, to smanjuje potrebu za rutinskim održavanjem i povećava životni vijek komponenti uz odgodu prijenosa i proširenja proizvodnih kapaciteta.

### 3.3.2 Smanjenje gubitaka energije u mreži

Zbog činjenice da je većina distribuiranih izvora instalirana u blizini centara opterećenja, gdje se proizvedena snaga ne mora prenositi dugim prijenosom, gubici snage su uvelike smanjeni [30]. Stoga se snaga lako isporučuje tamo gdje se proizvodi bez potrebe za opskrbom iz glavne mreže s velikim gubicima snage.

### 3.3.3 Regulacija frekvencije

Neke zemlje i stručna tijela, postavili su standardne raspone frekvencije za priključenje distribuiranih izvora na distribucijski sustav. Ovi standardi nude niz ograničenih frekvencijskih područja u kojima distribuirani izvori moraju raditi, izvan kojih će distribuirana jedinica biti automatski isključena iz mreže.

Postoje tehnologije koje nude funkciju regulacije frekvencije mreže prilagođavanjem frekvencije ovisno o situaciji. To je uobičajeno kod turbina s izgaranjem čija se brzina vrtnje može regulirati tako da odgovara željenoj frekvenciji.

Korištenje standardnih pretvarača koji omogućuju širi raspon frekvencije i napona, mogli bi ublažiti probleme slučajnog prekida napona i frekvencije. Štoviše, pametni pretvarači mogu se koristiti za smanjenje utjecaja distribuiranih izvora na frekvenciju te stoga nude i frekvencijsku podršku.

### 3.3.4 Stabilizacija napona

Kada se doda djelatna snaga ili se u mreži koristi jalova snaga, poboljšani su profili napona i faktor opterećenja mreže [28]. Distribuirani izvori su sposobni pružati djelatne snage i trošiti jalove snage i, prema tome, pružati podršku profilu napona i faktoru opterećenja mreže. Međutim, sposobnost distribuiranog postrojenja za izvođenje te funkcije ovisiti će o priključnoj točki i kapacitetu postrojenja.

### 3.3.5 Poboljšana pouzdanost i sigurnost opskrbe

Distribuirani izvori mogu pomoći u podršci glavnoj mreži u pouzdanom zadovoljavanju potražnje i to bi moglo biti korisno za kritična opterećenja kao što su telekomunikacijski sustavi, koji zahtijevaju napajanje s visokom pouzdanošću [35]. Porast



prodiranja distribuiranih izvora u kombinaciji s inteligentnim sustavima pomoći će u poboljšanju sigurnosti opskrbe jer će smanjiti ovisnost o konvencionalnim izvorima energije integracijom obnovljivih izvora.

### 3.3.6 Isporuka pomoćnih usluga

Pomoćne usluge važne su za pouzdan rad elektroenergetskog sustava. Operatori mreže mogli bi instalirati distribuirane izvore za pružanje pomoćnih usluga kao što je potpora jalove snage, pričuvni sustavi i rezerve. To znači da bi mogli biti u stanju pripravnosti za napajanje u slučaju nužde ili nestanka struje. Postoji potencijal korištenja distribuiranih izvora u pomoćne usluge i ekonomski doprinos pri pružanju pomoćnih usluga [35].

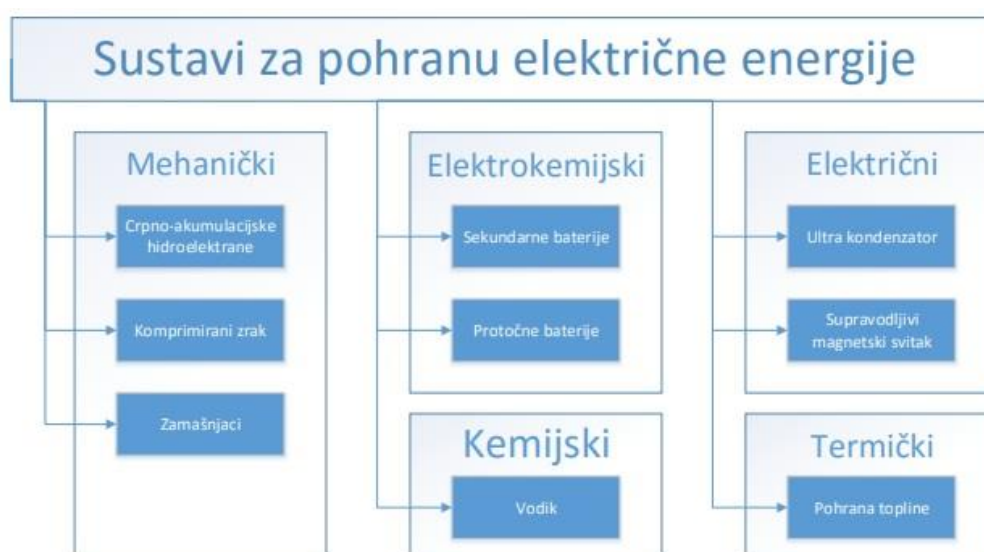
### 3.3.7 Ekonomska održivost projekata distribuiranih izvora

Distribuirana proizvodnja ima potencijal smanjiti račune kupaca za električnu energiju i isporučiti ju s poboljšanom učinkovitošću [9]. Tarife električne energije obično uzimaju u obzir neučinkovitosti prijenosne i distribucijske mreže, gdje se javljaju gubici električne energije, te se ova situacija pojačava kada je udaljenost prijenosa velika. Distribuirana proizvodnja bi tarife za električnu energiju mogla učiniti jeftinima i pristupačnima budući da se energija proizvodi u blizini centara opterećenja, ali to nije moguće postići s centraliziranom električnom mrežom, gdje se energija prenosi na velike udaljenosti do potrošača, stvarajući ogromne troškove linijskih gubitaka. Na liberaliziranom energetske tržištu, gdje je investitorima dopušteno instalirati vlastite distribuirane izvore, povećava se fleksibilnost sustava i konkurencija, što dovodi do smanjenja cijene električne energije.

Instalacija distribuiranih postrojenja zahtijeva relativno kratko vrijeme i manja ulaganja za razliku od velikih elektrana u glavnoj mreži te modularna priroda distribuiranih izvora čini njihovu montažu vrlo jednostavnom. Distribuirani izvori (generatori) nisu međusobno ovisni i na njih se ne može utjecati radom drugih generatora, tako da kvar jednog ne utječe na drugi. Kapitalni trošak uvelike se smanjuje jer će izgradnja distribuiranih izvora dovesti do uštede pri smanjenju izgradnje prijenosne infrastrukture. U područjima gdje postoje kazne za onečišćenja okoliša, distribuirani sustavi obnovljive energije s malim emisijama će pomoći u smanjenju popratnih troškova ekoloških kazni.

## 4. SPREMNICI ELEKTRIČNE ENERGIJE I NJIHOVA PRIMJENA U DISTRIBUCIJSKOM SUSTAVU

Postoji nekoliko tehnologija skladištenja električne energije za pružanje različitih vrsta usluga prijenosnim i distribucijskim mrežama, posebno za poboljšanje prekograničnih prijenosa, regulacije napona i frekvencije, kao što su vodikove gorivne ćelije, reverzibilne hidroelektrane, komprimirani zrak, baterije, zamašnjaci, superkondenzatori i supravodiči. Ove tehnologije se mogu podijeliti na elektrokemijske, toplinske, mehaničke, kemijske, elektromagnetske i hibridne tehnologije pohrane. U usporedbi s drugim tehnologijama pohrane različite namjene pored mrežnih usluga, svaki sustav ima različite karakteristike, prednosti i nedostatke i odgovara određenoj razini zrelosti.



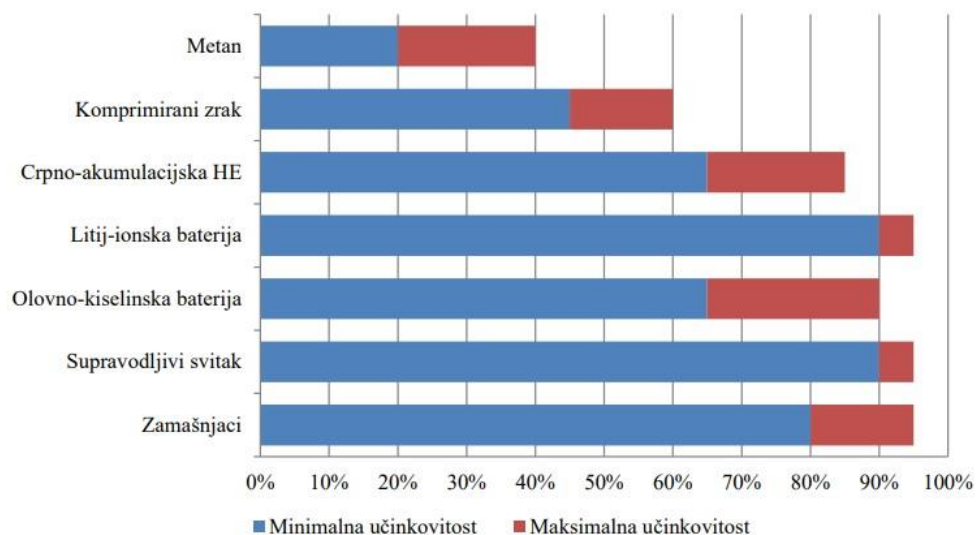
Slika 8. Vrste tehnologija za pohranu energije [37]

Crpno-akumulacijska (reverzibilna) hidroelektrana je najzrelija tehnologija i naširoko je raspoređena desetljećima. Sustavi za skladištenje topline kao i sustavi skladištenja komprimiranim zrakom već su implementirani i komercijalizirani, ali ukupni instalirani kapaciteti su relativno niski zbog niske učinkovitosti, geografskih ograničenja, specifičnih zahtjeva koji se tiču medija za pohranu i ekonomije.

Decentralizirana mala i srednja rješenja za pohranu energije dobivaju na važnosti, gdje različiti elektrokemijski i toplinski sustavi za pohranu energije, kao što su stambeni grijači sa pohranom tople vode, igraju veliku ulogu u smanjenju vršne potražnje u mreži. Elektrokemijski baterijski sustavi za pohranu temeljeni na litiju jedni su od vodećih

tehnologija. Osobito u malim stambenim sustavima za pohranu, danas se uglavnom koristi litij-ionska tehnologija, iako je olovna tehnologija bila dominantna prije nekoliko godina. Razlog za to je napredak litij-ionske tehnologije posljednjih godina koji je uključivao povećanje gustoće energije i smanjenje cijene za 50% [36]. Osim toga, baterijski sustavi za pohranu temeljeni na litiju imaju velik broj ciklusa punjenja i pražnjenja (do 15.000 ciklusa). Očekuje se da će troškovi baterijskih sustava za pohranu na bazi litija idalje padati i biti djelomično superiorniji u odnosu na druge tehnologije. Ne samo cijena, već i fleksibilnost baterijskih sustava pohrane su konkurentni budući da se mogu postaviti na različite razine mreže i tako pokriti širok raspon upotrebe.

Elektromagnetski sustavi za pohranjivanje kao što su superkondenzatori (ili ultrakondenzatori) i supravodljivi sustavi za pohranu magnetske energije, kao i mehanički sustavi za pohranjivanje energije zamašnjaka dizajnirani su za kratka vremena pražnjenja i stoga nisu prikladni za usluge koje zahtijevaju značajni kapacitet pohrane. Štoviše, stopa samopražnjenja takvih sustava je prilično visoka. Međutim, u kombinaciji s drugim tehnologijama pohrane u tzv. hibridnom konceptu sustava pohrane, sustavi za skladištenje visokih performansi kratkoročno mogu pružiti vršnu snagu što dovodi do optimiziranog radnog profila i produljenja životnog vijeka. Slika 9. prikazuje efikasnost pojedinih tehnologija.



Slika 9. Efikasnost pojedinih tehnologija za pohranu energije [37]

Vrijednost spremnika energije ovisi o njegovom položaju u elektroenergetskoj mreži. Ekonomske vrijednosti rastu kako se približavaju rubu mreže i opterećenja korisnika sa

značajnom promjenjivošću, gdje ekonomske koristi dobivaju i operatori mreže i krajnji korisnici. U usporedbi sa skupnim skladištenjem energije, distribuirana pohrana je dokazala svoju vrijednost za pružanje veće fleksibilnosti mreži. Trenutna praksa uključuje instalaciju distribuirane pohrane s obnovljivim izvorima energije za podršku njihovoj integraciji.

Tehnologije distribuirane pohrane nisu široko zastupljene u regijama i još uvijek su u razvoju. Većina operatora prijenosnog sustava ima iskustva u upravljanju velikim reverzibilnim hidroelektranama, ali im nedostaje iskustva s malim i distribuiranim skladištima energije. Prema Grčkom distribucijskom operatoru, stambeni baterijski sustavi za pohranu energije bit će dostupni u distribucijskoj mreži na razini od 400 V na otoku Kythons [36]. Postoji ukupno pet skladišnih sustava kapaciteta 0,0025MW/0,006MWh za svaku jedinicu. Međutim, primjene ovih distribuiranih pohrana prilično su ograničene. Trenutno im je dopuštena instalacija kod korisnika, koji proizvode i troše električnu energiju i dobivaju ugovore kao i u slučajevima hibridnih elektrana koje rade u otočnom radu.

Uz baterijsku pohranu, električna vozila (EV) smatraju se drugom vrstom distribuirane pohrane. Tržišni udio električnih vozila značajno se povećao posljednjih godina, budući da se električna vozila smatraju alternativnim oblikom prijevoza u usporedbi s vozilima na fosilna goriva, a podupiru ih svjetske vlade (npr. Hrvatska: 1,5 – 7,5 MW, Rumunjska: 2811 jedinica uključujući 514 električnih vozila i 2297 hibridnih vozila), ali ova električna vozila još ne mogu pružati nikakve usluge [36].

#### **4.1 Klasifikacija i tipovi spremnika električne energije**

Svaka kategorija skladištenja ima nekoliko podtehnologija, koje se također razlikuju po korištenom sastavu materijala kao u slučaju elektrokemijskih sustava za pohranu ili se razlikuju po principu rada, npr. pumpanje vode u rezervoar ili kompresija zraka. Neke se tehnologije koriste za kratkoročnu pohranu (od minuta do sati), a neke se koriste za dugotrajno skladištenje (dani ili čak tjedni). Daljnje važne karakteristike uključuju učinkovitost, životni vijek i troškove.

#### 4.1.1 Elektrokemijski spremnici energije

Sustav za pohranu elektrokemijske energije baziran je na tehnologiji gdje se kemijska energija nalazi u aktivnom materijalu te se izravno pretvara u električnu energiju.

Funkcionalni princip elektrokemijskog spremnika energije temelji se na pretvorbi kemijske energije u električnu energiju. Bilo koja kemijska reakcija koja može osloboditi elektron i tako stvoriti elektricitet struje, teoretski se može koristiti u toj vrsti tehnologije. Veza katode i anode predstavlja jednu ćeliju baterije. Svaka ćelija ima fiksni napon i kapacitet (ovisno o težini ćelija). Ako su ćelije povezane paralelno, tada se ukupni kapacitet baterije udvostručuje, a ako se dvije ćelije stave u seriju, tada se ukupni napon baterije udvostručuje.

Ovisno o prethodnom odabiru konfiguracije baterije, moguće je podesiti ukupni napon i ukupni kapacitet baterije. Svaki par materijala ima specifična svojstva napona i kapaciteta koji će odrediti veličinu i težinu baterije. Različiti primjeri prikazani su u tablici 4.1. Broj ciklusa pražnjenja također je specifičan za svaki sastav materijala i definirat će životni vijek baterija.

*Tablica 4.1 Parametri različitih vrsta ćelija [35]*

<b>Elementi</b>	<b>Napon ćelije (V)</b>	<b>Prosječni specifični kapacitet (Wh/kg)</b>	<b>Ciklusi</b>
Ni-Cd	1.2	40-55	2500
Ni-MH	1.2	70-100	1000
Ni-Zn	1.65	70-80	1500
Li-ion	3.6	90-400	3000
Li-po	3.75	100-200	300-500

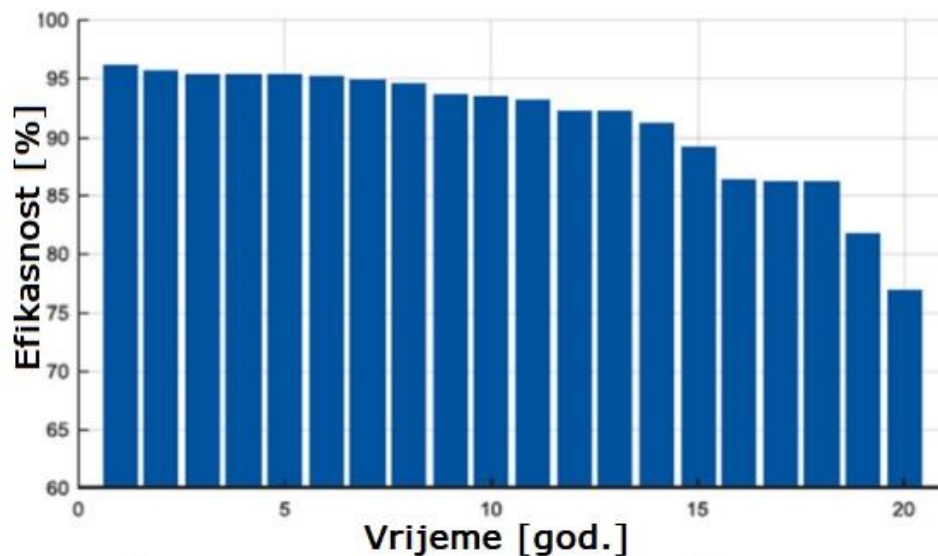
Trenutno se baterije proizvode u mnogim veličinama za širok spektar primjena. Isporučene snage kreću se od W do stotina kW (usporedba baterije za napajanje male igračke i baterije za teška motorna vozila ili za elektranu).

Uobičajene komercijalno dostupne baterije prema korištenom elektrokemijskom sastavu mogu se podijeliti u sljedeće osnovne skupine: Standardne baterije (olovne kiseline, Ni-Cd)

moderne baterije (Ni-MH, Li-ion, Li-pol), specijalne baterije (Ag-Zn, Ni-H<sub>2</sub>), protočne baterije (Br<sub>2</sub>-Zn) i visoke temperaturne baterije (Na-S, Na–metalklorid).

Analizom učinkovitosti različitih baterijskih sustava skladištenja energije, može se primijetiti velike razlike. Također je vidljivo da učinkovitost ovisi o nominalnoj snazi. Dok najbolji sustav ima učinkovitost od 92-93% u punom rasponu snage, drugi sustavi postižu učinkovitost ispod 85% u određenim točkama. Za rad baterijskih sustava skladištenja krivulja učinkovitosti je važna karakteristika. Strategiju rada treba podesiti na način da baterijski sustav radi u najučinkovitijoj radnoj točki što je češće moguće.

Na slici 10 ukupna učinkovitost različitih elektrokemijskih sustava za pohranu tijekom dugog razdoblja ilustrirana je prema godinama. Najlošija učinkovitost je 77%, a najbolja 96% što je veliki raspon.



Slika 10. Učinkovitost elektrokemijskih spremnika energije kroz dugi period [36]

Baterijski sustavi za skladištenje energije koriste različite vrste baterija i pretvarača. Za punjenje baterijskih sustava energija iz solarne elektrane mora se prenijeti na bateriju. S prijenosom energije na putu od solarne elektrane do baterije nastaju gubici konverzije. Gledajući prednosti i nedostatke tehnologija elektrokemijske pohrane postoje razlike među različitim tipovima kao što možemo vidjeti u tablici 4.2. Tablica se sastoji od najrelevantnijih tipova baterijskih sustava.

Tablica 4.2 Komparativna procjena tehnologija [36]

Tehnologija elektrokemijskih spremnika	Prednosti	Ograničenja
Olovno-kiselinska	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gustoća snage za stacionarne primjene</li> <li>- Nije potrebno složeno upravljanje</li> <li>- Može se implementirati u velike skladišne prostore</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ograničen broj ciklusa</li> <li>- Potreba za ventilacijskim sustavom</li> <li>- Sposobnost punjenja i pražnjenja nije simetrična</li> </ul>
Litij-ionska	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Velika učinkovitost</li> <li>- Male dimenzije, male mase</li> <li>- Brzi odziv</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rizik od požara i generiranje topline</li> <li>- Potreba za stabilizacijom napona</li> </ul>
Natrijev sulfid	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Visoka energetska učinkovitost</li> <li>- Visoka mogućnost recikliranja</li> <li>- Veliki nazivni kapacitet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Visoki troškovi održavanja</li> <li>- Za kemijske reakcije potrebna je temperatura od 574–624 K</li> <li>- Prikladno samo za velike stacionarne primjene</li> </ul>
Nikal-kadmij	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Visoka robusna pouzdanost</li> <li>- Niska potreba za održavanjem</li> <li>- Dobra radna svojstva pri niskim temperaturama</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Toksični teški materijali</li> <li>- Maksimalni kapacitet može se dramatično smanjiti ako se baterija puni nakon što je bila samo djelomično ispražnjena</li> </ul>

Litij-ionska tehnologija ima najveću gustoću energije i dobru učinkovitost stoga je poželjna tehnologija u stacionarnoj i automobilskoj primjeni. Učinkovitost olovno-kiselinske baterije je gotovo jednako visoka kao kod litij-ion baterije; međutim, gustoća energije je najmanja i broj ciklusa je ograničen. Stanice natrijevog sulfida trebaju vrlo visoku temperaturama za rad, pa imaju visoke kapitalne troškove što ih čini manje privlačnim za operatore. NiCd baterije u usporedbi s olovno-kiselinskim imaju slične karakteristike, ali su znatno skuplje. NiMH tehnologija ima bolju gustoću energije od NiCd i nema potrebe za kadmijem.

#### 4.1.2 Toplinski spremnici energije

Toplinski spremnici sastoje se od tehnologije koja pohranjuje toplinsku energiju za kasniju upotrebu. Ovi sustavi se sastoje od tri osnovna dijela: materijal za skladištenje, izmjenjivač topline i sustav upravljanja.

Postoje tri vrste sustava za pohranu topline:

- Senzibilno skladištenje topline
- Latentno skladištenje topline
- Termokemijsko skladištenje topline

Toplinska energija se može pohraniti zagrijavanjem ili hlađenjem medija za pohranu. Funkcionalni princip tehnologija se može grupirati u tri različite kategorije:

- Senzibilno skladištenje topline: energija se skladišti u obliku senzibilne topline na temelju specifične topline medija za pohranu, koji može biti tekućina, poput vode ili termo-ulja, ili čvrsta tvar, poput betona ili tla. Energija se pohranjuje i oslobađa podizanjem i snižavanjem temperature medija, koji se obično čuva u spremnicima s visokom toplinskom izolacijom. Specifični toplinski kapacitet i masa medija za pohranu definira kapacitet sustava, dok izolacija spremnika određuje toplinske gubitke i vrijeme skladištenja. Ovo je najzrelija i najčešće korištena tehnologija, a voda je najkomercijalniji medij za skladištenje topline koji se koristi u brojnim stambenim i industrijskim objektima. Korištenje solarne energije i pumpi topline je sve češće, kako bi se dosegla veća učinkovitost. U primjenama velikih razmjera, obično se koristi jamsko skladištenje i podzemno skladištenje senzibilne topline, u tekućim i čvrstim medijima.



- Latentno skladištenje topline: energija se izmjenjuje i pohranjuje kroz promjenu faze medija za skladištenje, iskoristavajući latentnu toplinu apsorbiranu ili otpuštenu pri konstantnoj temperaturi tijekom postupka. S obzirom na to da nema promjene temperature, latentna toplina se naziva i "skrivena" toplina i može omogućiti ciljno usmjerenu temperaturu pražnjenja. Materijali s promjenom faze mogu ponuditi visok kapacitet skladištenja i obično se odabiru ovisno o temperaturi primjene. Fazna se promjena kruto-tekuće najčešće koristi s procesima taljenja za skladištenje topline i skrućivanje. Materijal za promjenu faze obično je drugačiji od tekućine za prijenos topline, inkapsuliran u spremnicima s tekućinom za prijenos topline koja teče preko njega ili korištenjem izmjenjivača topline umetnutog u spremište od tog materijala. Velika je primjena rastaljene soli kao medija pohrane topline za koncentrirane fotonaponske elektrane.
- Termokemijsko skladištenje topline: reverzibilne termokemijske reakcije koriste se za skladištenje velikih količina topline u malim volumenima, akumuliranjem i pražnjenjem energije prema potrebi, korištenjem različitih kemijskih reaktanata. U procesima kemijske reakcije toplina se dovodi do materijala kojega se razgrađuje u dvije komponente, koje se zatim odvojeno pohranjuju i mogu se rekombinirati i otpustiti toplinu kada se ponovno spoje. U adsorpcijskim procesima toplinska energija se pohranjuje ili kroz adsorpciju (fizičko vezanje) ili putem apsorpcije (upijanje/otapanje materijala). Ovi sustavi koriste kombinaciju dva različita materijala, od kojih je jedan adsorbirajući kao čvrsti materijal a drugi je adsorbirajući kao plinoviti materijal. Tipične primjene uključuju adsorpciju vodene pare, silika gela ili zeolita.

Adsorpcijsko skladištenje energije postaje osobito važno za hlađenje, klimatizaciju te u primjeni kombinirano s toplinskim pumpama ili u kogeneracijskim postrojenjima. Druga područja primjene uključuju iskoristavanje otpadne topline i skladištenje vodika u kombinaciji sa skladištenjem toplinske energije kako bi se zaštitila energija iz obnovljivih izvora energije i proizvela električna energija prema potrebi. Međutim, termokemijski sustavi za pohranu još uvijek su najmanje razvijeni, zahtijevaju složene dizajne reaktora kako bi se postigla željena radna učinkovitost.

Tablica 4.3 prikazuje prednosti i ograničenja toplinskih spremnika energije. Iako postoje stambeni sustavi za pohranu topline diljem svijeta, ne postoji visoka razina komercijalizacije.

Tablica 4.3 Komparativna procjena tehnologija toplinskih spremnika energije [36]

Vrsta	Prednosti	Ograničenja
<b>Senzibilno skladištenje topline</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Skladišni materijal tehnički može biti bilo koji materijal. Zbog niske cijene često se koristi voda</li> <li>❖ Toplinska vodljivost materijala ne ograničava njegovu sposobnost skladištenja topline</li> <li>❖ Uređaji za raslojavanje mogu povećati toplinsku učinkovitost sustava</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Plinovi se obično ne koriste jer se njihov volumen mijenja značajno s temperaturom</li> <li>❖ Količina topline koja se može pohraniti u materijalu ovisi o količini materijala</li> <li>❖ Količina osjetne topline koja se može pohraniti je ograničena temperaturom promjene faze</li> </ul>
<b>Latentno skladištenje topline</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Postoji tekućina-krutina, tekućina-plin i čvrsto-kruta prijelazna faza</li> <li>❖ Postoji nekoliko materijala koji se mogu koristiti za promjenu faze</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Potreba za posebnim materijalima</li> <li>❖ Temperature promjene faze moraju biti iznad temperature opterećenja i ispod temperature izvora topline</li> </ul>
<b>Termokemijsko skladištenje topline</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Nema toplinskih gubitaka tijekom skladištenja pri sobnoj temperaturi</li> <li>❖ Gustoća energije materijala za skladištenje je 5 do 10 puta viši od latentnih i senzibilnih sustava</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Tehnologija je još uvijek uglavnom u istraživanju i fazi razvoja</li> </ul>

#### 4.1.3 Mehanički spremnici energije

Ovaj sustav za pohranu energije temelji se na elektromehaničkim sustavima za pohranu koji pretvaraju električnu energiju u oblike energije koje je lakše skladištiti. Uključene su sljedeće tehnologije: zamašnjaci, hidroenergija, gravitacijska, komprimirani zrak i tekući zrak. Kao glavna prednost mehaničkog skladištenja ističe se životni vijek tehnologije, koji je dulji od drugih sustava za pohranu, jer je određen vijekom trajanja mehaničkih komponenti.

Skladištenje energije zamašnjaka:

Načelo pohrane temelji se na rotirajućem elementu koji može pohraniti kinetičku energiju. Zamašnjak nastavlja svoje kretanje po inerciji kada prestane djelovati moment koji ga pokreće zbog gotovo nultog trenja koje se postiže magnetskim ležajevima. Količina energije koja se može pohraniti ovisi o njegovoj masi, geometriji i, iznad svega, o brzini kojom se može okretati. Karakteristični parametri sustava pohrane zamašnjacima, ukazuju na visoku učinkovitost (85-95%) te podržavaju nekoliko stotina tisuća punih ciklusa punjenja/praznjenja zajedno s odsutnošću degradacije [37]. Odnos veličine i mogućnosti skladištenja je oko 30-600 W/Kg i 10-80 Wh/Kg [39]. Glavne primjene sustava zamašnjaka su gdje je potrebna velika snaga (5 do 10 puta veća od baterije), brz odziv (oko 4 ms) i kratkog trajanja (za osiguranje rezervnog vremena od 15 sekundi ili za djelovanje kao most za povezivanje drugog izvora) [39]. Zahtijevaju malo održavanja, imaju kratko vrijeme punjenja, dopuštaju potpuno praznjenje, imaju visoku učinkovitost i gubitke ne više od 2-5% nominalne snage po satu rada u stanju pripravnosti [37]. Nedostatak je visoki kapitalni trošak (1000-5000 €/kWh) [39].

Crpno-akumulacijska (reverzibilna) hidroelektrana:

Ova tehnologija pohranjuje energiju u obliku gravitacijske potencijalne energije iz vode, pumpane od spremnika niže razine do spremnika više razine. Ovo je najzrelija i najraširenija tehnologija.

Gravitacijsko skladištenje energije:

Ova se tehnologija temelji na energetsom punjenju/praznjenju podizanjem/spuštanjem velikih čvrstih masa sa ili bez potpore tekućine. Ovi sustavi još nisu dosegli potpuno komercijalnu fazu primjene u električnim mrežama. Snaga kojom upravlja sustav u različitim

projektima je raznolika, u rasponu od 11 kW do oko 3 GW [39]. Prema parametru učinkovitosti, također varira ovisno o analiziranom prototipu. Tehnologija ne uzrokuje veliki utjecaj na okoliš zbog kontaminacije, iako zahtijeva građevinske radove i to može dovesti do promjene okoliša. Jednom kad je instaliran, potpuno je čist način pohranjivanja energije [39].

Spremnici komprimiranim zrakom:

Ova tehnologija komprimira zrak i pohranjuje ga u spremnik ili u podzemne kanale i šupljine. Kako bi povratio pohranjenu energiju, plin ekspanrira u turbini.

Skladištenje energije u tekućem zraku:

Ova tehnologija odnosi se na proizvodnju pri vrlo niskih temperatura. Nova tehnologija koja koristi tekući zrak kako bi se stvorila rezerva energije koja se može pohraniti u velikim razmjerima dulje vrijeme. Temelji se na ukapljivanju i odvajanju zraka za proizvodnju dušika ili kisika za industrijsku upotrebu. Tekućina zraka se skladišti u izoliranim spremnicima bez dodatne potrošnje energije. Kada ispari i ponovno se rasplini, povećanje tlaka i volumena koristi se za pogon turbina koje daju snagu u mrežu. Ova tehnologija može ponuditi pohranu velikih razmjera bez geografskih ograničenja. Rasponi snage od 5 MW / 20 MWh do 100 MW / 1000 MWh [39]. U odnosu na karakteristike učinkovitosti, naznačene su niže vrijednosti nego za inercijske i gravitacijske tehnologije zamašnjaka, oko 70%. Što se tiče vremena odziva, sporiji je od prethodnih (manje od 20 minuta ako je tekućina hladna i oko 2 sata ili više ako ukapljivač nije radio nedavno).

#### 4.1.4 Kemijski spremnici energije

Temelje se na energiji pohranjenoj kemijskim reagensima. Kada se energija izvuče iz baterije, energija se mijenja iz kemijske u električnu izravno protokom elektrona kroz medij koji je propustan za kretanje. Uključene su sljedeće tehnologije: vodikove gorivne ćelije, gorivne ćelije s izravnim metanolom, rastaljene karbonatne gorivne ćelije, krute oksidne gorivne ćelije i gorivne ćelije s izravnim etanolom. Sve ove tehnologije mogu se koristiti za proizvodnju električne energije, ali samo su vodikove baterije reverzibilne. Prednost vodika je u tome što se može proizvesti korištenjem električne energije u procesu elektrolize vode. Osim toga, gorivne ćelije s krutim oksidom i rastaljene karbonatne gorivne ćelije imaju visoku radnu temperaturu, što znači da im je potreban pomoćni sustav grijanja. Ovi sustavi

grijanja mogu se koristiti kao kogeneracija sustava. Međutim, vrijeme potrebno za postizanje radnih temperatura je veliko, ali tehnologija je još uvijek u razvoju.

Gorivne ćelije tipična su tipologija sustava za skladištenje. Gorivne ćelije su elementi u kojima se elektrokemijsko gorivo pretvara u električnu energiju bez potrebe za izgaranjem. Vodik nije jedino gorivo koje se može koristiti. Također se mogu koristiti metanol, etanol ili metan a zatim se pretvaraju u vodik i ugljikov monoksid. Formiraju ih dvije elektrode odvojene elektrolitom, koji omogućuje prolaz iona, ali ne i elektrona. Na negativnoj elektrodi (katodi) dolazi do oksidacije goriva dok na pozitivnoj (anodi) dolazi do razdiobe kisika iz zraka. Glavna značajka gorivih ćelija je da ih treba napajati iz vanjskog spremnika energije.

Što se tiče okoliša, ove tehnologije imaju veliku prednost u odnosu na druge sustave pohrane budući da su rezultirajući proizvodi voda ili kisik (ako se koristi u reverzibilnom načinu). Međutim, mora se upozoriti da postoji veliki rizik pri rukovanju plinovima [39]. Vrijeme odziva je visoko u usporedbi s drugim tehnologijama pohrane. Ova karakteristika je prepreka za primjenu tehnologije kemijskog skladištenja kao stabilizatora distribucijskog sustava. Nedostatak sustava je relativno niska učinkovitost za pretvorbu električne energije.

*Tablica 4.4 Usporedba gorivnih ćelija [37]*

<b>Gorivne ćelije</b>	<b>Radna temperatura(°C)</b>	<b>Gorivo</b>	<b>Efikasnost (%)</b>	<b>Snaga (kW)</b>
Vodikove gorivne ćelije	50-100	Vodik	30-70	0.1-1000
Gorivne ćelije s izravnim metanolom	90-120	Metanol	20-30	100-1000
Rastaljene karbonatne gorivne ćelije	90-120	Etanol	20-30	100-1000
Krute oksidne gorivne ćelije	650-700	Vodik H <sub>2</sub> + CO	50-60	100-300
Gorivne ćelije s izravnim etanolom	800-1000	Prirodni plin Vodik H <sub>2</sub> + CO	50-60	0.5-100

Vrijedan parametar ove tehnologije je visoka gustoća energije koja je proporcionalna razini kompresije goriva. Što se tiče razina snage, parametri prema vrsti gorivne ćelije prikazani su u Tablici 4.4 [39]. Postoje komercijalni proizvodi vodikovih baterija, ali još uvijek tehnologija nije u potpunosti zrela, međutim, to je dugoročno jedna od tehnologija koja najviše obećava. Projekti primjene velike snage trenutno su u fazi razvoja.

Uspoređujući značajke najčešćih tehnologija pohrane (isplativost, kvaliteta, neprekidnost napajanja i opcije za regulaciju i upravljanje opterećenjem), tehnologija kemijskog skladištenja bila bi zanimljiva za sljedeće primjene:

- Podrška oko 15 sekundi ili duže.
- Veliki vodikovi sustavi sa sustavom komprimiranog zraka za jeftino upravljanje opterećenjem.
- Gorivne ćelije ili motori na vodik izravnim napajanjem.
- Za duge životne cikluse, vodikove baterije se natječu s baterijskim sustavima za vremena pražnjenja dulja od 2 sata.
- Reverzibilni rad gorivnih ćelija čini se razumnim pri vremenu pražnjenja do 4 sata.

Trošak po jedinici instalirane energije je nizak u usporedbi s drugim sustavima za pohranu energije. Investicijski trošak po instaliranom kapacitetu manji je od 1000 €/kWh [39].

#### 4.1.5 Elektromagnetski spremnici energije

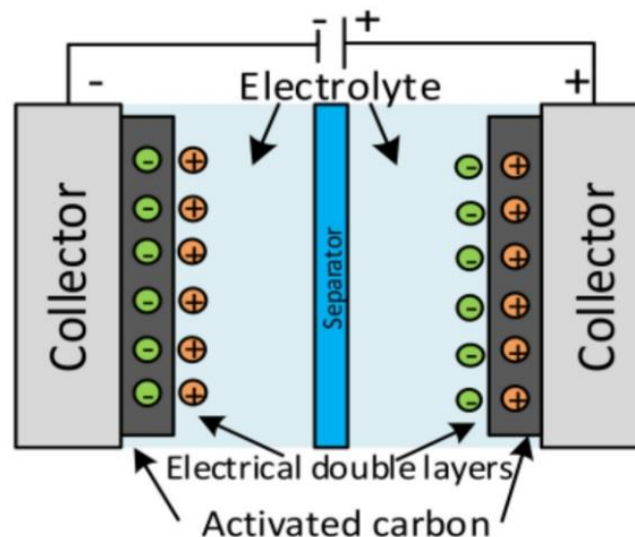
Treba spomenuti uglavnom dvije tehnologije: superkondenzatore (ili ultrakondenzatore) i supravodljive sustave za pohranu magnetske energije.

Superkondenzatori imaju princip rada sličan tradicionalnim kondenzatorima. Ipak, njihov kapacitet i struja pražnjenja su mnogo veći. Glavna razlika u usporedbi s konvencionalnim kondenzatorima temelji se na dva aspekta:

- Energija se pohranjuje na granici između porozne vodljive elektrode i tekućeg elektrolita ionskog vodiča
- Površina je znatno povećana zbog vrlo velike poroznosti elektrode

Superkondenzatori se sastoje od dvije metalne elektrode koje omogućuju promjenu potencijala kroz ćelije. Iz tog razloga primjenjuju se dva dvostruka sloja, po jedan na svakom

sučelju elektroda/elektrolit. Separator propustan za ione nalazi se između elektroda kako bi se spriječio električni kontakt, ali i dalje propušta ione iz elektrolita koji trebaju proći. Elektrode su izrađene od visoko učinkovitih površinskih materijala, poput poroznog karbona ili karbonskog aerogela. Koriste se dvije glavne tehnologije: vodena (maksimalni napon od 1,2 V i nazivni napon od 0,9 V) i organski (napon blizu 3 V, ali s puno većim serijskim otporom) [39]. Superkondenzatori se koriste za kompenzaciju pada napona u slabim mrežama, omogućujući vrlo intenzivnu vršnu snagu. Učinkovitost od oko 90% može se postići u cijelom ciklusu punjenja i pražnjenja. Glavna karakteristika superkondenzatora koja ga čini pogodnim za korištenje kao spremnik energije je mogućnost brzog punjenja i pražnjenja bez gubitka učinkovitosti tisućama ciklusa. To je moguće jer superkondenzatori pohranjuju električnu energiju izravno. Mogu pohraniti ili oslobađati energiju velikom brzinom, ali imaju ograničen kapacitet u usporedbi s baterijama. Superkondenzatori se mogu ponovno napuniti u vrlo kratkom vremenu i imaju veliku mogućnost opskrbe visokim i čestim vršnim zahtjevima za napajanjem. Zatim se obično koriste kao dodatak baterijskom sustavu kako bi se smanjila njihova ukupna gustoća snage i iskoristila sinergija kombiniranja dvaju tehnologije. Izolirani superkondenzatorski sustavi još su u fazi demonstracije, ali već postoje različita pilotska iskustva. Glavni pravci istraživanja usmjereni su na upotrebu superkondenzatora u hibridnim sustavima za pohranu u kombinaciji s gorivnim ćelijama ili elektrokemijskim baterijama, jer su ti sustavi komplementarni.



Slika 11. Struktura superkondenzatora [19]

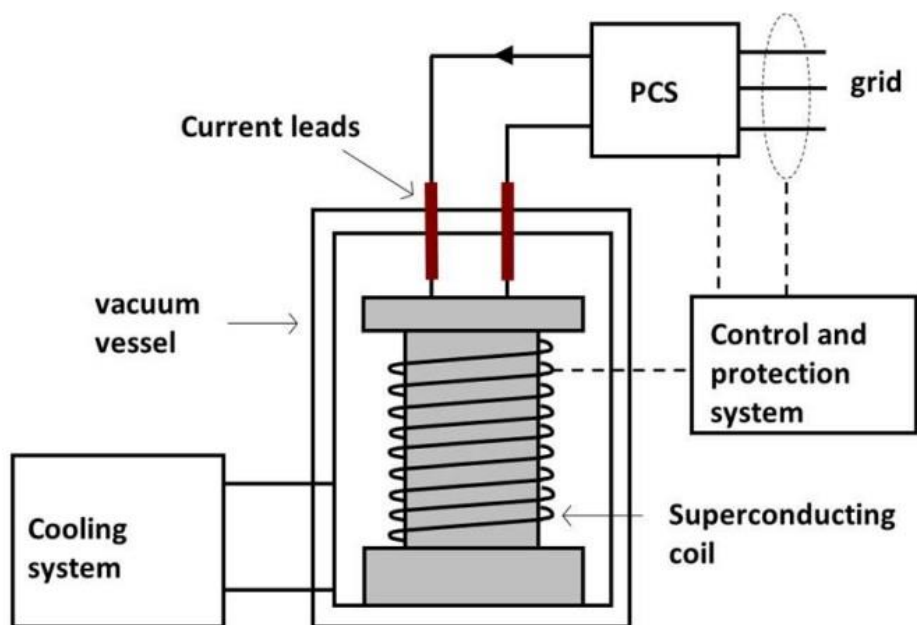
Zbog napretka tehnologije i povećanja kapaciteta za pohranu energije, ovi sustavi su na početku uzeti u obzir za sustave za pohranu energije u postrojenjima za proizvodnju

obnovljive energije. Drugi scenariji gdje se počinje istraživati korištenje sustava temeljenih na superkondenzatorima su: filtri aktivne snage, snaga poboljšanje kvalitete distribucijskih i transportnih sustava, lokomotive, zamjena baterija u elektroničkim uređajima (zbog njihovog dugog vijeka trajanja), srednji sustavi za pohranu energije i bilo koja primjena srednje razine snage koja zahtijeva pohranu energije s brzim vremenom odziva, malom instalacijom i troškovima održavanja te malim kapacitetom skladištenja energije. Raspon operativnih troškova superkondenzatora je oko 180-350 €/MWh, a raspon investicijskih troškova je 2200-4200 €/kW [19].

Tehnologija supravodljivih sustava je elektromagnetski sustav pohranjivanja koji se temelji na činjenici da će struja nastaviti teći u supravodiču čak i nakon što je napon na njemu uklonjen. Energija je pohranjena u magnetskom polju stvorena protokom istosmjerne struje u namotu svitka. Kada struja putuje kroz namot, energija se rasipa kao toplina zbog otpora namota. Ako se namot sastoji od supravodljivog materijala, pojavljuje se nulti otpor. Energija se može pohraniti praktički bez gubitaka. Kako bi se steklo stanje supravodiča unutar materijala, mora se držati na vrlo niskoj temperaturi. Stoga su svojstva materijala iznimno važna; temperatura, magnetsko polje i gustoća struje ključni su čimbenici u projektiranju supravodljivih sustava. Ukupna učinkovitost sustava je između 90% - 99%. Struktura supravodljivog sustava uglavnom se sastoji od supravodljive zavojnice, kriostatskog sustava (kriogeni hladnjak i vakuumom izolirana posuda) i sustava za pretvorbu energije. Za održavanje super vodljivog stanja induktivni svitak, uronjen je u tekući helij koji se nalazi u vakuumski izoliranom kriostatu. Tipično, induktivni svitak izrađen je od niobij-titana (NbTi) koji ima kritičnu temperaturu od oko 9K i rashladno sredstvo biti će tekući helij ili super fluidni helij. Kapacitet skladištenja energije supravodljivih sustava može se povećati povećanjem maksimalne struje koja teče kroz zavojnicu, te dalje ovisi o radnoj temperaturi zavojnice. Koncept supravodljivih sustava započeo je idejom za primjenu u velikim postrojenjima s velikim kapacitetima od GWh koji su bili predviđeni za niveliranje dnevnog opterećenja. Supravodljivi sustavi su vrlo prikladni za aplikacije velike snage i kratkog trajanja zbog vrlo visokog kapaciteta ciklusa i visoke učinkovitosti u kratkim vremenskim razdobljima. Supravodljiva tehnologija se može primijeniti kada su potrebne velike snage kompenzacije u vremenu odziva reda veličine sekundi ili milisekundi. Međutim, s napretkom tehnologije supravodiča, posebno povećanjem kritične temperature supravodljivog prijelaza, nedavni razvoj uglavnom je za primjene manjih razmjera. Supravodljivi sustavi se koriste za povećanje stabilnosti i kvalitete električne energije. Kako ovaj sustav pohranjuje električnu



struju, jedina pretvorba uključena u proces je pretvorba iz AC u DC, tako da su učinkovitosti vrlo visoke. Važna karakteristika sustava je mogućnost brzog skoka s potpune ispražnjenosti do potpune napunjenosti te zanemarivo pogoršanje zbog ciklusa. Supravodljivi sustavi prikladni su za ublažavanje negativnih utjecaja obnovljive energije na kvalitetu električne energije, posebno s pretvaračima energije – potrebni za solarne fotonaponske i neke vjetroelektrane.



Slika 12. Shematski prikaz supravodljivog sustava za pohranu magnetske energije [37]

Supravodljivi sustav pokazuje vrlo visoku učinkovitost pohrane energije (obično >97%) i brz odziv (unutar nekoliko milisekundi) u usporedbi s drugim sustavima za pohranu energije, ali samo na kratko vrijeme. Izlazna snaga supravodljivog sustava puno manje ovisi o brzini pražnjenja u usporedbi s baterijama. Također ima dug životni ciklus i, kao rezultat toga, prikladan je za primjene koje zahtijevaju stalne, pune i kontinuirane cikluse rada. Ove značajke čine supravodljivi sustav prikladnim za rješavanje problema stabilnosti napona i kvalitete električne energije kod velikih industrijskih kupaca. Provodi se istraživanje na većim supravodljivim sustavima u rasponu od 10–100 MW i s vremenom pohrane u minutama. Glavni problemi s kojima se suočava implementacija ovih jedinica su visoki potrebni troškovi hlađenja jedinice koje koriste ili tekući helij na 4,2 K ili super-tekući helij na 1,8 K [39]. Osim toga, treba uzeti u obzir ekološka pitanja povezana s jakim magnetskim poljem. Supravodljivi sustavi imaju visoku stopu samopražnjenja zbog utroška energije za hlađenje putem tekućine i probleme mehaničke stabilnosti. Operativni trošak je približno 900 €/MWh, a investicijski trošak je oko 900 €/kW [39]. Osim toga ova tehnologija nudi prednosti kao što su velika

gustoća snage, niski ugljični učinak i znatno niže troškove od baterija u primjenama velikih snaga.

*Tablica 4.5 Usporedba superkondenzatora i supravodljivih sustava pohrane energije [37]*

<b>Paramteri</b>	<b>Superkondenzatori</b>	<b>Supravodljivi spremnici</b>
Raspon snage	1 MW	40 MW
Kapacitet	8 kWh	20 MWh
Efikasnost	96%	>95 %
Životni vijek	15 godina	20 godina
Broj ciklusa	1.000.000+	Neograničeno
Vrijeme odziva	Milisekunde	Vrlo brz
Gubici	Mali	Mali

Velike prednosti koje pruža elektromagnetska pohrana postižu se u kombinaciji s drugim tehnologijama, obično integrirane u specifične primjene. Glavni cilj danas je povećanje gustoće energije boljim dizajnom; postoje projekti koji su još u fazi projektiranja [40] s tom idejom i usmjeravaju tehnologiju za kompenzaciju velikih pulsirajućih opterećenja.

#### 4.1.6 Hibridni spremnici energije

Rast digitalnog gospodarstva podrazumijeva proširenu upotrebu elektroničke opreme u svim sektorima. Ovo zahtijeva ne samo napajanje velikih opterećenja, nego i višu razinu kvalitete i pouzdanosti. S druge strane, integracija povremene proizvodnje obnovljivih izvora energije u elektroenergetskim mrežama zahtijeva pametnije upravljanje.

Sustavi za pohranu energije imaju širok spektar funkcija. Moraju osigurati kvalitetu električne energije, smanjenje utjecaja promjene opterećenja, integraciju u distribucijskim energetskim sustavima, skladištenje velike količine energije i pouzdanost krajnjem korisniku. Uređaji za pohranu temeljeni na baterijama velikog kapaciteta imaju brojne prednosti, ali je također dobro poznato da baterije imaju niz neriješenih problema. Zatim se predlaže hibridni sustav pohrane energije koji uključuje i druge sustave pohrane uz baterije. Na primjer, distribuirani proizvodni sustav s dvije ili tri različite tehnologije obnovljivih izvora energije. Rješenje za upravljanje protokom energije između tih izvora i potrošača je instalirati sustav

pohrane koji može pohraniti električnu energiju (kada nije potrebna) i predati ju (kada sustav zahtijeva). Svaki obnovljivi izvor energije imaće fundamentalne karakteristike volumena snage i vremena proizvodnje. Zbog toga će instalirani sustavi pohrane ovisiti o snazi, količini pohrane, uvjetima okoline i vijeku trajanja. Zbog raznolikosti performansi potrebnih za skladištenje energije u primjenama pametnih mreža, teško je odabrati optimalnu tehnologiju za postizanje dobrih performansi i niskih troškova. Odabrana tehnologija je obično ona koja najbolje odgovara postojećim radnim uvjetima.

Ako postoji veliki broj radnih uvjeta sustava, hibridni sustavi za pohranu energije mogu biti optimalno rješenje kada je teško odabrati između jednog ili drugog sustava za pohranu. Implementacija hibridnih sustava namijenjena je pružiti cjelovito rješenje za trenutne zahtjeve tržišta električne energije, tj. podržati sustav kod lokalnih prekida opskrbe, održati pouzdanost u prisutnosti sve veće upotrebe distribuiranih energetske resursa i udovoljiti zahtjevima za sigurnom i kvalitetom uslugom. Eksperimentalne studije pokazuju da hibridni sustav pohrane može uspješno pružiti nekoliko funkcija (suzbijanje poremećaja napona, struje i frekvencije u mreži; kompenzacija jalove snage; neprekinuto napajanje), u usporedbi sa sustavom skladištenja baterija bez drugog sustava pohrane. Istraživači očekuju da će hibridni sustavi produžiti životni vijek baterija i time produljiti vijek trajanja i pouzdanost cijelog sustava. [40].

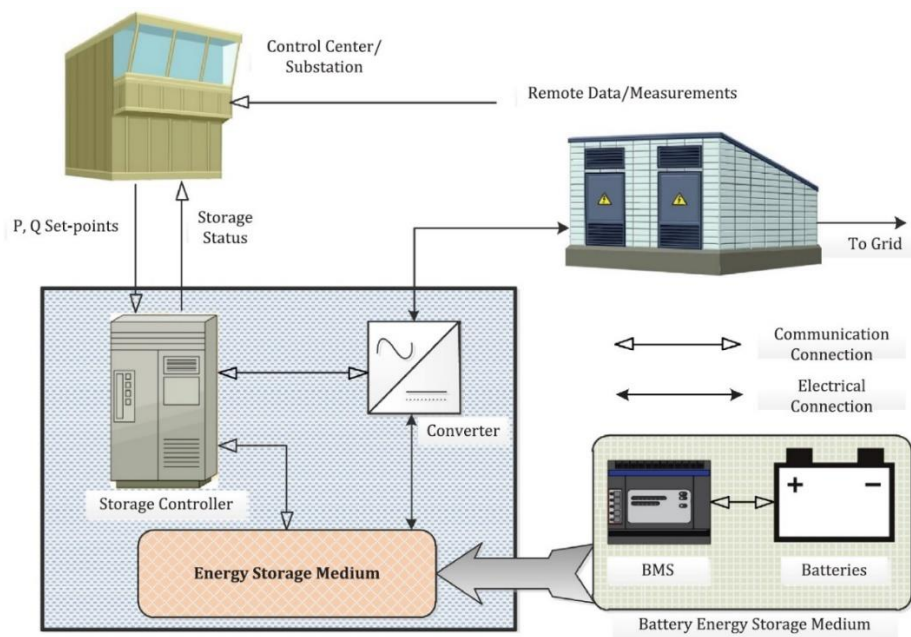
#### **4.2 Ugradnja, upravljanje i utjecaj spremnika na pogonske parametre u NN mrežama**

Uvođenje sustava za pohranu energije značajan je način za maksimiziranje energetske učinkovitosti distribucijske mreže, a ukupna izvedba mreže može se poboljšati njihovim optimalnim postavljanjem, veličinom, i upravljanjem. Sustav pohrane energije optimalne veličine i smještaja može olakšati ispunjenje vršne potražnje za energijom, poboljšati koristi od integracije obnovljivih i distribuiranih izvora energije, pomaže u upravljanju kvalitetom električne energije i smanjenju troškova proširenja distribucijske mreže.

Sustavi pohrane energije sve se više ugrađuju u distribucijske mreže i nude tehničke, ekonomske i ekološke prednosti. Te prednosti uključuju poboljšanje kvalitete električne energije, ublažavanje odstupanja napona, regulaciju frekvencije, otpornost promjenama opterećenja, izravnavanje opterećenja i potpora vršne potrošnje, olakšavanje integracije obnovljivih izvora energije (OIE), širenje mreže i smanjenje ukupnih troškova, operativne

rezerve, i smanjenje stakleničkih plinova. Od sustava za pohranu energije očekuje se da učinkovito otklone probleme koje donose oscilacije napajanja, nagle promjene opterećenja i prekidi prijenosnog ili distribucijskog sustava. Iako proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora energija je ekološki održivija, veliko oslanjanje na obnovljivu energiju može učiniti sustave distribucije električne energije manje pouzdanima. Sustavi pohrane energije mogu podržati obnovljivu energiju regulacijom napona, izgladivanjem njihovih izlaznih fluktuacija, balansiranjem protoka snage u mreži, usklađivanje ponude i potražnje, te pomoć distribucijskim tvrtkama (mrežni operatori i opskrbljivači) kako bi se pouzdano zadovoljila potražnja i održivost. Ovi operativni izazovi mogu se ublažiti odgovarajućim korištenje sustava pohrane integriranih u mrežu.

Nažalost, pogrešno lociranje sustava pohrane u distribucijskim mrežama može pogoršati kvalitetu električne energije i smanjiti pouzdanost kao i kontrolu opterećenja, dok također utječe na regulaciju napona i frekvencije. Proučavaju se sustavi pohrane za energiju dobivenu iz vjetra, a posebnu važnost sustavi pohrane imaju pri integraciji sunčevih elektrana. Sustavi pohrane energije, naime pumpna hidro-akumulacija (PHS) koristi se za stabilnost proizvodnje energije vjetra uz optimizaciju mješovite proizvodnje. Ljestvica korisnosti utjecaja primjene sustava pohrane, npr. skladištenje energije komprimiranim zrakom prikazana je u scenariju elektroenergetskog sustava s obzirom na veliku integraciju OIE [41]. U [42,43], prikazane su kratkoročne primjene sustava pohrane na razini korisnosti ublažavanja negativnih operativnih utjecaja jake integracije vjetra u energetske sustav.



Slika 13. Konceptualni dijagram sustava pohrane energije [41]

#### 4.2.1 Sustavi pohrane energije za distribucijske mreže

Za distribucijske mreže, sustav pohrane pretvara električnu energiju iz mreže, preko vanjskog sučelja, u oblik koji se može pohraniti i pretvara se natrag u električnu energiju kada je to potrebno. Električno sučelje osigurava sustav za pretvorbu energije i predstavlja ključni element sustava pohrane u distribucijskim mrežama [43]. Slika 13 [41] je konceptualni dijagram mrežno povezanog sustava pohrane, uključujući unutarnje i vanjske konfiguracije. Sustavi pohrane energije obično su opremljeni ključnim komponentama za upravljanje i kontrolu koje podupiru siguran i pouzdan rad skladišnih objekata. Cilj nije samo olakšati lokalno upravljanje, već imati i koordiniranu kontrolu nad ostalim komponentama preko sustava mjerenja. Komponente energetske elektronike spojene na mrežu sustava pohrane moduliraju valne oblike napona i struje prema potrebi za ili iz mreže. Upravljački sklop pohrane i pretvarač upravljaju operacijama sustava pohrane, definiraju zadane vrijednosti aktivne i jalove snage ( $P$  i  $Q$ ) i omogućuju inteligentno donošenje odluka. Ovisno o dizajnu, zadane vrijednosti  $P$  i  $Q$  za određeni sustav pohrane može se kontrolirati lokalno ili daljinski. "Medij za pohranjivanje energije" odgovara bilo kojoj tehnologiji skladištenja energije, uključujući podsustav za pretvorbu energije. Na primjer, medij za pohranjivanje energije kod baterijskih sustava pohrane, kao što je prikazano na slici 13, sastoji se od baterija i sustava za upravljanje baterijama koji prati i kontrolira procese punjenja i pražnjenja ćelija ili modula baterije. Tako se sustav pohrane može zaštititi i sigurno raditi tijekom svog životnog vijeka. Međutim, sustavi pohrane velikih razmjera zahtijevaju sustav upravljanja hijerarhijski ustrojen koji uključuje glavni kontrolni modul za koordinaciju punjenja i pražnjenja pomoćnih upravljačkih modula.

#### 4.2.2 Učinkovita strategija skladištenja

Mjerila za učinkovit sustav pohrane uključuje [43]:

(i) Dispečabilnost – odziv na promjene potražnje za električnom energijom koji se mogu pojaviti u različitim ciklusima (dnevnim, tjednim i sezonskim). na varijacije u širokoj potrošnji i industrijskim opterećenjima i promjene u nekim čimbenicima okoliša, npr. vremenski uvjeti.

(ii) Prekidljivost – reaktivnost na isprekidanost energije obnovljivih izvora energije poput vjetrova i sunca, sezonska izmjenična ponašanja hidroenergije i biomase i ponavljajuće nestabilnosti povezane sa zalihama fosilnih goriva.

(iii) Učinkovitost – sposobnost oporavka i ponovne upotrebe energije koja bi inače propala.

#### 4.2.3 Izbor sustava pohrane energije za distribucijske mreže

Povijest sustava pohrane započela je početkom 20. stoljeća upotrebom olovnih akumulatora kao sustava pohrane za napajanje opterećenja na DC električnoj mreži [43]. Od tada se tehnologije sustava pohrane energije nastavljaju razvijati i sve više se koriste za aplikacije sustava kao što su stabilizacija mreže, prebacivanje opterećenja, podršku rada mreže, poboljšanje kvalitete energije i upravljanje pouzdanošću [34]. Osim toga, sve veća integracija OIE u mrežu odnosno distribuirana proizvodnja značajno su promijenili scenarij rada distribucijske mreže. Ovi operativni izazovi su ublaženi ugradnjom sustava pohrane, koji igra ključnu ulogu u poboljšanju ukupne stabilnosti i pouzdanosti mreže. Sustavi pohrane također mogu imati važnu ulogu na dereguliranim tržištima. Uz pomicanje fokusa na pretvaranje ovih funkcija u stvarnost, vlade diljem svijeta (npr. EU, SAD i Japan) potiču razvoj i implementaciju sustava pohrane kroz programe koje podržava država [42]. Posljedično, sustavi pohrane se često koriste u velikim aplikacijama kao što su proizvodnja električne energije, distribucijske i prijenosne mreže, distribuirani izvori energije, obnovljivi izvori energije i lokalni industrijski i gospodarski objekti.

Primjena sustava pohrane u distribucijskim mrežama može koristiti opskrbenj tvrtki, kupcu i distribucijskom mrežnom operatoru (ODS) kao i operatoru prijenosnog sustava (HOPS) i operatoru proizvodnje (konvencionalne i distribuirane proizvodnje) u brojnim načinima. Električna mreža može koristiti brojne tehnologije za pohranu energije koje su općenito kategorizirane u šest skupina: električne, mehaničke, elektrokemijske, termokemijske, kemijske i toplinske. Ovisno o karakteristikama skladištenja i isporuke energije, sustavi pohrane imaju mnoge uloge na tržištu električne energije [35].

Budući da postavljanje velikih sustava pohrane uključuje znatna ulaganja, odabir tehnologija na odgovarajući način na temelju očekivanih performansi je izazovno. Trenutačna razina usvajanja i tehničke specifikacije različitih tehnologija sustava pohrane procjenjuju se s tehničkog gledišta. Mogućnosti uključivanja sustava pohrane za povećanje integracije OIE na razini distribucijskih poduzeća istražen je u [44] usporedbom njihovih tehničkih

karakteristika, cijena i utjecaja na okoliš. Također razmatraju se različite tehnologije sustava pohrane na temelju trenutnog stanja razvoja, dostupnih metoda, tehnološka ažuriranja i potencijal primjene. Konkretnije, različite tehnologije sustava pohrane uspoređuju se pregledom različitih studija koje ističu njihove primjene, a ne specificiraju njihove prednosti i nedostatke. Opširnije usporedbe raznih tehnologija sustava pohrane za distribucijske mreže dane su na slici 14 [44].

ESS Technology	Available Capacity (MW)	Maturity	Efficiency (%)	Response Time	Lifetime, Years (cycles)	Power Capital Cost (\$/kW)	Energy Capital Cost (\$/kWh)	Charge time	Discharge time	Environmental impact
<b>(1) Electrical</b>										
Capacitor	0-0.05	Commercialised	60-65	ms	~ 5 (> 50,000)	200-400	500-1000	s - hr	ms - 60 min	Small
Supercapacitor	0-0.3 +	Developing	90-95	8 ms	20 + (> 100,000)	100-450	300-2000	s - hr	ms - 60 min	None
SMES	0.1-10	Developing	95-98	< 100 ms	20 + (> 100,000)	200-489	1000-72,000	min - hr	ms - 8 s	Moderate (-ve)
<b>(2) Mechanical</b>										
PHS	100-5000	Mature	75-85	s - min	40-60 (> 13,000)	2000-4300	5-100	hr - months	1-24 hr +	Large (-ve)
CAES (Large-scale)	5-1000	Mature	70-89	1-15 min	20-40 (> 13,000)	400-1000	2-120	hr - months	1-24 hr +	Large (-ve)
FES	0.1-20	Early commercialised	93-95	< 4 ms - s	15 + (> 100,000)	250-350	1000-14,000	s - min	ms - 15 min	Almost none
<b>(3) Electrochemical</b>										
Lead-acid	0-40	Mature	70-90	5-10 ms	3-15 (2000)	300-600	200-400	min - days	s - hr	Moderate (-ve)
UltraBattery	0-36	Developing	-	~ 5 ms	3-15 (3000)	-	200	min - days	s - hr	Moderate (-ve)
NaS	0.05-34	Commercialised	80-90	1 ms	10-15 (2500-4500)	1000-3000	300-500	s - hr	s - hr	Moderate (-ve)
Li-ion	0-100	Demonstration	85-90	20 ms - s	5-15 (1000-20,000)	900-4000	600-3800	min - days	min - hr	Moderate (-ve)
NiCd	0-40	Commercialised	60-65	ms	10-20 (2000-3500)	500-1500	400-2400	min - days	s - hr	Moderate (-ve)
Metal-air	0-0.01	Developing	~ 50	ms	~ (100-300)	100-250	10-60	hr - months	s - 24 hr +	Small
VRB	0.03-3	Early commercialised	~ 85	< 1 ms	5-10 (12,000 +)	600-1500	150-1000	hr - months	s - 10 hr	Moderate (-ve)
ZnBr	0.05-10	Demonstration	~ 75	< 1 ms	5-10 (2000 +)	700-2500	150-1000	hr - months	s - 10 hr	Moderate (-ve)
<b>(4) Thermochemical</b>										
Solar fuel	0-10	Developing	~ 20-30, planned eff. > 54	-	- (-)	-	-	hr - months	1-24 hr +	Benign
<b>(5) Chemical</b>										
H <sub>2</sub> Fuel Cell	0-58.8	Research/developing/ marketed	25-58	< 1 s	5-20 + (1000-20,000 +)	500-10,000	15	hr - months	sec - 24 hr +	Small
<b>(6) Thermal</b>										
CES	0.1-300	Developing	40-50	-	20-40 (> 13,000)	200-300	3-30	min - days	1-8 hr	Benign (+ ve)
AL-TES	0-5, 1103	Developing	50-90	-	10-20 (-)	-	20-50	min - days	1-8 hr	Small
HT-TES	0-60	Developed	30-60	-	5-15 (> 13,000)	-	30-60	min - months	1-24 hr +	Small

Slika 14. Usporedbe raznih tehnologija sustava pohrane za distribucijske mreže [44]

#### 4.2.4 Ciklus punjenje-pražnjenje sustava za pohranu energije

Sustavima pohrane su potrebni pametni protokoli punjenja i pražnjenja kako bi se uklonili neki problemi, npr. prekomjerno punjenje ili pražnjenje. Kontrola SoC-a (engl. State of Charge) sustava pohrane za aplikaciju u distribucijskim mrežama je ključna. Strategija upravljanja SoC-om olakšava lokaliziranu kontrolu, regulacija SoC-a svakog sustava pohrane, učinkovito iskorištava raspoložive kapacitete pohrane i osigurava regulaciju napona. Odgovarajuće strategije punjenja i pražnjenja i pridržavanje preporuka proizvođača mora biti zadovoljeno radi rješavanja glavnih izazova implementacije samih sustava pohrane, tj. postizanje maksimalnog učinka, optimalne učinkovitosti i dugog vijeka trajanja. Optimalni raspored punjenja i pražnjenja sustava pohrane olakšava vršno opterećenje te izravnavanje u

fotonaponskom sustavu spojenom na mrežu. Za predloženi model sustava pohrane na slici 15, pravila punjenja i pražnjenja izražena su u jednadžbama (1) i (2) [42]. Ovaj model i strategije punjenja i pražnjenja su korisni za integraciju OIE (vjetar) u mrežu i ublažavanje utjecaja energije vjetrova i zagušenja vodova [42].

Strategija punjenja:

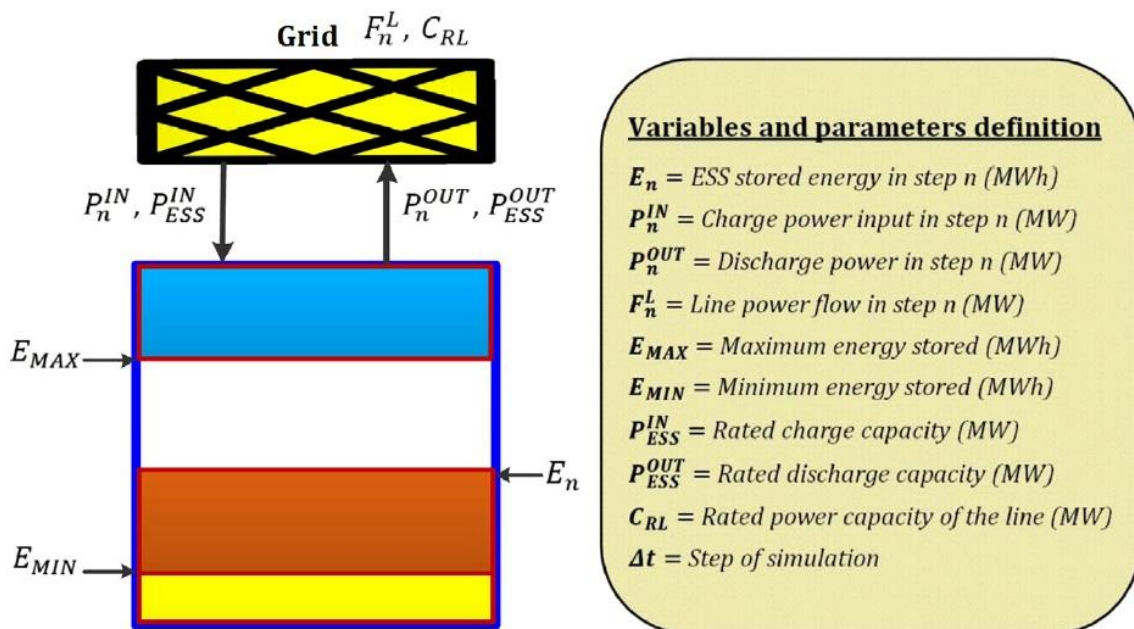
$$P_n^{IN} = \min\{(F_n^L - C_{RL}), P_{ESS}^{IN}, (E_{MAX} - E_{n-1})/\Delta t\} \quad (1)$$

Kada se pojavi zagušenje linije ( $F_n^L - C_{RL} > 0$ ) sa stopom naknade ograničeno od strane  $P_{ESS}^{IN}$  kao i dostupnost sustava pohrane, samo sustav pohrane biti će punjen.

Strategija pražnjenja:

$$P_n^{OUT} = \min\{(C_{RL} - F_n^L), P_{ESS}^{OUT}, (E_{n-1} - E_{MIN})/\Delta t\} \quad (2)$$

Kada nema zagušenja ( $F_n^L - C_{RL} < 0$ ) i brzina pražnjenja je ograničena od strane  $P_{ESS}^{OUT}$  kao i po raspoloživom kapacitetu linije ( $C_{RL} - F_n^L$ ), kako bi se izbjegla nova zagušenja zbog nestanka napajanja, dakle dogodit će se samo pražnjenje sustava pohrane. Nastavlja se pražnjenje sustava pohrane pod uvjetom da je dostupna pohranjena energija.



Slika 15. Mrežno povezani model sustava pohrane energije [42]

Predložena strategija punjenja-pražnjenja sustava pohrane važna je za niskonaponske distribucijske mreže kako bi se ublažile nagle fluktuacije na fotonaponskim izlazima i podržavanje vršnih opterećenja. Trenutni SoC status sustava pohrane i vjerojatno trajanje



razdoblja punjenja/praznjenja se uzimaju u obzir za učinkovito korištenje raspoloživog kapaciteta pohrane [42]. Uz predloženu strategiju, odstupanje SoC-a sustava pohrane također se može pratiti i podešavati na željenu razinu. Opet, optimalni raspored punjenja i praznjenja sustava pohrane se razvija na satnoj osnovi kako bi se minimalizirali energetske gubitke u distribucijskom sustavu. Optimizacija se postiže korištenjem algoritama i predložena metoda ima veliki potencijal kod budućih aplikacija sustava pohrane kao što su naponska podrška, peglanje vršnih opterećenja, usluga regulacije i poboljšanje pouzdanosti.

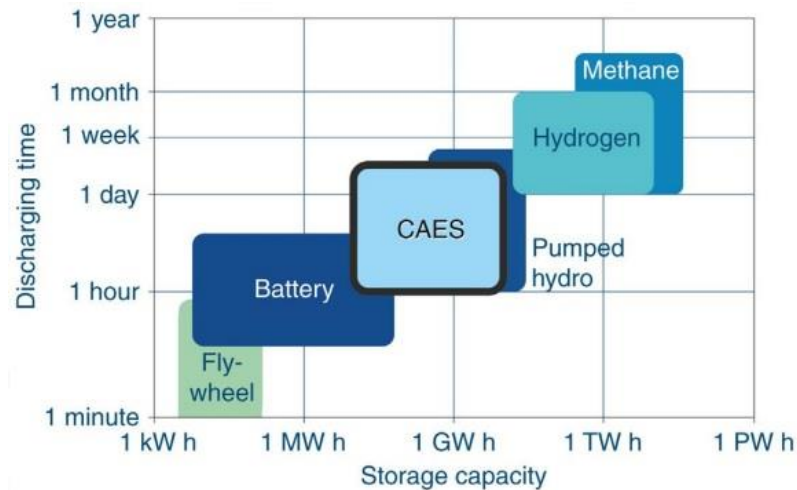
#### 4.2.5. Optimalno dimenzioniranje sustava pohrane energije

Zbog ključne uloge koju imaju sustavi pohrane, njihova je veličina ključna za jamčenje ispravnog rada distribucijskih mreža. S ekonomskog i sigurnosnog gledišta, točan i praktičan model sustava pohrane bi poboljšao modeliranje rada sustava. Optimalno dimenzioniranje sustava pohrane uključuje pronalaženje optimalne snage i energetske kapaciteta kako bi se troškovi rada distribucije sveli na minimum dok još uvijek ispunjava mrežne ciljeve. Trošak kapitala sustava pohrane važan je dio izračuna rada distribucijske mreže, trošak koji pak ovisi o razdoblju povrata investicije, stoga je životni vijek sustava pohrane ključan. Broj ciklusa i SoC parametar na kojemu sustav pohrane radi dva su glavna čimbenika koji utječu na životni vijek baterija.

Za distribucijsku mrežu trebalo bi uspostaviti optimalno dimenzioniranje sustava pohrane, npr. veliki sustavi pohrane nameću veće troškove ulaganja i održavanja mreže dok mali sustavi pohrane možda neće pružiti željene ekonomske koristi i fleksibilnost ili ispunjavanje unaprijed definiranih ciljeva pouzdanosti za mrežu. Optimalno dimenzioniranje sustava pohrane za distribucijsku mrežu treba obuhvatiti sve troškove izravno povezane s prednostima mreže. Na primjer, ako su OIE integrirani u distribucijske mreže potrebno je uključiti fiksne troškove pogona i održavanja za integrirane OIE u dimenzioniranju sustava pohrane. Štoviše, odabir sustava pohrane za optimalno dimenzioniranje i njegova usporedba s alternativom sustava pohrane u smislu troškova i performansi mogu pomoći u prepoznavanju odgovarajuće tehnologije sustava pohrane za određenu lokaciju u distribucijskoj mreži.

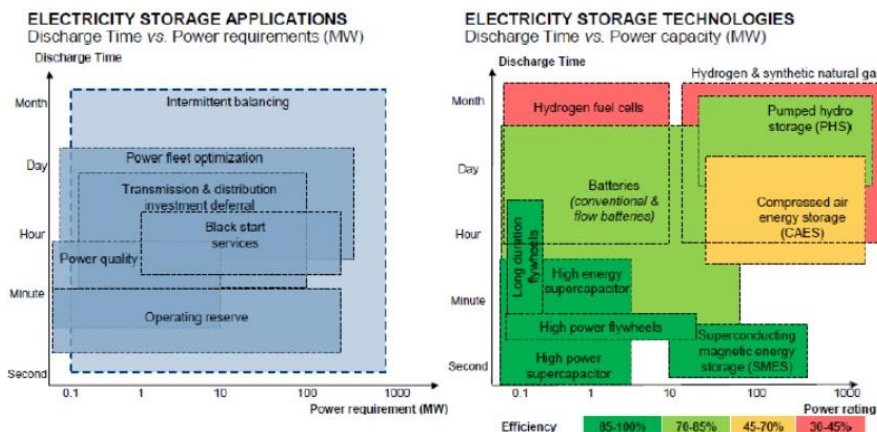
### 4.3 Primjena spremnika energije po razinama električne mreže

Spremници energije imaju brojne primjene na svim razinama električne mreže. Međutim, primjena ovisi o vremenu pražnjenja i zahtjevima za napajanjem. Dijagram na slici 16 na desnoj strani kategorizira različite tehnologije skladištenja ovisno o energetskeim zahtjevima sustava i vremenu pražnjenja.



Slika 16. Kategorizacija spremnika energije po vremenu pražnjenja i kapacitetu [29]

Ovaj dijagram prikazuje različite karakteristike pojedinih vrsta tehnologija. Također pokazuje da usluge koje sustavi za pohranu energije mogu pružiti ne zahtijevaju iste tehničke zahtjeve. Ovisno o karakteristikama, različiti sustavi pohrane prikladni su za određene usluge i primjenu. U ovom dijagramu snaga, učinkovitost i vrijeme pražnjenja su ilustrirane budući da su važne karakteristike sustava skladištenja energije. Za daljnju analizu mogu se uzeti u obzir i drugi parametri kao što su troškovi instalacije, broj ciklusa, pouzdanost ili troškovi održavanja.



Slika 17. Dijagram skladištenja električne energije [42]

#### 4.3.1 Korisničke usluge

Korisničke usluge su svaka radnja s izravnim koristima za krajnje korisnike. Glavni cilj ove usluge je smanjiti višak energije koji se predaje u mrežu. Sustav za pohranu energije pohranjuje višak energije i isporučuje ga kada je energija potrebna. Na taj se način povećava ekonomski profit solarne elektrane.

Iz perspektive potrošača, kupnja električne energije s tržišta u većini slučajeva ima različite cijene koje ovise o dobu dana i sezone (peak, off peak). Spremnici energije mogu pohraniti električnu energiju u razdobljima niže cijene za korištenje u najskupljim satima. Na ovaj način, spremnici mogu kupiti ili pohraniti jeftiniju energiju iz mreže i koristiti je u razdobljima viših cijena kako bi smanjili račune.

Vršnu potrošnju je skupo opskrbiti zbog visokih cijena dodatne proizvodnje električne energije. Strategija smanjenja vršne potrošnje temelji se na skladištenju energije u razdoblju niske potrošnje kako bi se koristila u vrijeme visoke potrošnje kako bi se smanjila ili izbrisala vršna potražnja iz mreže. S druge strane, vršna proizvodnja solarnih panela može ugroziti stabilnost mreže. Sustavi spremnika energije mogu osigurati odgovarajući energetska kapacitet za te vršne vrijednosti što izbjegava troškove dodatne energije i povećanja kapaciteta zakupljene energije.

U slučaju ispada mreže, sustavi spremnika energije mogu opskrbljivati energijom ili osigurati rezervno napajanje. Ukoliko spremnik energije radi s lokalnim generatorom, može opskrbljivati energijom od nekoliko sekundi do nekoliko sati što je vrlo korisno za industrijske pogone.

Tržište električne energije ima oscilacije cijena ovisno vremenskom razdoblju (satu) dana. To znači da postoje trenuci s vršnom cijenom i niskom cijenom. Iz tog razloga kreiran je poslovni model koji se temelji na kupnji u jeftinijim satima te prodaji u skupim satima. Baterija pohranjuje najjeftiniju energiju i ispušta je u mrežu kada je cijena visoka. Praćenje opterećenja, koje upravlja razlikom između izlaza generatora planiranog za dan unaprijed, stvarnog izlaza generatora i stvarne potražnje tretiraju se kao podskup energetske arbitraže.

Aktivnosti povezane s fleksibilnošću na strani potražnje mogu se smatrati komplementarnim za krajnje korisnike, npr. proširivanjem i povećanjem ekonomske vrijednosti plana proizvodnje (obnovljive) energije u zajednici uključivanjem fleksibilnosti na strani potražnje [39].

#### 4.3.2 Usluge neovisnog operatora sustava i regionalnih organizacija za prijenos

Mreža treba ravnotežu između potražnje za električnom energijom i proizvodnje. To pokazuje frekvencija u mreži koju u Europi treba održavati na 50 Hz. Cijeli elektroenergetski sustav ima određenu inerciju što povećava vrijeme reakcije sustava na razlike između proizvodnje i potrošnje. Ovo vrijeme reakcije ogleda se u varijaciji frekvencije: povećava se ako je proizvodnja veća od potrošnje, i smanjuje se ako je proizvodnja manja od potrošnje. Kako bi osigurala frekvencijsku podršku, proizvodnja se mora prilagoditi kako bi zadovoljila potražnju. Sustavi spremnika energije, na bilo kojoj razini, mogu reagirati brže od konvencionalnih elektrana i održavati ili vratiti frekvenciju pružanjem ili apsorbiranjem energije. Kada se dogodi pad frekvencije, spremnik energije daje određenu količinu energije u mrežu, a ako je frekvencija iznad nazivne frekvencije, spremnik energije se puni odnosno prihvaća višak proizvodnje. Naravno, ova se strategija može provesti samo ako sustav spremnika energije ima raspoloživi skladišni kapacitet.

Postoje tri različite vrste pričuve koje se mogu aktivirati za regulaciju frekvencije:

- Primarna rezerva koja se automatski aktivira
- Sekundarna rezerva koja zamjenjuje primarnu nakon nekoliko minuta
- Tercijarna pričuva koja se aktivira ručno i zamjenjuje sekundarnu pričuvu

Napon je jedna od ključnih značajki za prijenosnu i distribucijsku mrežu i mora se održavati između prihvatljivih granica kako bi se osiguralo ispravno funkcioniranje sustava. Ovisno o svojstvima voda (npr. duljina) i opterećenja kao i proizvodne jedinice spojene na njega, napon odstupa duž i posebno na kraju voda. Ako je priključen veliki broj trošila, može se primijetiti pad napona dok velika snaga proizvodnje dovodi do povećanja napona. Kako bi se regulirao napon, aktivna i jalova snaga koju osiguravaju kompenzacijske ili energetske elektroničke jedinice (koje su spojene na uređaje za pohranu) su neophodni.

Kada havarija dovede do prekida mreže, postoji potreba za ponovnim pokretanjem mreže. Da bi to učinili potrebna je početna snaga za pokretanje konvencionalne elektrane. Ovu početnu snagu može osigurati sustav spremnika energije.

Kvaliteta napona pokriva širok raspon naponskih poremećaja i odstupanja u veličini napona ili valnog oblika od optimalnih vrijednosti kao što su treperenja, harmonici, neuravnoteženost itd. Obnovljivi izvori energije mogu uzrokovati probleme s kvalitetom napona, a ugradnja sustava spremnika energije može pomoći u održavanju kvalitete električnog napona na mreži unutar potrebne granice.

#### 4.3.3 Usluge operatora sustava

Sustavi spremnika energije mogu pohraniti energiju u satima niske potrošnje i predati je u satima najveće potrošnje. U ovoj situaciji, distribucijski sustav radi na stabilniji način i uvijek pod svojim maksimalnim kapacitetom. Uz ovu uslugu, ulaganja u distribucijsku mrežu mogu se odgoditi ili u potpunosti izbjeći.

Sustav proizvodnje električne energije može imati velike varijacije u svojoj proizvodnji, posebno proizvodnji iz OIE. Sustav spremnika energije omogućio bi proizvodnom sustavu da prilagodi svoju proizvodnju potražnji ili barem da ima predvidljivu proizvodnu krivulju. Ako OIE ne mogu ostati unutar ograničenja, operator može isključiti jedinicu što rezultira gubitkom dobiti za vlasnika OIE. Kao što je prikazano na slici 17, postoji niz tehnologija za pohranu energije s različitim karakteristikama snage i kapaciteta. Reverzibilne hidroelektrane i spremnici komprimiranog zraka mogu pohraniti velike količine energije. Ovakve tehnologije su od najveće pomoći pri regulaciji frekvencije, s primarnom i sekundarnom pričuvom i mehanizmom odziva potražnje sa smanjenjem u vrijeme velike potražnje kako bi se izbjeglo pokretanje dodatne elektrane. U početku su reverzibilne hidroelektrane prvenstveno služile za pokrivanje kratkoročnih vršnih opterećenja i povećanje iskoristivosti konvencionalnih elektrana (nuklearna, ugljen, lignit). Konvencionalnim elektranama obično nedostaje fleksibilnost i imaju spor start kao i isključenje. Iz ekonomskih razloga, konvencionalne elektrane moraju stalno raditi unutar konstantnog raspona, što podržavaju reverzibilne hidroelektrane. Štoviše, reverzibilne hidroelektrane koriste promjenjivu potrošnju električne energije tijekom dana i različite cijene energije kako bi se ostvario prihod. Tijekom noći ili u doba dana niskih cijena energije rezervoari se pune. Tijekom vršnih razdoblja potražnje hidroelektrana ispušta i prodaje energiju po višim cijenama. S ekspanzijom obnovljivih izvora energije, operativni obrazac reverzibilnih hidroelektrana se značajno promijenio. Osobito ljeti, kada solarni paneli daju velike količine električne energije tijekom dana, veliki dijelovi opterećenja, a posebno vrhunac u podne već

su pokriveni tako da je vrijeme rada reverzibilnih hidroelektrana pomaknuto u jutarnje i večernje sate.

Zamašnjaci ne mogu pohraniti toliko energije kao hidro akumulacija ili spremnik komprimiranog zraka. S druge strane, imaju kraće vrijeme pražnjenja što omogućuje ovakvim sustavima dodatne usluge koje se mogu pružiti. Zapravo, zamašnjaci se mogu koristiti kao primarna rezerva za regulaciju frekvencije, napajanje jalovom snagom (regulacija napona) i uravnoteženje naglih promjena između napajanja i potrošnje. Domet primjene te tehnologije može se usporediti s dometom baterije te imaju posebne prednosti koje omogućuju zamašnjacima mjesto na tržištu. Nažalost, ostaju skuplji od baterija za manju gustoću energije.

Europski cilj je postići 40% proizvodnje iz OIE u energetsom miksu 2030. godine i ići dalje nakon toga. Zapravo, gledajući na dugoročniju osnovu, čini se da će potreba za fleksibilnošću rasti s porastom uključivanja obnovljivih izvora energije (OIE). Sustavi za pohranu energije mogu ponuditi fleksibilnost dopuštajući da se njihovi profili opterećenja ili proizvodnje namjerno mijenjaju u odnosu na planiranu proizvodnju ili obrazac potrošnje [40].

#### 4.3.4 Poslovni modeli

Početkom 2015. u Njemačkoj, nacionalna virtualna elektrana (*VPP engl. Virtual power plant*) počela je raditi s baterijom za skladištenje i solarnim panelima. Stvorena je decentralizirana energetska zajednica u kojoj članovi imaju posebne prednosti unutar energetskog tržišta [38]:

- Popusti pri kupnji baterija
- Troškovi električne energije niži su od veleprodajnih cijena
- Ažuriranja softvera.
- Ažuriranja vremenske prognoze.
- Optimizacija potrošnje energije u skladu s ovim vremenskim predviđanjima.
- Daljinsko održavanje i nadzor.

Nadalje, članovi zajednice dijele višak energije između sebe tako da, kada je potrebno napajanje, a član zajednice nadmaši svoje mogućnosti, drugi članovi pomažu. Trenutačno se planiranju pridodaju električna vozila, čime se članovima zajednice daje više fleksibilnosti za poboljšane energetske kapacitete i usluge. Vrijedno je spomenuti da su baterije posebno napravljene za domove i komunalnu pohranu te nisu namijenjene za automobile.

## 5. PROCJENE MOGUĆNOSTI PRIMJENE SPREMNIKA ELEKTRIČNE ENERGIJE U EE MREŽAMA

Globalna potražnja za električnom energijom je ogromna i raste za otprilike 3,6% godišnje, ali sunce ne sija uvijek niti vjetar uvijek puše. Iz tehničkih razloga, količina električne energije koja se dovodi u električnu mrežu mora uvijek ostati na istoj razini koju zahtijevaju potrošači kako bi se spriječili nestanci struje i oštećenja mreže. To dovodi do situacija u kojima je proizvodnja veća od potrošnje ili obrnuto. Tu na scenu stupaju tehnologije pohranjivanja — one su ključni element za balansiranje ovih nedostataka [38].

Prednosti skladištenja energije su značajne i odavno su prepoznate kao neophodne za usklađen i pouzdan rad elektroenergetskih mreža. Skladištenje energije posebno je važno za integraciju tehnologija distribuirane obnovljive energije. Pohranjivanje štiti od pogrešaka u predviđanju, uklanja prepreke povezivanju obnovljivih izvora energije s raznim mrežama, omogućuje regulaciju frekvencije i može odgoditi skupe nadogradnje mreže ili zastoje zbog iznenadne potražnje ili bilo kojeg isključenja izvora priključenog na mrežni sustav [39].

Dakle, postoji potreba za pronalaženjem načina da se kompenzira ta fluktuacija, da se energija uštedi u vrijeme sunčanih i vjetrovitih dana i iskoristi za oblačne dane bez vjetra. Tehnologija za to postoji, a mi je čak koristimo i danas, ali njen kapacitet nije dovoljan na duge staze - ne ako planiramo postati zeleni i održivi. Problem koji se pojavljuje je da ne možemo jednostavno izgraditi više postojećih tehnologija za pohranu jer svaka tehnologija ima svoje nedostatke. Na primjer, reverzibilna akumulacija, najpouzdanija je i dosad jedina ekonomična dostupna tehnologija skladištenja, izuzetno je ograničena malim brojem potencijalnih lokacija i strogim zakonima o očuvanju prirode [40].

Moguće je podijeliti mrežne aplikacije za pohranu u dvije široke kategorije na temelju duljine vremena koje uređaj za pohranu treba za pružanje usluga [41]:

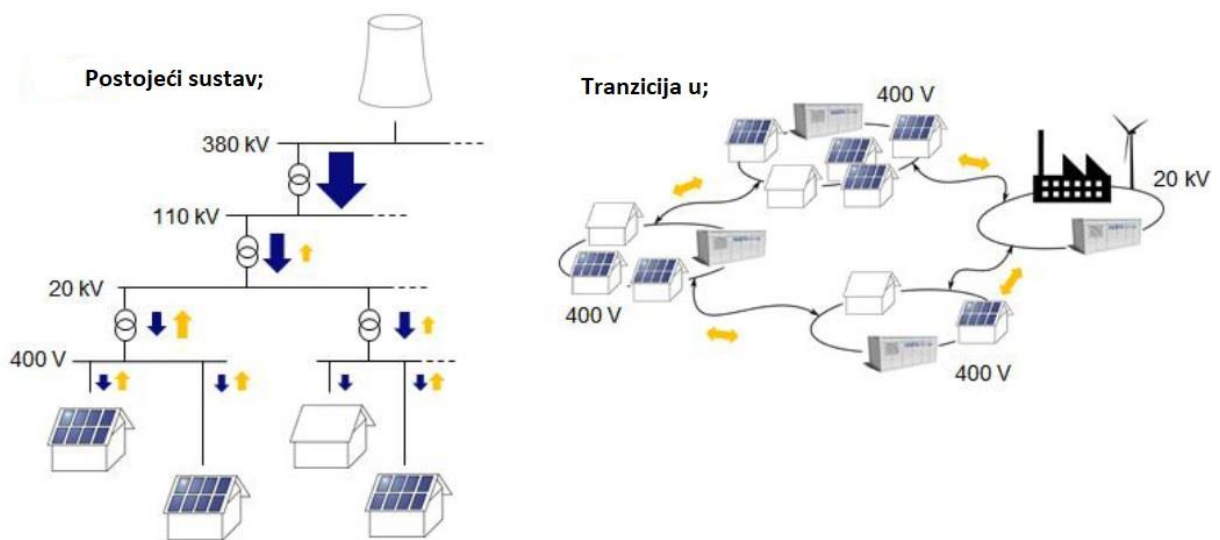
- Primjene velike snage gdje uređaj mora brzo reagirati i biti u mogućnosti prazniti se samo kratkotrajno (do otprilike 1 h) i
- Aplikacije povezane s upravljanjem energijom gdje uređaj može reagirati sporije, ali se mora moći prazniti nekoliko sati ili više.

U idealnom slučaju, svi uređaji za pohranu mogli bi pružiti sve usluge, ali neke su tehnologije tehnički ograničene na pružanje samo kratkoročnih usluga. Međutim, mnoge od ovih usluga

imaju vrlo visoku vrijednost u mreži, tako da kratkoročna pohrana još uvijek može pružiti značajne prednosti.

## 5.1 Predviđena distribuirana skladišta na europskoj razini

U prošlosti su centralizirane elektrane proizvodile električnu energiju koja se prenosila iz visokonaponske mreže do potrošača u distribucijskoj srednjoj ili niskonaponskoj mreži (vidi sliku 18). S povećanjem obnovljivih izvora energije kao što su lokalni krovni solarni paneli, prijenos energije je djelomično obrnut.



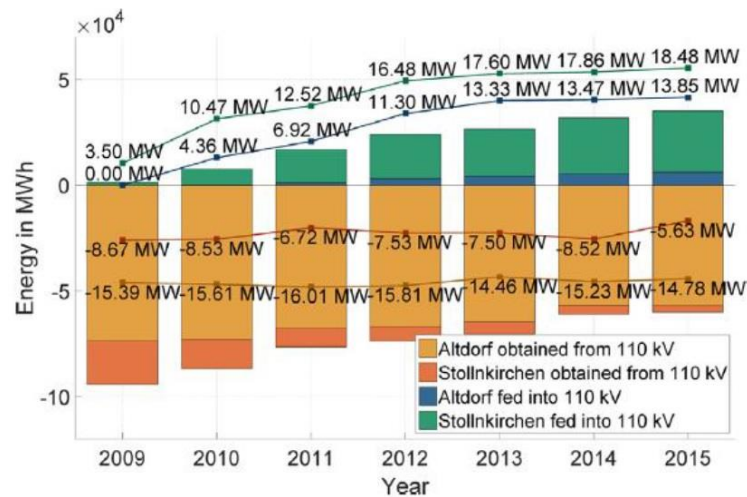
Slika 18. Skica toka snage centralizirane i decentralizirane proizvodnje energije (lijevo), međusobno povezivanje energetske ćelije (desno) [41]

Mreža nije dizajnirana za ovu vrstu uporabe. Stoga sve više niskonaponskih mreža doseže svoje tehničke granice i ne mogu se integrirati dodatni obnovljivi izvori energije. U vremenima velike proizvodnje energije i niske potražnje, mreža se suočava s problemima poput povećanja napona i preopterećenja. Stoga su potrebna visoka ulaganja u rekonstrukciju mreže.

Međutim, ovaj razvoj događaja ne utječe samo na niskonaponske mreže, već i na više razine mreže. U studiji Tehničkog sveučilišta u Münchenu istraživano je opterećenje dva VN/SN transformatora u bavarskoj mreži s visokom integracijom obnovljivih izvora energije

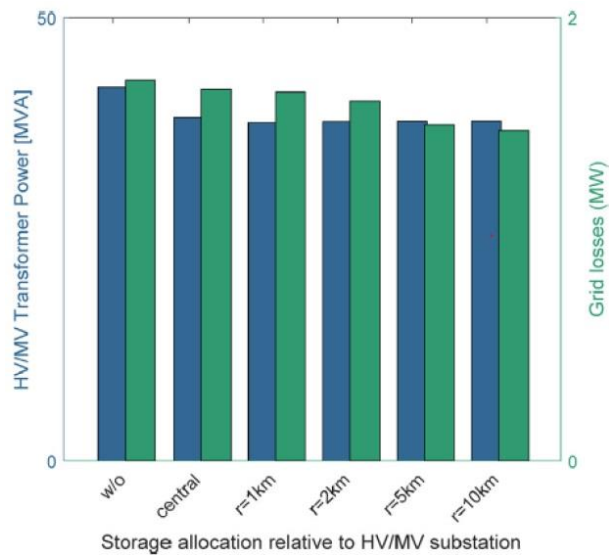


u razdoblju od 6 godina. Kao što je prikazano na slici 19, maksimalna snaga koja je dovedena u mrežu od 110 kV porasla je s 3,5 na 18,48 MW odnosno s 0,00 na 13,85 MW. U istom razdoblju maksimalna snaga iz mreže 110 kV ostala je ista ili se neznatno smanjila.



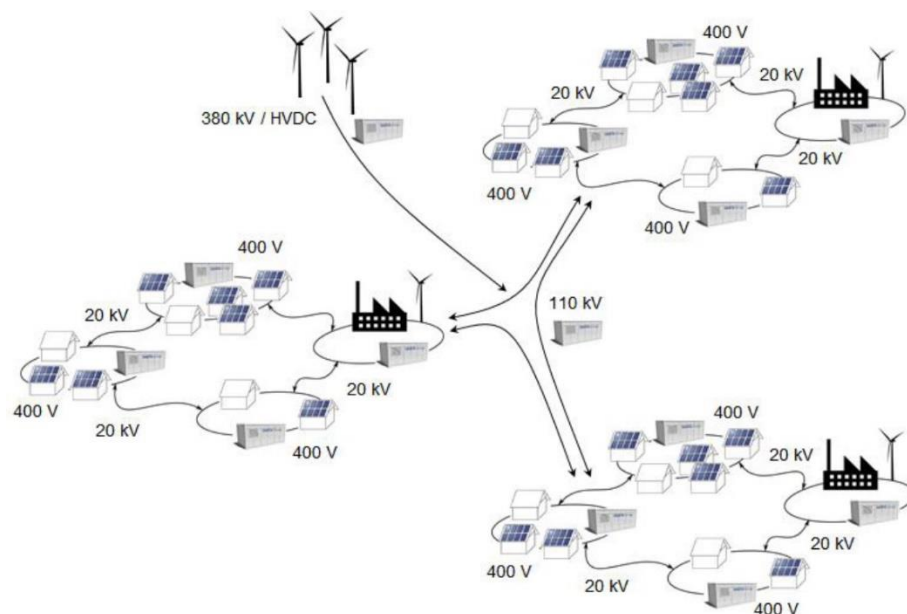
Slika 19. Izmjerena razmjena s VN mrežom u dvije VN/SN transformatorske stanice u Njemačkoj [32]

Stacionarni sustavi za pohranu energije koji rade u niskonaponskim mrežama mogu smanjiti ove izazove, u niskonaponskoj mreži, ali i na višim razinama mreže. Zajedno s partnerima, Tehničko sveučilište u Münchenu dalje je istraživalo utjecaj sustava za pohranu energije u niskonaponskoj mreži na superponirane razine mreže. U simulaciji koja uključuje prije spomenute transformatore pokazano je da se opterećenje VN/SN transformatora može smanjiti kada se sustavi za pohranu baterija postave u niskonaponsku mrežu. Pritom su uspoređeni različiti scenariji uzimajući u obzir lokaciju kao i broj i veličinu instaliranih sustava. Rezultati su prikazani na slici 20.



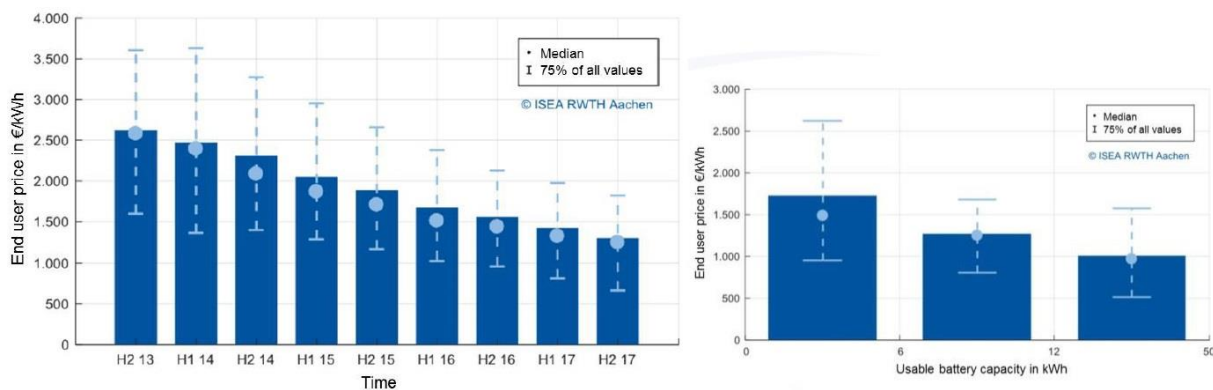
Slika 20. Utjecaj NN spremnika na opterećenje VN/SN transformatora i SN gubitke u mreži [32]

U većem je opsegu na isti način moguće da nekoliko energetske ćelije koje se sastoje od niskonaponskih i sredjenaponskih mreža povezanih na 20 kV mogu smanjiti opterećenje na 110 kV ili čak višim razinama mreže. Mogući izgled budućeg energetskeg sustava s visokim udjelom obnovljivih izvora energije i ugradnjom sustava za pohranu energije prikazan je na donjoj slici.



Slika 21. Izgled budućeg europskog energetskeg sustava [32]

Glavne pokretačke motivacije za implementaciju distribuiranog skladištenja su sve veća proizvodnja obnovljivih izvora energije, rastuće cijene električne energije i smanjenje troškova sustava. Cijene baterijskih sustava za skladištenje u Njemačkoj su za krajnje korisnike pale u roku od 4 godine za otprilike 50% na prosječnu vrijednost od oko 1.300 €/kWh. Kada se uzmu u obzir samo sustavi srednje veličine s kapacitetima iznad 12 kWh, prosječna cijena za krajnjeg korisnika iznosi 1.000 €/kWh. Statistika je prikazana na slici 22.



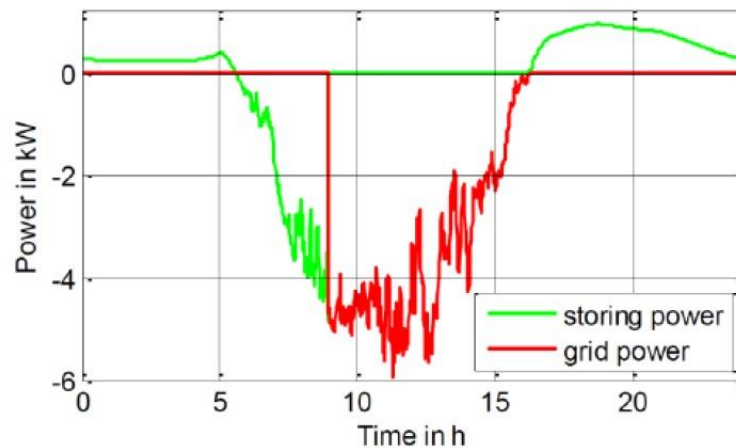
*Slika 22. Cijena krajnjeg korisnika za stacionarne sustave za pohranu baterija (na temelju [33])*

Cijene solarnih panela dramatično su pale u posljednjih 10-15 godina, a cijene sustava također lagano padaju. Kao posljedica toga, penetracija solarnih panela postaje sve veća i veća te ovaj razvoj stvara snažan pritisak za implementaciju distribuiranog skladištenja kako bi se povećala lokalna upotreba jeftine solarne energije. Potrošači imaju koristi od implementacije sustava za pohranu energije budući da postaju manje ovisni o dobavljačima energije i cijenama električne energije. Također zbog loše pouzdanosti niskonaponskih mreža u nekim zemljama ljudi žele posjedovati baterije s rezervnom funkcionalnošću. U slučaju nestanka struje sustavi za pohranu energije mogu opskrbljivati opterećenja nekoliko sati dok se mreža ne uspostavi. Osim ekonomskih aspekata, aktivni doprinos energetske tranziciji još je jedan pokretač.

S ekonomskog gledišta kombinirana uporaba distribuiranog skladištenja energije korisna je za više namjena. Obično je povećanje samodostatnosti primarna pokretačka motivacija za ljude koji posjeduju distribuirane male sustave za pohranu energije. Kako bi se povećali izvori prihoda za korisnike, postoji potreba za kombiniranjem lokalne usluge s uslugama koje podržavaju mrežu.

U nastavku su detaljno prikazani operativni profili za različite usluge i aplikacije. Također, ilustrirana je kombinacija različitih usluga.

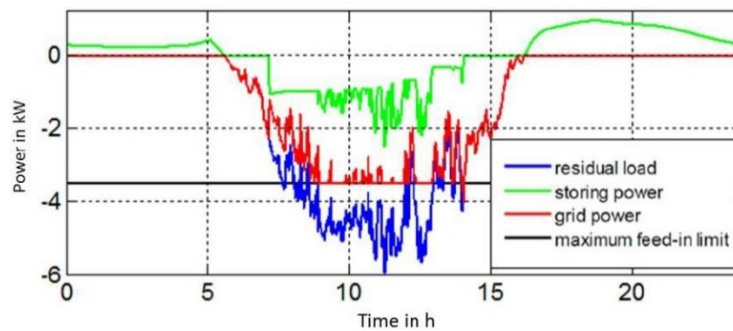
A) Samodostatnost: Na slici 23 prikazan je tipičan radni profil stambenog solarnog baterijskog sustava za pohranu. Kao što se može vidjeti, baterijski sustavi za skladištenje pune se ujutro čim solarna proizvodnja premaši opterećenje. Osobito tijekom sunčanih dana sustav je često potpuno napunjen prije podneva, što znači da vršna snaga solarnih panela koja se dogodi oko sredine dana nije pokrivena baterijom.



Slika 23. Operativna strategija za čistu vlastitu potrošnju [34]

B) Vlastita potrošnja i podrška lokalnoj mreži: Kako bi se rasteretila mreža, punjenje baterijskog sustava za skladištenje mora se pomaknuti s jutarnjih sati na podne i rano poslijepodne. Definiranjem maksimalne granice napajanja može se kontrolirati naprezanje na mreži. Rezultirajući radni profil kada se uzme u obzir ova mjera podrške mreži ilustriran je na slici 24. Može se uočiti da se baterijski sustav za pohranu ne počinje puniti čim solarna proizvodnja premaši opterećenje. Umjesto toga, rad je koncentriran oko perioda visoke solarne proizvodnje. Čim se prekorači ograničenje napajanja, baterija se puni preostalom snagom i tako smanjuje utjecaj vršne snage solarnih panela. Kao ograničenje za ovu operaciju mora se uzeti u obzir da vlasnik baterijskog sustava za skladištenje želi imati potpuno napunjen sustav na kraju dana. Stoga se ova operativna strategija oslanja na precizne prognoze proizvodnje i opterećenja kako bi se izračunalo je li očekivana proizvodnja energije tijekom cijelog dana dovoljno visoka kako bi se omogućilo pomicanje razdoblja punjenja.

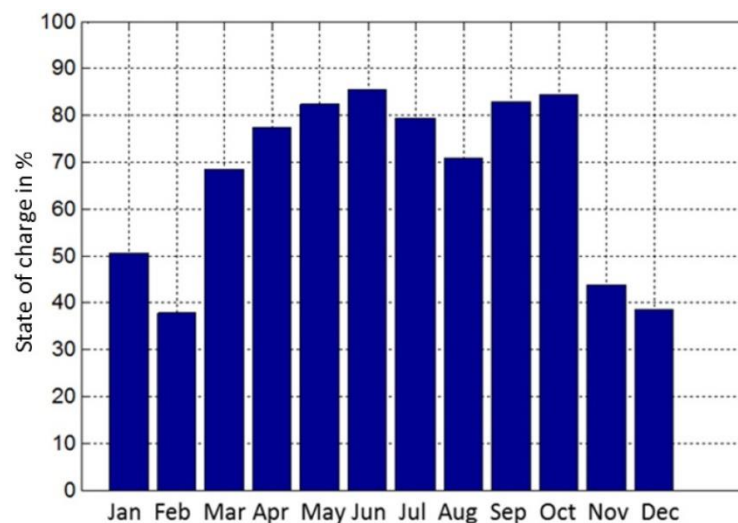
Kao što je ilustrirano prije, smanjenje solarnih vršnih vrijednosti imat će pozitivan utjecaj na niskonaponsku mrežu i na superponirane razine mreže.



Slika 24. Operativna strategija za vlastitu potrošnju i podršku mreži [34]

### Vlastita potrošnja, podrška lokalnoj mreži i regulacija frekvencije

Zbog vrlo brzog vremena odziva baterijski sustavi za skladištenje također su prikladni za pružanje usluga regulacije frekvencije. Međutim, da bi mogli pružiti ovakvu uslugu skladišni sustavi moraju imati dovoljno slobodnih kapaciteta. Raspoloživi kapaciteti s druge strane ovise o dobu dana i godini. Na slici 25 prikazano je prosječno stanje napunjenosti (*SOC engl. State of charge*) baterije ovisno o mjesecu u godini. Može se uočiti da je prosječni SOC relativno nizak, posebno tijekom zimskih mjeseci koji sežu od studenog do veljače, što znači da su kapaciteti dostupni. Ti se kapaciteti mogu koristiti za pružanje dodatnih usluga, npr. pružanje snage uravnoteženja, regulacije frekvencije ili trgovanja na tržištima energije.

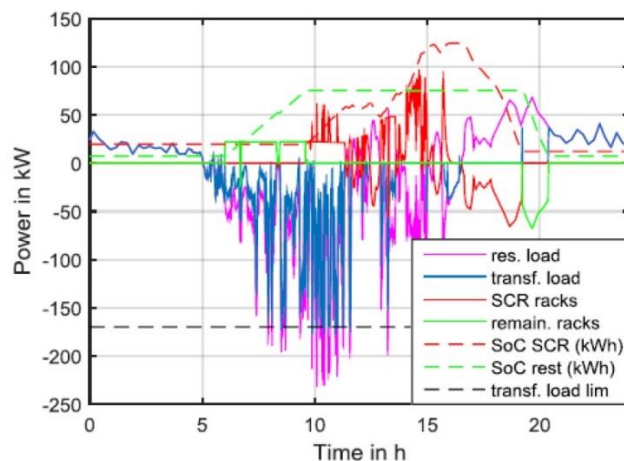


Slika 25. Prosječno stanje napunjenosti tipičnog baterijskog sustava za skladištenje ovisno o mjesecu u godini [34]

Za pružanje usluga regulacije frekvencije paralelno s potporom lokalne mreže i poboljšanjem samodostatnosti potrebna je još sofisticiranija operativna strategija. Na slici 26 primjereno je prikazan rezultirajući profil rada baterijskog sustava za skladištenje energije koji istovremeno pruža navedene usluge. U tom slučaju se uzima u obzir rezerva sekundarne regulacije (SCR) za frekvencijsku podršku, a rezultati se temelje na bateriji srednje veličine (maksimalno 200 kW) koja služi kao zajednički sustav za pohranu u niskonaponskoj mreži. Međutim, te se strategije mogu primijeniti i na druge sustave za pohranu energije.

Dok je na slici 24 ograničenje napajanja bilo temeljeno na kućanstvu, ograničenje napajanja u ovom scenariju izvedeno je iz maksimalnog opterećenja transformatora u odgovarajućoj niskonaponskoj mreži. Kada se primjenjuje ova strategija rada, opterećenje transformatora se održava ispod specifične granice označene isprekidanom linijom.

Ukupni kapacitet baterijskog sustava za skladištenje energije podijeljen je na kapacitet za pružanje SCR-a i ostalih usluga (ostatak). Može se vidjeti da se obje podjele koriste kako bi se opterećenje transformatora zadržalo ispod definirane granice. Dok se dio puni izravno u jutarnjim satima kako bi se imao dovoljan kapacitet za napajanje zajednice u večernjim satima, dio "SCR" radi od kasnog jutra do rane večeri.

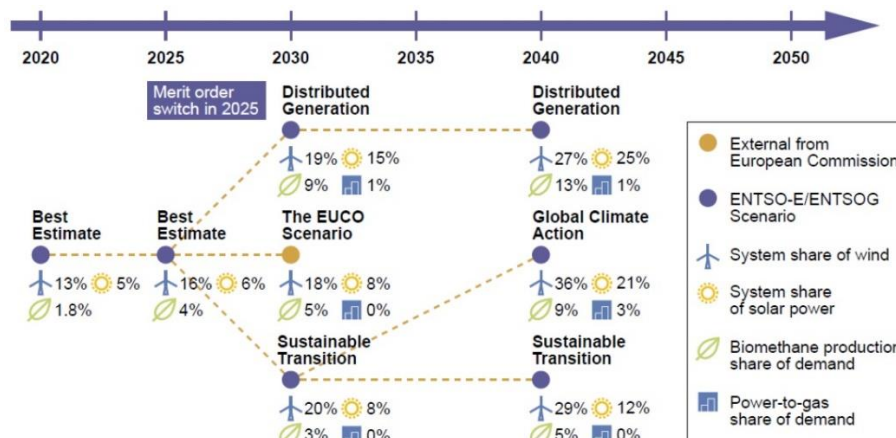


*Slika 26. Operativna strategija za vlastitu potrošnju, podršku mreži i SCR (frekvencijska podrška) [34]*

## 6. POTENCIJALI SKLADIŠTENJA U SVEZI POVEĆANE INTEGRACIJE OIE U BUDUĆIM MREŽAMA

### 6.1 Budući scenariji integracije OIE

Prema studijama [24], svi scenariji predviđaju visok porast integracije obnovljivih izvora na europskoj razini. Navode se tri različita scenarija za 2030. i 2040., uglavnom podijeljena na koncepte distribuirane proizvodnje, globalne klimatske akcije i održive tranzicije. Scenariji su karakterizirani različitim pretpostavkama koje se odnose na termički meritorni poredak, zahtjevima potražnje i integracije obnovljivih izvora energije. Sljedeća slika sažima udio sustava obnovljive energije (OIE) prema različitim scenarijima i vremenskom rasporedu.



Slika 27. Scenariji za 2030. i 2040. temeljeni na tri scenarija [24]

Najbolji procijenjeni scenariji za 2025. temelje se na perspektivi OPS-a, odražavajući sve važeće nacionalne i europske propise, dok nisu u sukobu ni s jednim drugim scenarijem. Redoslijed prioritnosti opisan za 2025. zahtjeva plin prije ugljena. Do 2030. priče diktiraju da plin bude ispred ugljena u redoslijedu prioritnosti, vođen cijenama i potrebom za smanjenjem emisija. U nastavku se nalazi kratki pregled različitih analiziranih scenarija s fokusom na instalirani proizvodni kapacitet i potražnju u ciljanim zemljama za 2030. godinu.

- Scenarij održive tranzicije 2030

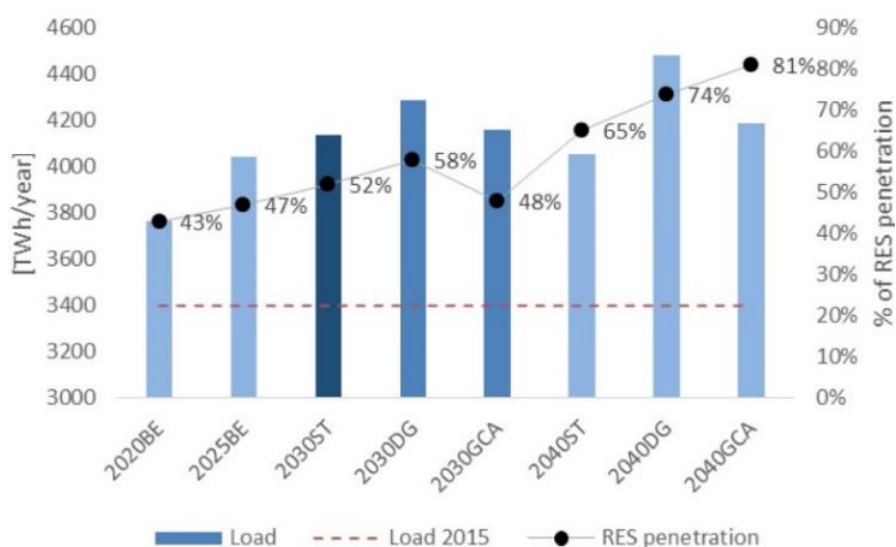
Glavni cilj scenarija TYNDP 'Održiva tranzicija' (OT) je postizanje brzog i ekonomski održivog smanjenja CO<sub>2</sub> kroz kombinaciju nacionalnih propisa i subvencija te shema trgovanja emisijama.

- Scenarij distribuirane proizvodnje 2030

Scenarij distribuirane proizvodnje razmatra više decentraliziran razvoj s fokusom na tehnologiju krajnjeg korisnika. Za sve razmatrane zemlje veća potražnja (osim Francuske) i veći udio OIE u mješavini instaliranih kapaciteta u odnosu na glavni scenarij očekuje se 2030. godine.

- Globalni klimatski akcijski scenarij 2030

Scenarij Globalne klimatske akcije predviđa proces dekarbonizacije putem razvoja obnovljivih izvora energije u sektoru plina i električne energije. S obzirom na održivi scenarij, može se primijetiti da ovaj scenarij uzima u obzir niži rast u smislu integracije i opterećenja OIE. Općenito govoreći, što se tiče očekivane potrošnje energije, rast sustava grijanja/hlađenja i transporta opravdava veća očekivana opterećenja u scenariju distribuirane proizvodnje.



Slika 28. Integracija OIE po godinama i scenarijima [35]

### 6.3 Utjecaj OIE na buduće scenarije sustava skladištenja energije

Scenarij distribuirane proizvodnje jedini je u kojem se razmatra vrlo visok rast kapaciteta sustava za skladištenje električne energije, u skladu s decentraliziranim razvojem elektroenergetskog sustava. Tablica 6.1 sažima predviđeni razvoj sustava skladištenja električne energije prema različitim scenarijima integracije OIE.



Tablica 6.1 Skladištenje i integracija OIE [25]

	Održiva tranzicija	Distribuirani izvori	Globalna klimatska akcija
<b>Spremnik energije</b>	Nizak rast	Vrlo visok rast	Umjereni rast
<b>OIE</b>	Umjereni rast	Visok rast	Visok rast

Može se primijetiti da su svi scenariji za 2030. scenariji "Plin prije ugljena", što znači da je granični trošak najučinkovitije plinske tehnologije (plinska turbina s kombiniranim ciklusom) niži od najučinkovitije tehnologije ugljena. Ova karakteristika scenarija usklađena je s ciljem dekarbonizacije koji je postavljen Europskim energetske planom. Osim toga, trebalo bi predložiti 15 projekata sustava skladištenja energije, 12 hidro-akumulacija i 3 projekta sustava komprimiranog zraka.

U odnosu na kapacitete pohrane svaki scenarij je povezo drugi tehnološki razvoj [86] kao što je prikazano u nastavku:

- Održiva tranzicija: nizak rast

U ovom slučaju, umjereni rast obnovljivih izvora energije (uglavnom solarni paneli i vjetar) uvodi kontrolirani poremećaj u elektroenergetski sustav, pa se može kompenzirati postojećim konvencionalnim postrojenjima i niskim rastom skladišnih kapaciteta.

- Distribuirana proizvodnja (DP): vrlo visok rast

Ovaj scenarij pokazuje vrlo visok rast skladišnog kapaciteta uglavnom zbog velikog prirasta solarnih kapaciteta, koji imaju isprekidano ponašanje tijekom dana, kao i stacionarno tijekom godine. Ovo karakteristično ponašanje zahtijeva male skladišne sustave (kao što su baterije) kako bi se kompenzirale dnevne varijacije u distribuiranim elektranama i velike skladišne sustave (kao što su hidro pumpe) kako bi se kompenzirale sezonske varijacije.

DP2030: Uzimajući u obzir da je 10% novih solarnih instalacija s baterijama: 0,1 kWh baterije na svaki 1kW instalirane snage fotonaponskih elektrana (500 W/kWh) i pumpno skladištenje na temelju ENTSOE (*engl. European Network of Transmission System Operators*) prikupljanja podataka.

DP2040: Uzimajući u obzir da je 50% novih solarnih instalacija s baterijama: 0,5 kWh baterije na svaki 1kW instalirane snage fotonaponskih elektrana (500 W/kWh) i pumpno skladištenje na temelju ENTSOE (*engl. European Network of Transmission System Operators*) prikupljanja podataka.

- Globalna klimatska akcija: umjeren rast

Ovaj scenarij razmatra sličan razvoj integracije OIE do 2030. kao i scenarij 'Održiva tranzicija' (OT). Međutim, od 2030. do 2040. očekuje se veća integracija OIE. Iz tog razloga se očekuje srednji rast, s obzirom da je 10% novih solarnih instalacija opremljeno baterijama: 0,1 kWh baterije na svaki 1kW solara (500 W/kWh).

#### **6.4 Analiza tehnologija skladištenja na razini distribucijske mreže**

Potaknuti europskim politikama i prethodno spomenutim scenarijima, očekuju se značajne promjene u europskom energetsom sustavu do 2050. Postizanje značajne razine dekarbonizacije već 2030. – povećanjem integracije OIE u elektroenergetske sustave – zahtijevat će da sustav proizvodnje električne energije napravi značajne strukturne promjene koje će uključivati razvoj značajnog kapaciteta za pohranu energije. U sustavu s visokim udjelom varijabilne proizvodnje OIE, bit će izazovno osigurati da opskrba električnom energijom u smislu frekvencije, napona i stabilnosti bude potpuno zajamčena, fleksibilna i dispečibilna. Provedba ovih promjena zahtijeva značajna ulaganja u razvoj skladišnih tehnologija i objekata koji podržavaju nedispečersku proizvodnju OIE [38].

Uz ostale mogućnosti fleksibilnosti, skladištenje energije odigrat će ključnu ulogu u prijelazu na energetske sustav s niskim udjelom ugljika. IRENA (*engl. International Renewable Energy Agency*) procjenjuje da će se ukupni kapacitet skladištenja električne energije utrostručiti u smislu energije do 2030., ako zemlje nastave s udvostručenjem udjela obnovljivih izvora energije u svjetskom energetsom sustavu [37].

Uzimajući u obzir očekivanu integraciju pohrane, na razini distribucije, tehnologije pohrane mogu podržati izvođenje različitih usluga i važnu ulogu u sljedećim aspektima:

*Tablica 6.2 Podrška spremnika energije na razini distribucije [37]*

Usluga	Opis
<b>Podrška kapacitetu</b>	Na temelju upotrebe jedinice za pohranu energije za prebacivanje opterećenja, npr. od vršnog do osnovnog razdoblja opterećenja, kako bi se smanjile maksimalne struje koje teku kroz ograničenu mrežnu opremu.
<b>Podrška mreže za nepredviđene situacije</b>	Korištenje pohrane energije za podršku mreži i smanjenje utjecaja gubitka glavne komponente mreže – u hitnim situacijama.
<b>Odgoda ulaganja u distribuciju</b>	Usmjeren je na korištenje skladišta energije za odgodu nadogradnje infrastrukture ili instaliranje novih vodova za rješavanje problema zagušenja.
<b>Kvaliteta distribucije električne energije</b>	Ova usluga ima za cilj održavanje naponskog profila i frekvencije u prihvatljivim granicama, čime se povećava kvaliteta opskrbe i smanjuje vjerojatnost nestanka struje.
<b>Otočni rad</b>	Skladištenje energije može se koristiti za poboljšanje pouzdanosti sustava uključivanjem napajanja tijekom ispada.
<b>Ograničenje uzvodnih poremećaja</b>	Ograničenje smetnji odnosi se na činjenicu da distribucijski operatori imaju ugovor o pristupu mreži s prijenosnim operatorom, s pravilima postavljenim u skladu s mrežnim kodeksima, koji od njih zahtijevaju da ograniče smetnje koje uzrokuju na uzvodnim visokonaponskim mrežama na ugovorne vrijednosti. Ako su ta ograničenja prekoračena, neke vrste sustava za pohranu mogu pomoći u ispunjavanju obveza izvođenjem aktivnog filtriranja.

Osim svih ovih usluga, jasna korist dobivena distribuiranom instalacijom nekoliko sustava i tehnologija za pohranu je maksimiziranje obnovljivih tehnologija poput vjetera ili sunca. Glavni problem ovih tehnologija je odvajanje između proizvodnje i potrošnje; međutim pravilno dimenzioniranje tehnologija skladištenja jamči odgovarajuću snagu i dostupnost energije na distribucijskoj razini.

Osim toga, sustavi pohrane mogu izgladiti vrhove i padove povremene opskrbe električnom energijom iz obnovljivih izvora putem velikih i centraliziranih sustava pohrane, ali mala skladišta raspoređena u blizini elektrana na obnovljive izvore energije također mogu u budućnosti imati dalekosežnije implikacije za dizajn i rad mreže za distribuciju električne energije, ne samo pametne mreže [39].

Distribuirana rješenja podržavaju kontrolu napona, smanjenje ograničenja, kao i druge usluge navedene u prethodnoj tablici. Nadalje, na razini kupca, mogu pružiti usluge uravnoteženja tijekom vršnog vremena, rezervu tijekom nestanka struje i općeg odgovora na potražnju. Osim toga, ova distribuirana konfiguracija može biti učinkovitija od velikih centraliziranih objekata i uz to održiva, u ekonomskom smislu, zbog infrastrukture povezane s velikim skladištima (na razini prijenosa) koja nisu potrebna.

## **6.5 Potencijalni budući scenariji virtualnog skladišnog pogona (VSP)**

Povećanje proizvodnje OIE uzrokuje da mreže djelomično dosežu svoje granice. Kako bi se pokrilo visoku integraciju OIE, kompenzirala niska razdoblja proizvodnje i održala stabilnost mreže, potrebne su tehnologije skladištenja i alati za koordinirani rad. Sustavi za pohranu energije već su integrirani u europsku energetska mrežu u malom opsegu. Na primjer, baterijski sustavi za pohranu energije solarnih panela postavljeni su na rezidencijalnoj razini u zemljama kao što su: Njemačka, Australija, Italija i UK. Taj će se trend nastaviti i sljedećih godina. S druge strane, veliki sustavi skladištenja sve su češće instalirani uz vjetroelektrane ili solarne parkove, s glavnom svrhom skladištenja energije iz obnovljivih izvora i stabilizacije mreže.

Trenutno su najčešći tipovi skladišta reverzibilna hidroelektrana i baterijski sustavi spremnika energije. Reverzibilna hidroelektrana se može koristiti u različitim primjenama i već igra vitalnu ulogu u energetskom sustavu jugoistočne Europe. Na primjer, koristi se za regulaciju reaktivne snage i napona, kao i za rezervu za vraćanje frekvencije, uslugu

pokretanja bez napajanja i otočni rad. Dok je implementacija često ograničena na dostupnost tehnički izvedivih lokacija, zabrinutost za okoliš i financijske neizvjesnosti, baterijski sustav spremnika energije je fleksibilan i može se postaviti na gotovo svaku lokaciju u mreži. Štoviše, zahvaljujući modularnom dizajnu sustava snaga i energetska kapacitet baterije mogu se prilagoditi zahtjevima na licu mjesta. Jedna velika prednost baterijskih sustava u usporedbi s reverzibilnim elektranama kao spremnicima je brže vrijeme odziva. Dok reverzibilnim sustavima treba nekoliko sekundi do nekoliko minuta da se prebace iz jednog načina rada u drugi, baterije mogu reagirati unutar milisekundi. Koordinacija među različitim vrstama pohrane je vrlo važna i omogućit će je proizvođači virtualnog skladišnog pogona.

Tržišne analize Smart Grid usluga i proizvoda, predviđaju šest mogućih scenarija:

Prvi scenarij odnosi se na doprinos kontrole frekvencije. Frekvencijska rezerva je identificirana kao aplikacija s drugim najvećim potencijalom za virtualne skladišne pogone koju su razmotrili HOPS, TRANS i ADMIE. Ova vrsta usluge također je identificirana kao najrelevantnija za regionalni centar za koordinaciju skladištenja. Prema OPS-ovima, regionalni centar za koordinaciju skladištenja bi se mogao koristiti za rezervu za ponovno uspostavljanje frekvencije u Hrvatskoj, Bosni i Hercegovini, Rumunjskoj i Grčkoj.

Drugi scenarij povezan je s uslugom pokretanja bez napajanja, otočnim radom, održavanjem stabilne kvalitete mreže kao i prikupljanjem i praćenjem podataka. Budući da crni start može zahtijevati određenu minimalnu snagu, agregacija sustava za pohranu pomoću virtualnog skladišnog pogona je od koristi. U ovom slučaju bitna je lokacija skladišnih jedinica kako bi se osigurala učinkovitija podrška sustavu. Također, zadržavanje ili čak poboljšanje kvalitete mreže, posebno u slučaju otočnog načina rada, može se olakšati koordiniranim radom skladišnih sustava. Međutim, budući da otočne mreže obično nisu tako stabilne kao međusobno povezane mreže, zahtjevi za hardver i softver mogu biti veći. Također se mora osigurati da su uređaji za formiranje mreže postavljeni. Budući da su raspodijeljena sredstva povezana na različitim lokacijama mreže, puno informacija o trenutnom statusu mreže (napon, frekvencija) na različitim mjestima može se prikupiti i koncentrirati u jednoj točki. Međutim, prikupljanjem podataka iz distribuiranih sustava uvijek se mora pažljivo postupati jer mogu biti uključeni i osobni podaci krajnjih korisnika.

Treći scenarij odnosi se na dispečerske mjere. Virtualni skladišni pogon se također može koristiti za upravljanje zagušenjem i frekvencijsku podršku. Skup uređaja za pohranu

može imati veći utjecaj od pojedinačnih uređaja. No, za provedbu ovih mjera nužna je integracija regionalnog WAMAS (*engl. Wide Area Monitoring and Awareness System*) sustava. Sustav WAMAS će dati informacije o trenutnom statusu elektroenergetskog sustava i alarmirati ako je elektroenergetski sustav blizu granica rada. Štoviše, zahtjeve za automatsko otkrivanje oscilacija i lokalizaciju izvora oscilacija izrazilo je nekoliko OPS-ova. Dodatno, WAMAS bi trebao izvršiti korektivne/popravne radnje kako bi osigurao pouzdan rad.

Četvrti scenarij odnosi se na kontrolu napona. Budući da su distribuirani uređaji za pohranu podataka unutar virtualnog skladišnog pogona povezani na niskonaponsku i srednjenaponsku mrežu, moguć je samo izravan utjecaj ovih mrežnih razina. Potrebno je razmotriti smještaj povezanih uređaja za pohranjivanje, budući da napon varira ovisno o lokaciji. Izravna potpora prijenosnoj mreži moguća je upravo preko velikih proizvodnih jedinica i uređaja za pohranu koji su na nju povezani.

Peti scenarij odnosi se na tržišta za dan unaprijed i unutar dana. Kroz koordinirano upravljanje energijom skladišnih jedinica, regionalni centar za koordinaciju skladištenja bi također mogao podržati povećanje integracije OIE i izbjeći smanjenje OIE. Tehnologije pohrane mogu smanjiti višak vršne proizvodnje obnovljive energije i osigurati energiju kada je proizvodnja niska. To je povezano s energetsom arbitražom i omogućuje kupnju energije u razdobljima niske cijene i prodaju u razdoblju visoke cijene. Ovu uslugu zasigurno može pružiti i virtualni skladišni pogon. Virtualni skladišni pogon je jasno identificiran kao pokretač podrške za distribuciju pohrane na tržištima električne energije. Da bi sustav bio učinkovit, potrebna su sučelja za druge upravljačke alate kako bi se integracija i rad OIE mogli optimizirati.

Konačno, šesti scenarij pokriva koordinaciju pohrane (VSP) s aplikacijom upravljanja potražnjom. Suvremene mreže imaju sve veću potrebu za zajamčenom fleksibilnošću koja se može postići baterijskim skladištenjem na jedan način, ali i kroz fleksibilnost potrošača da prilagode svoju potrošnju ili uz fleksibilnost električnih vozila koja mogu mijenjati svoje vrijeme punjenja. Zbog upravljanja potražnjom, upravljivi potrošači postaju vrlo važan dio elektroenergetskog sustava. Glavno ograničenje za usvajanje upravljanja potražnjom u velikim razmjerima bio je izazov koordinacije tisuća ili čak milijuna distribuiranih sustava da rade na koordiniran način i učinkovito smanjuju potražnju električne mreže. Međutim, s proširenjem internetskih veza na sve vrste uređaja, postoji mogućnost izgradnje zajedničke platforme na kojoj bi komunalna poduzeća mogla graditi sustave upravljanja potražnjom.

## 6.6 Sudjelovanje na tržištu virtualnog skladišnog pogona

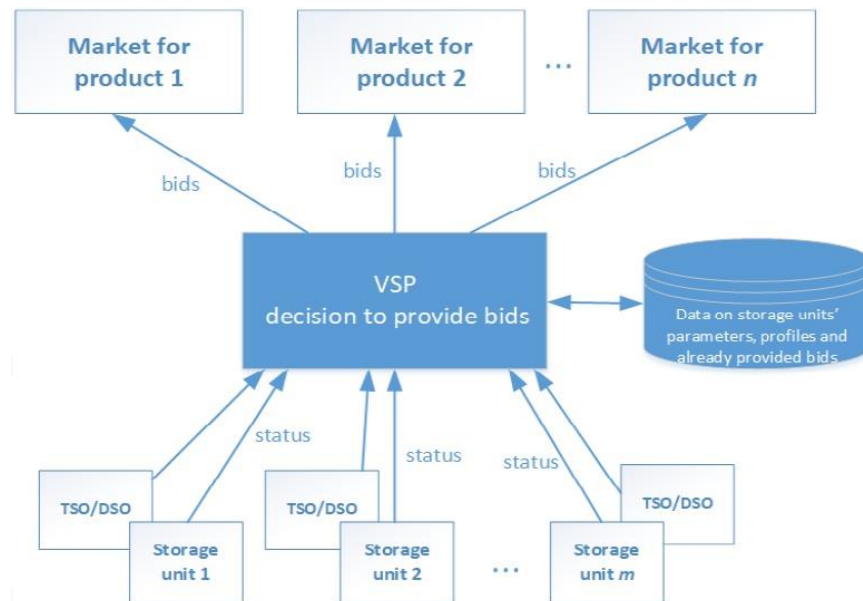
Isplativo funkcioniranje sustava spremnika energije moguće je postići samo omogućavanjem njegove višenamjenske uporabe kako bi se optimalno doprinijelo povećanju učinkovitosti rada elektroenergetskog sustava. Također, predviđeni su mehanizmi podrške kako bi tehnologije pohranjivanja mogle postići isplativost. Stoga je omogućavanje sudjelovanja na različitim postojećim i budućim tržištima ključno za VSP i skladišne jedinice koje će njime biti kontrolirane. Dodatno, tržišno sudjelovanje malih skladišnih jedinica uvjetovano je njihovim agregiranjem, slično kao mala proizvodnja, upravljanje potražnjom itd.

VSP je zamišljen kao platforma koja sadrži upravljačke algoritme za optimalnu koordinaciju raspoloživih jedinica za pohranu energije u svrhu pružanja frekvencijske podrške, regulacije napona i upravljanja zagušenjem. Dok je glavna funkcija proizvoda optimizirati rad više malih skladišnih jedinica, glavni cilj proizvoda je pružiti nekoliko različitih usluga. Ove usluge treba smatrati ponudama na više različitih vrsta tržišta. Iako su te usluge toliko različite, njihovo pružanje s tehničkog gledišta može se smatrati stvaranjem pozitivnih ili negativnih priključenja djelatne/jalove snage u različitim čvorištima mreže. Ova dodatna priključenja snage mogu osigurati smanjenje opterećenja u razdobljima visokih cijena na tržištima dan unaprijed i unutar dana i njihov prijenos u razdoblja niskih tržišnih cijena (cjenovna arbitraža). Priključivanje dodatne snage može pružiti usluge regulacije frekvencije, tj. energije uravnoteženja. U ovom slučaju važna je brzina aktivacije, koja je određena parametrima skladištenja, dok se lokacijsko ograničenje odnosi samo na regulacijsko područje opterećenja i frekvencije. Usluge upravljanja zagušenjem i naponske podrške koje se mogu pružiti također se odnose na ubrizgavanje aktivne/jalove snage, ali u ovom slučaju lokacija je od veće važnosti.

Dizajn VSP proizvoda, odnosno njegovi zahtjevi trebaju zadovoljiti određene uvjete koji će omogućiti učinkovito tržišno sudjelovanje skladišnih jedinica koje kontrolira VSP. Ovi zahtjevi se odnose na prikupljanje potrebnih specifičnih vrsta podataka s određenom učestalošću. Pružanje usluga VSP-a na tržištu može se smatrati procesom od tri koraka.

U prvom koraku potrebno je izraditi skup ponuda za različita tržišta. Kao što je već objašnjeno, VSP bi trebao dati ponude tržištima za različite proizvode i usluge. Te će ponude

ovisiti o vrsti i statusu pojedinačnih skladišnih jedinica kojima koordinira VSP. Ovaj korak je prikazan na slici 29.



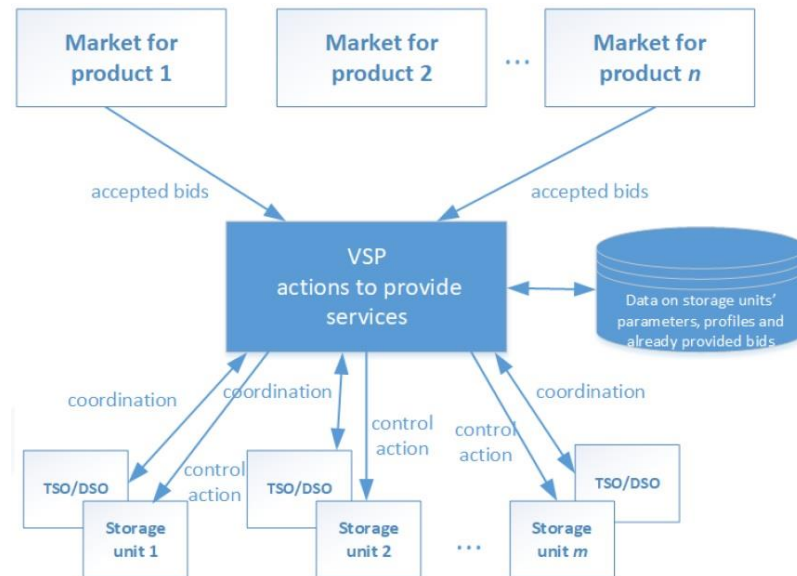
Slika 29. Pružanje ponuda tržištima za različite proizvode [39]

Proces zahtijeva prikupljanje podataka za status svake jedinice za pohranu koju koordinira VSP proizvod. Status skladišne jedinice vezan je uz njezinu raspoloživost koja uključuje dostupnost mreže (distribucijske i prijenosne) na koju je jedinica priključena. Ako VSP koordinira skladišne jedinice iz različitih zemalja/kontrolnih zona frekvencije opterećenja, potrebna je provjera dostupnosti i rezervacija prekograničnog/međuzonskog prijenosnog kapaciteta. Osim toga, bitni dio statusa svake jedinice za pohranu je njezino stanje napunjenosti. VSP proizvod treba posjedovati informacije o tipu i tehničkim karakteristikama svake skladišne jedinice koja je usklađena i može koristiti profile tipova skladišnih jedinica (baza podataka). Na temelju statusa i pohranjenih podataka mogu se dati ponude na različitim tržištima za zadani udio sudjelovanja na tržištima za različite proizvode. Potrebne su opsežne analize tržišta kako bi se odredio optimalan udio sudjelovanja na tržištima za različite proizvode. Za ove analize potrebni su povijesni podaci o cijenama s tih tržišta i razmatranje tehničkih karakteristika koordiniranih skladišnih jedinica.

Ako neke od ovih ponuda budu prihvaćene, drugi korak će uključivati pružanje kontrolnih radnji koje će omogućiti isporuku prihvaćenih usluga. Ovaj korak prikazan je na slici 30. Optimizacijski algoritmi za način aktiviranja pojedinačnih jedinica pohrane u svrhu pružanja određene usluge trebaju biti implementirani od strane VSP proizvoda. S tržišne točke gledišta, isporuka usluga koje su ponuđene i prihvaćene je ključna. To uključuje osiguranje



potrebne količine aktivne/jalove energije u određenom trenutku sa potrebnom brzinom, profilom i lokacijom.



Slika 30. Akcije za isporuku usluga za prihvaćene ponude [39]

Treći korak uključuje financijski obračun i raspodjelu ostvarenog prihoda vlasnicima skladišnih jedinica. Ovaj korak zahtijeva podatke mjerenja svake jedinice pohrane za isporuku ponude. Trebalo bi usvojiti i implementirati načelo raspodjele prihoda na temelju ovih podataka.

## 7. TRŽIŠTA POHRANE ELEKTRIČNE ENERGIJE

### 7.1 Integracija tržišta distribuirane pohrane energije

#### a) Vrijednost skladištenja energije u elektroenergetskim sustavima

Sustav spremnika energije je identificiran kao potencijalno rješenje za izazove koji proizlaze iz tranzicije elektroenergetskih sustava. Sposobnost pohranjivanja energije, odnosno odgode potrošnje električne energije, i visoka razina fleksibilnosti tehnologija pohranjivanja mogle bi igrati glavnu ulogu u prijelazu na nisko-ugljičnu budućnost. Unatoč tome, iako su tehnološke prednosti integracije sustava spremnika energije dokazane, njihovu je ekonomsku vrijednost teško odrediti, a trenutni regulatorni okvir dovodi do neostvarivih profita. To je i dalje glavna prepreka širokoj implementaciji sustava spremnika energije.

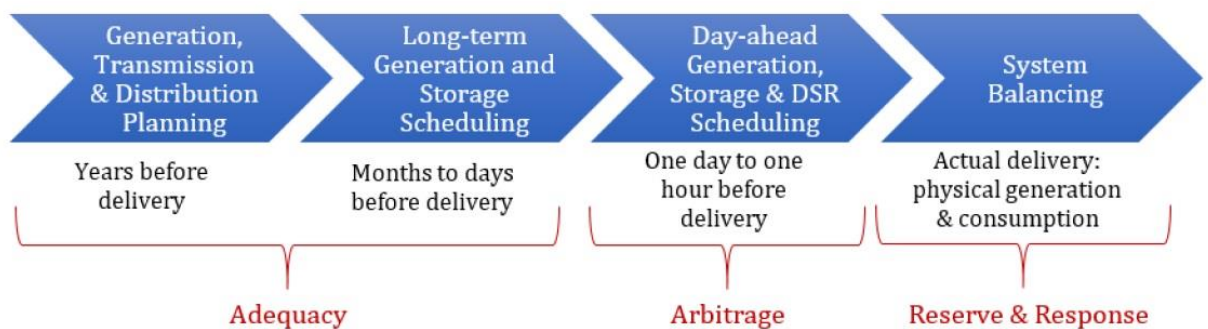
Vrijednost pohrane može se opisati u smislu prednosti sustava ili tržišnog prihoda. Prvi pristup uzima u obzir različite usluge koje sustav spremnika energije može pružiti u elektroenergetskim sustavima, kao što su integracija obnovljivih izvora energije, smanjenje vršne vrijednosti, kontrola frekvencije i kontrola napona. Potencijalne prednosti sustava pohrane mogu se okarakterizirati [31]:

- smanjenje operativnih troškova proizvodnje zbog mogućnosti poboljšanja systemske integracije proizvodnje OIE i istiskivanja neučinkovitih rezervi
- smanjenje troškova ulaganja u proizvodnju kroz doprinos sigurnosti opskrbe
- smanjenje troškova ulaganja u mrežu kroz odgodu pojačanja mreže.

Prema istoj studiji za slučaj Velike Britanije, spremnici energije u budućem sustavu s niskim udjelom ugljika mogli bi donijeti neto godišnju korist od 0,12 milijardi funti 2020., 2 milijarde funti 2030. i više od 10 milijardi funti 2050. Za masovne i distribuirane pohrane je utvrđeno da je lokacija značajan faktor u oba slučaja. Nije iznenađujuće, dok je masovno skladištenje korisnije u blizini velikih proizvođača, distribuirani sustavi pohrane više doprinose u područjima s većom potrošnjom. Unatoč tome, utvrđeno je da distribuirana pohrana ima veću agregiranu vrijednost od skupne pohrane u svim slučajevima [31].

S druge strane, koristi pohrane iz tržišne perspektive proizlaze iz sposobnosti sustava spremnika energije da pomogne u ispunjavanju ugovornih sporazuma, cjenovne arbitraže te balansiranja i pomoćnih usluga [30]. Iako je vrijednost sustav spremnika energije bila tema istraživanja u više studija, dodijeljena vrijednost varira između svih njih. Razlog tome su različiti pristupi njegovoj kvantifikaciji, različita raspodjela kapaciteta uslugama sustava pohrane, kao i različiti geografski, tržišni i tehnički parametri. To dovodi do zaključka da je točno određivanje vrijednosti sustava spremnika energije teško i specifično za sustav, tj. jako ovisi o ulaznim čimbenicima.

Potencijalne koristi sustava spremnika energije mogu se staviti u termine vremenskog horizonta, kao što je prikazano na slici 31. Međutim, trenutni regulatorni okvir je nedvojbeno neadekvatan za slučaj skladištenja zbog mnoštva usluga koje sustav pohrane može ponuditi u različitim područjima elektroenergetskog sustava u cijelom vremenskom horizontu. Izazov za kreatore politike je razviti takve tržišne mehanizme koji će primjereno nagraditi vlasnike sustava pohrane za pružanje ovih različitih pogodnosti. Ovo je izazovan zadatak budući da ekonomske koristi skladištenja još nisu u potpunosti shvaćene s obzirom na poteškoće u izračunavanju točne vrijednosti sustava spremnika energije u cjelini i koristi za svakog sudionika na tržištu, a time i povezane tokove prihoda [32].

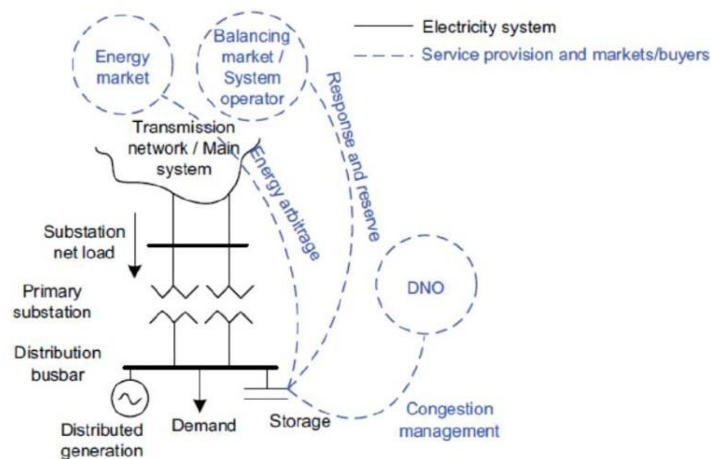


Slika 31. Usluge spremnika energije u različitim vremenskim horizontima [32]

#### b) Poslovni slučaj za skladištenje energije

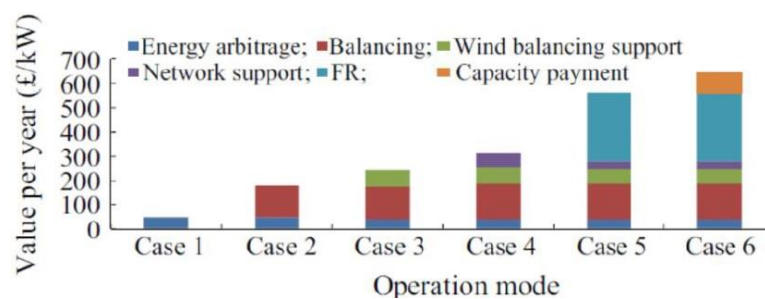
S obzirom na različite usluge spremnika energije, raspodjela kapaciteta između različitih funkcija iznimno je važna. Ovu činjenicu podupiru brojne studije koje zaključuju da u trenutnim tržišnim uvjetima sustavi spremnika energije nisu ekonomski održivi samo kroz cjenovnu arbitražu i rijetko su isplativi kada se zbrajaju koristi od cjenovne arbitraže i prihodi od pomoćnih usluga.

Optimalna raspodjela kapaciteta sustava pohrane na različita tržišta koja bi maksimizirala profit i time privukla ulaganja moguća je samo kroz stohastičko raspoređivanje jer zahtjevi za uslugom variraju dinamički ovisno o uvjetima sustava [33]. Za tu svrhu postoje različite objavljene metode, konkretno, model optimizacije za koordinaciju pružanja višestrukih usluga spremnika distribuirane jedinice, koji uključuje cjenovnu arbitražu, balansiranje sustava uključujući brzu regulaciju frekvencije, vršno brijanje te kontrolu aktivne i jalove snage za upravljanje zagušenjem, slikovno prikazano na slici 32.



Slika 32. Prikaz pružanja više usluga distribuiranog sustava pohrane [32]

Nadalje, [38] proširuje isti pristup na razmatranje dodatnih prihoda od potpore proizvodnji vjetra i tržišta kapaciteta. Iz slike 33 može se zaključiti da vrijednost sustava spremnika energije raste sa sudjelovanjem na svakom dodatnom tržištu.



Slika 33. Skupna vrijednost spremnika energije iz sudjelovanja na različitim tržištima u Velikoj Britaniji [38]

### c) Sudjelovanje pohrane energije na različitim tržištima

S obzirom na trenutni zakonodavni okvir u EU, sustavi spremnika energije se klasificiraju kao proizvodna sredstva na tržištima električne energije. Prema Direktivi 2009/72/EZ proizvodna sredstva imaju vrlo široku definiciju kao "imovina koja proizvodi električnu energiju". Opravdanje za ovu klasifikaciju je činjenica da tehnologije skladištenja mogu proizvesti električnu energiju iz tehničke perspektive. Međutim, spremnik energije ne može generirati pozitivan neto protok električne energije i to je glavni argument za uvođenje nove klasifikacije [20].

Uz trenutnu klasifikaciju sustava pohrane kao proizvodnja, oni mogu sudjelovati u veleprodaji, uslugama balansiranja i tržištima kapaciteta. Tržišno sudjelovanje malog distribuiranog skladišta ovisi o njegovom agregiranju.

#### Veleprodajno tržište

U okviru postojeće klasifikacije sudjelovanje sustava spremnika energije na veleprodajnom tržištu električne energije povezano je s premještanjem električne energije iz razdoblja niske potražnje u razdoblja vršne potražnje (cjenovna arbitraža). Budući da se ove varijacije potražnje događaju na dnevnoj, tjednoj i sezonskoj razini, samo će tehnologije skladištenja s dugim trajanjem skladištenja (kao reverzibilne hidroelektrane) imati značajne koristi od sudjelovanja na veleprodajnom tržištu.

Ovu tvrdnju potkrepljuje nekoliko rezultata istraživanja na ovom području. Na primjer, [33] predstavlja istraživanje ekonomije skladištenja energije na njemačkom tržištu električne energije i rezervama. U ovom radu je pokazano da se za reverzibilne hidroelektrane 25% troškova životnog ciklusa može pokriti iz prihoda cjenovne arbitraže, dok za ostale tehnologije pohrane ta vrijednost nije veća od 8%. Slično istraživanje za Finsku [34] dalo je usporedive rezultate u pogledu prihoda od sudjelovanja na veleprodajnom spot tržištu.

Mala distribuirana proizvodnja za koju je dizajnirana virtualna elektrana pokriva tehnologije skladištenja s kraćim trajanjem i stoga njezino sudjelovanje na veleprodajnom tržištu može pokriti samo mali dio troškova životnog ciklusa.

#### Uravnoteženje tržišta usluga

Sudjelovanje sustava spremnika energije na tržištima usluga uravnoteženja odnosi se na osiguranje kapaciteta i energije za zadržavanje i ponovno uspostavljanje frekvencije (primarna i sekundarna regulacija frekvencije). Pružanje ovih usluga može biti značajan izvor

prihoda za tehnologije pohrane s brzim odzivom (kao baterijske tehnologije pohrane) koje obično imaju kratko trajanje pohrane.

Na primjer, [33] pokazuje da će sudjelovanje natrij-sulfid i olovnih baterija na primarnim i sekundarnim rezervnim tržištima, za slučaj Njemačke, osigurati prihode koji će zajedno s prihodima od veleprodajnog tržišta biti dovoljni za pokrivanje troškova životnog ciklusa. U slučaju Finske [34], izračunati prihodi nisu dovoljni za pokrivanje troškova životnog ciklusa, budući da su oscilacije u nordijskoj električnoj energiji mnogo manje izražene nego u Njemačkoj i da je na ovom tržištu prisutna mnogo fleksibilnija proizvodnja [36]. Drugo istraživanje o sudjelovanju spremnika energije u tržišnim mehanizmima GB [37] potvrđuje tvrdnju da je prihod ostvaren sudjelovanjem na balansnom tržištu veći od prihoda od energetske arbitraže na veleprodajnom spot tržištu. Važno je spomenuti da ove studije uključuju optimizaciju brojeva ciklusa koji čine najveće moguće prihode za baterije i uzimaju u obzir 100% točnu prognozu cijena. Unatoč tome, može se izvući zaključak da se za baterijske tehnologije pohrane može generirati značajan iznos prihoda sudjelovanjem na balansirajućim tržištima.

U istraživanju o osiguravanju rezervi za regulaciju frekvencije u Njemačkoj i Nizozemskoj [36] pokazalo se da je nizozemski sustav prikladniji za sustave spremnika energije zbog mogućnosti povlačenja ponuda jedan sat prije obveze. Ograničava rizik od kršenja obveza, što je najveća briga na njemačkom balansnom tržištu. Također, sudjelovanje bez čvrstih ugovora je od velike koristi za sudjelovanje skladišta energije na balansirajućim tržištima. Ovo takozvano 'pasivno balansiranje' trenutno je najprikladnija opcija za sustave spremnika energije.

### Tržište kapaciteta

Drugi važan aspekt, gdje sustav spremnika energije može pružiti vrijednost, je sigurnost opskrbe [36]. Sve veća upotreba obnovljivih izvora energije ovisnih o vremenskim prilikama dovela je do uvođenja novih tržišta električne energije kako bi se osigurala sigurnost opskrbe, prvenstveno uvođenjem tržišta kapaciteta. Takvo tržište uspostavljeno je u Velikoj Britaniji i nekim drugim zemljama u svijetu. Međutim, neka iskustva uvođenja tržišta kapaciteta, primjerice u Zapadnoj Australiji, rezultirala su visokim cijenama koje se mogu protumačiti kao neuspjeh mehanizma kapaciteta [37]. Njemačka nije implementirala mehanizam velikih kapaciteta jer je skup i neučinkovit, već se oslanja na tržište električne energije.

Tržište kapaciteta još je jedno mjesto gdje se može iskazati vrijednost skladištenja i ostvariti dodatni prihod. Sustavi spremnika energije koji su uključeni u ugovor o kapacitetu moraju isporučiti određenu količinu energije tijekom razdoblja visokog opterećenja sustava. Kapacitet se može zatražiti u bilo koje vrijeme tijekom ugovorenog razdoblja. Prema [100], takva „otvorena” obveza ključno je pitanje za većinu pružatelja usluga skladištenja jer je njihovo trajanje pražnjenja nužno ograničeno na maksimalnu naknadu. Uređaj za pohranu mora ostati potpuno napunjen dulje vrijeme i pretrpjeti parazitske gubitke. Ako bi se uređaj za pohranjivanje potpuno ispraznio prije kraja razdoblja upozorenja (četiri sata prije očekivanog stresnog događaja), njegov bi dobavljač bio podvrgnut visokoj kazni. Alternativni pristup sklapanja ugovora na definirana vremenska ograničenja mogao bi osigurati sigurniji tok prihoda i poboljšati integraciju spremnika energije unutar sustava.

Jedan od izazova za pružatelje usluga skladištenja je taj što mogu izravno sudjelovati na tržištu kapaciteta samo ako je njihov kapacitet najmanje 2 MW, osim ako ne ulaze na tržište zajedno s drugim proizvođačima putem usluge 'agregacije' [37].

#### d) Agregacija distribuirane pohrane

Agregacija malog distribuiranog skladišta uvjet je uspješnog nastupa na regionalnim tržištima. Uloga agregatora može se izraziti u tri glavne točke:

- 1) Identificirati i agregirati potencijal pojedinačnih malih skladišnih jedinica za pružanje usluge/proizvoda kojim se trguje na tržištu;
- 2) Ponuditi svoje usluge/proizvode različitim tržišnim sudionicima na organiziranim tržištima ili putem bilateralnih ugovora i
- 3) Nagraditi svakog sudionika agregacije, odnosno osigurati transparentnu i pravednu raspodjelu prihoda od usluga prodanih na tržištu.

Agregator objedinjuje fleksibilnost kupaca i pretvara je u usluge tržišta električne energije, na primjer za korištenje od strane OPS-a, ODS-a i/ili Strane odgovorne za uravnoteženje. Skup fleksibilnosti uključuje jedinice za pohranu i obnovljivu energiju s fleksibilnošću u proizvodnji i potražnji. Agregacija je neophodna kako bi se omogućilo tržišno sudjelovanje distribuiranih resursa. Potreba za agregatorom kao tržišnim igračem racionalizirana je činjenicom da mala i srednja poduzeća koja već sudjeluju na tržištu obično nisu u mogućnosti kreirati vlastite profitabilne poslovne modele u svrhu trgovanja svojom fleksibilnošću [38]. Agregator može ponuditi tu fleksibilnost kao uslugu kupcu ili drugom

igraču na tržištu. Njegov poslovni model temelji se na fleksibilnom portfelju vlastitih korisnika i mogućnosti njegove optimizacije za povećanje vlastite dobiti i dobiti svojih agregiranih korisnika. Uloga agregatora dobiva na značaju s povećanom integracijom varijabilnih energija, pa bi se i ona trebala razvijati prateći razvoj tržišta i istovremeno.

Agregaciju mogu obavljati dobavljači električne energije, kao i neovisni agregatori. Za tržišno natjecanje značajno je omogućiti objema vrstama aktera postojanje i natjecanje na tržištu. U svakom slučaju, uloge i odgovornosti agregatora trebaju biti jasno definirane.

#### e) Regulatorne i tržišne barijere

Puni potencijal tehnologija za pohranu energije i njihova troškovna učinkovitost mogu se postići pružanjem niza različitih usluga. Te se usluge ne odnose samo na uravnoteženje električne energije i sudjelovanje na tržištima električne energije dan unaprijed ili unutar dana, već i na druge takozvane neenergetske koristi koje su izvan uštede energije, poput integracije obnovljivih izvora energije i izbjegavanja emisija. Sustav spremnika energije također može pružiti usluge za rasterećenje prijenosne i distribucijske mreže i identificiran je kao ključna tehnološka komponenta koja može transformirati trenutnu strukturu i rad elektroenergetske mreže [36], [37], [38].

Višenamjenski rad tehnologije skladištenja uvijek je problematičan s regulatorne točke gledišta kad god rad pokriva dva glavna područja energetske sustava: konkurentsko područje uključujući spot i rezervna tržišta i regulirano područje mrežnog poslovanja [38]. Za distribuiranu pohranu postoje dodatne regulatorne prepreke u vezi s agregacijom.

Regulatorne i ekonomske barijere ograničavaju izvedivost skladišta i njegove implementacije. To zauzvrat ograničava primjene i izvore prihoda sustava za pohranu energije. Glavna prepreka je loše definiran status skladištenja energije kao proizvodnje koji ograničava njezinu upotrebu. Nadalje, skladištenje energije suočeno je s mnogo različitih regulatornih okvira u državama članicama EU-a, s tržišnom neučinkovitošću kao rezultatom ove fragmentacije. Ne postoji dosljednost među državama članicama o načinu na koji se skladištenje tretira u energetske sustavu [36]. Također, isključivo tržišno utemeljen sustav ne daje cjenovne signale za cijeli niz usluga skladištenja energije kao što su olakšice za prijenos i distribuciju, i trenutačno nije u stanju odrediti cijene svih energetske usluga [37].



Ovakva definicija skladištenja energije kao proizvodnje podrazumijeva nametanje dvostrukih tarifa za prijenos i distribuciju (za punjenje i pražnjenje), što smanjuje njegovu konkurentnost. Budući da sustav spremnika energije može povećati ili smanjiti zagušenje mreže, ovisno o dizajnu mreže i lokaciji pohrane u odnosu na proizvodnju i potražnju, te bi naknade za mrežu mogle biti opravdane u nekim okolnostima, ali je malo vjerojatno da će biti opravdane u dobro dizajniranom sustavu. U Ujedinjenom Kraljevstvu pružatelji usluga skladištenja povezani na razini distribucije moraju platiti dvostruku naknadu za korištenje distribucijske mreže, a skladišne jedinice s kapacitetom većim od 100 MW također moraju platiti naknadu za korištenje prijenosne mreže. Dvostruke tarife prijenosne/distribucijske mreže za skladištenje postoje u drugim zemljama EU kao što su Austrija, Belgija i Grčka, međutim brojne druge države članice ne nameću mrežne naknade za spremnike energije [36], [38]. Mrežne naknade trebale bi osigurati stabilnost i predvidljivost koja omogućuje ulaganja u dugoročnu imovinu, poput skladišnih objekata [37].

Još jedna regulatorna prepreka je korištenje pohranjivanja energije za optimizaciju u radu i planiranju prijenosnih i distribucijskih mreža [36], [38]. S tim u vezi, operatorima mreže trebalo bi omogućiti povrat troškova povezanih s uslugama koje su nabavili od operatora skladišta energije ako su one bile potrebne za učinkovito funkcioniranje sustava. Nadalje, operatorima skladišta energije trebalo bi dopustiti pružanje višestrukih usluga operatorima sustava, npr. za upravljanje zagušenjem ODS-a ili uravnoteženje OPS-a [37].

Nepodupiranje postavljanja sustava spremnika energije posebnim subvencijama također predstavlja prepreku. Na primjer, na tržištima pomoćnih usluga u Ujedinjenom Kraljevstvu i jačanje mreže i fleksibilna proizvodnja trenutno su jeftiniji od skladištenja za većinu zahtjeva sustava i tržišta električne energije [37]. Treba napomenuti da su proizvođači električne energije s niskim udjelom ugljika zahtijevali i dobili subvencije kako bi se natjecali. Isti se izazovi suočavaju i sa skladištenjem energije.

#### f) Tržišne perspektive

Operatorima skladišta energije također bi trebalo dopustiti da sudjeluju u drugim komercijalnim aktivnostima i da budu plaćeni za svoj doprinos dekarbonizaciji drugih gospodarskih sektora. Srednjoročna i dugoročna rješenja za skladištenje, potrebna za fleksibilnost u energetskom sustavu s niskim udjelom ugljika, mogla bi se bolje uključiti u tržišta s novim standardiziranim tržišnim proizvodima [36], [37].

Prijedlozi za ublažavanje prepreka u vezi s distribuiranom pohranom identificirani su u [40]. Ovi prijedlozi uključuju poticanje ODS-ova i izgradnju okvira koji će im omogućiti korištenje usluga iz distribuiranih izvora energije kao što su odgovor na potražnju i skladištenje energije, na temelju tržišnih postupaka, kako bi učinkovito upravljali svojim mrežama i izbjegli skupa proširenja mreže. Na strani potražnje, distribuirano skladištenje energije moglo bi stabilizirati lokalni sustav, kompenzirajući varijabilnost OIE i potencijalno radeći na temelju cjenovnih signala. Ova raspodijeljena sredstva za pohranu mogu se koristiti na tržištima, uključujući putem agregatora. Distribuirana pohrana iza mjerača mogla bi komunicirati s tržištima kroz odgovor na potražnju na maloprodajnim tržištima zajedno s drugim mjerama.

Također, skladištenje treba smatrati relevantnom opcijom u planiranju mreže, kako na razini prijenosa tako i na razini distribucije [37], [38].

U [39] navedeni su sljedeći principi koji podržavaju razvoj tržišta za pohranu energije:

- Skladištu energije treba dopustiti da u potpunosti sudjeluje na tržištu električne energije;
- Skladištenje energije treba sudjelovati i biti nagrađeno za usluge koje se pružaju na ravnopravnoj osnovi pružateljima usluga fleksibilnosti (reakcija na potražnju, fleksibilna proizvodnja i prilagodba prijenosne/distribucijske infrastrukture);
- Skladištenje energije kao pokretač veće količine OIE moglo bi doprinijeti energetske sigurnosti i dekarbonizaciji elektroenergetskog sustava ili drugih gospodarskih sektora;
- Regulatornim okvirom treba omogućiti isplativo korištenje decentralizirane pohrane i njezinu integraciju u sustav.

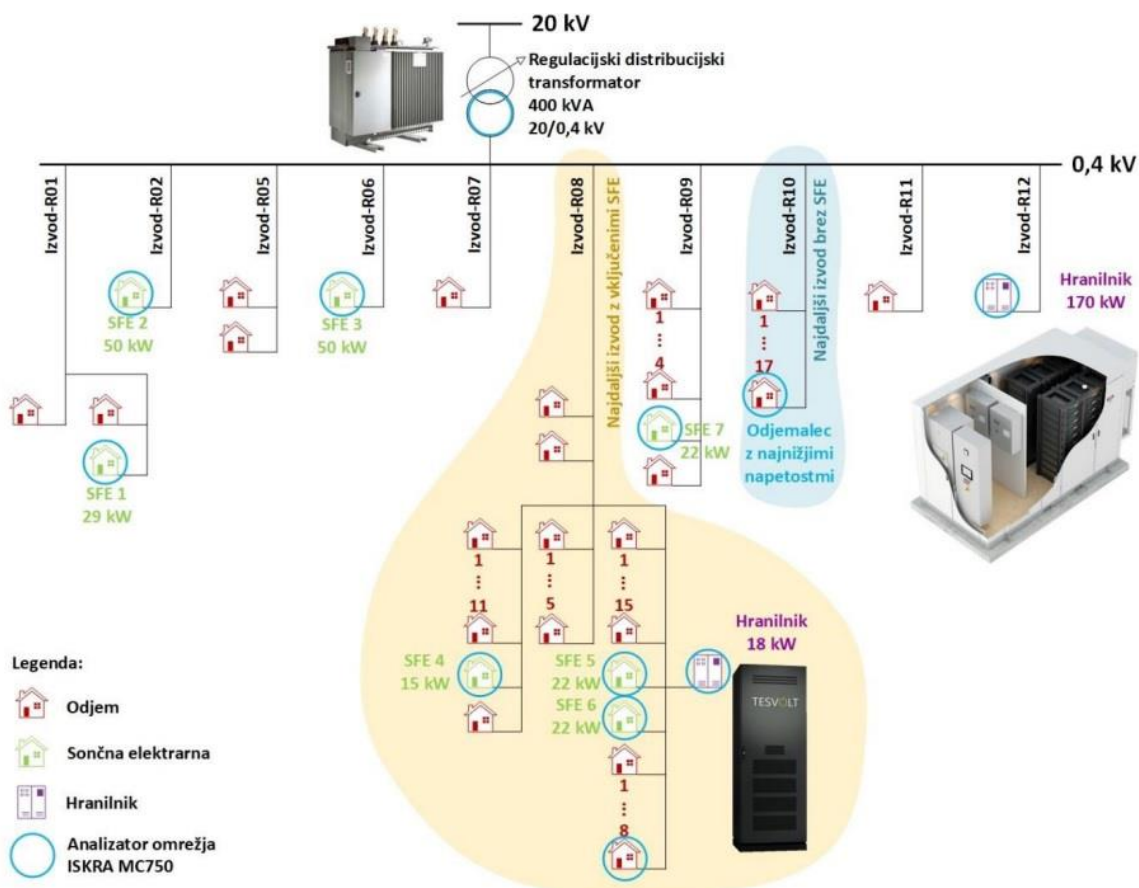
Novi zakonodavni prijedlozi za dizajn tržišta u kontekstu paketa Čista energija za sve Europljane podržavaju troškovno učinkovitu upotrebu rješenja za pohranu energije, pokrivajući aspekte energetske tržišta, regulatorni okvir, planiranje sustava i specifične tehničke aspekte. Cilj regulatornog okvira trebao bi biti stvaranje jednakih uvjeta za prekogranično trgovanje skladišta električne energije. U [37] predložena su sljedeća načela:

- Regulatorni okvir mora osigurati jasna pravila i odgovornosti u pogledu tehničkih modaliteta i financijskih uvjeta skladištenja energije;
- Mora se pozabaviti preprekama koje sprječavaju integraciju skladišta na tržišta. Trebao bi jamčiti jednake uvjete u odnosu na druge izvore proizvodnje, iskoristiti svoju fleksibilnost u opskrbi mreže, stabilizirati kvalitetu i opskrbu za proizvodnju iz OIE. To će zahtijevati nove usluge i poslovne prilike povezane s uvođenjem rješenja za pohranu električne energije;
- Okvir bi trebao biti tehnološki neutralan, osiguravajući pošteno natjecanje između različitih tehnoloških rješenja (ne birajući pobjednika);
- Treba osigurati pravedan i jednak pristup skladištu električne energije neovisno o veličini i lokaciji skladišta u opskrbnom lancu;
- Trebao bi osigurati srednjoročnu predvidljivost u investicijskim i financijskim uvjetima (porezi, naknade itd.), omogućavajući povoljne uvjete za sve vrste skladištenja, posebno mala skladišta (na razini kuće i okruga);
- Moglo bi pomoći u poboljšanju poslovnog/ekonomskog modela za skladištenje energije. Glavna područja u kojima su potrebne intervencije odnose se na pomoćne usluge i mrežnu tarifu. Na primjer, mrežna tarifa trebala bi se temeljiti na načelu uzročnosti troškova: ako sustav za pohranu energije sustavno koristi mrežu tijekom razdoblja izvan vršne potrošnje, ne bi trebao uzrokovati ulaganja u mrežu. Stoga bi uvođenje vremenske komponente u mrežne tarife moglo uzeti u obzir dio ulaganja u mrežu zbog skladištenja energije.

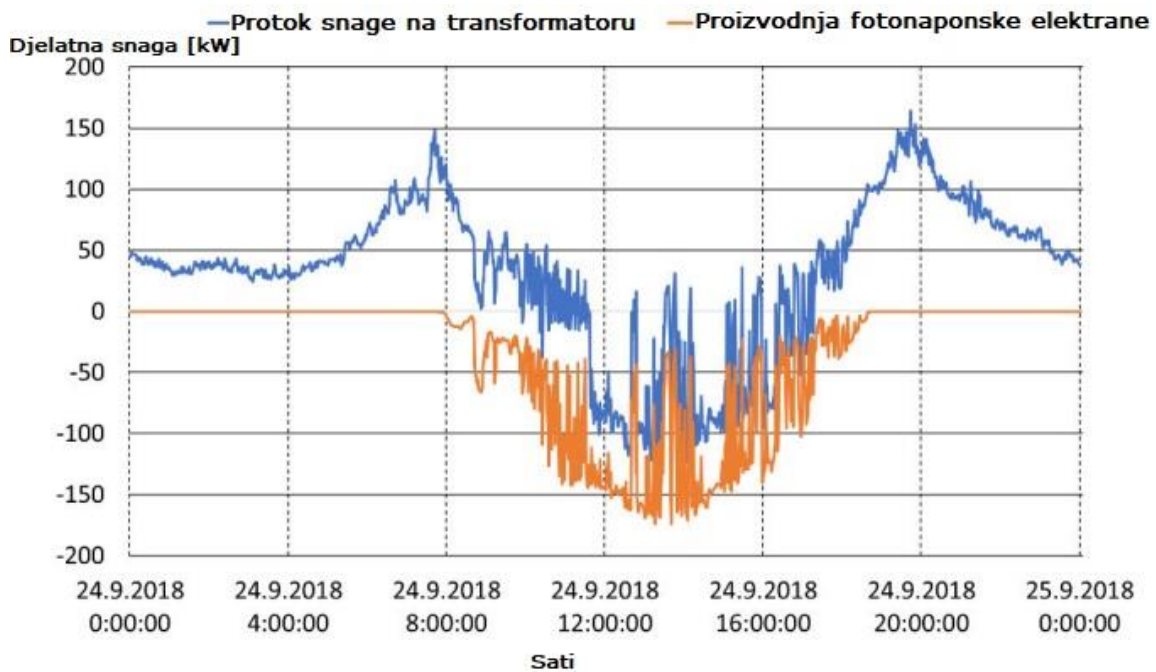
## 8. RAZRADA PRIMJERA UGRADNJE SPREMNIKA ELEKTRIČNE ENERGIJE

### 8.1 Ugradnja spremnika električne energije u NN mreže s velikim udjelom distribuiranih izvora

Položaj i orijentacija objekata u naselju Suha (Slovenija) zadovoljavaju uvjete za postavljanje fotonaponske elektrane. U vrijeme velikih poticaja za izgradnju distribuiranih resursa, uglavnom fotonaponskih elektrana, sedam vlasnika se odlučilo za izgradnju, ukupne instalirane snage 210 kW. Naselje se napaja preko kableske trafostanice u koju je ugrađen regulacijski razvodni transformator snage 400 kVA. Prosječna vršna potrošnja u naselju je 150 kW i javlja se tijekom jutarnjeg i večernjeg vršnog opterećenja. Vrijeme vršne potrošnje se ne podudara s vršnom proizvodnjom, tako da su se prije instaliranja spremnika električne energije javljali obrnuti tokovi snage svaki sunčani dan (slika 35). Potrošači se napajaju iz trafostanice preko devet NN izlaza, preko desetog je spojen ABB spremnik električne energije. U suradnji sa slovenskom tvrtkom N•GEN na završetak NNO-a priključen je i mali spremnik proizvođača TESVOLT (Slika 34).

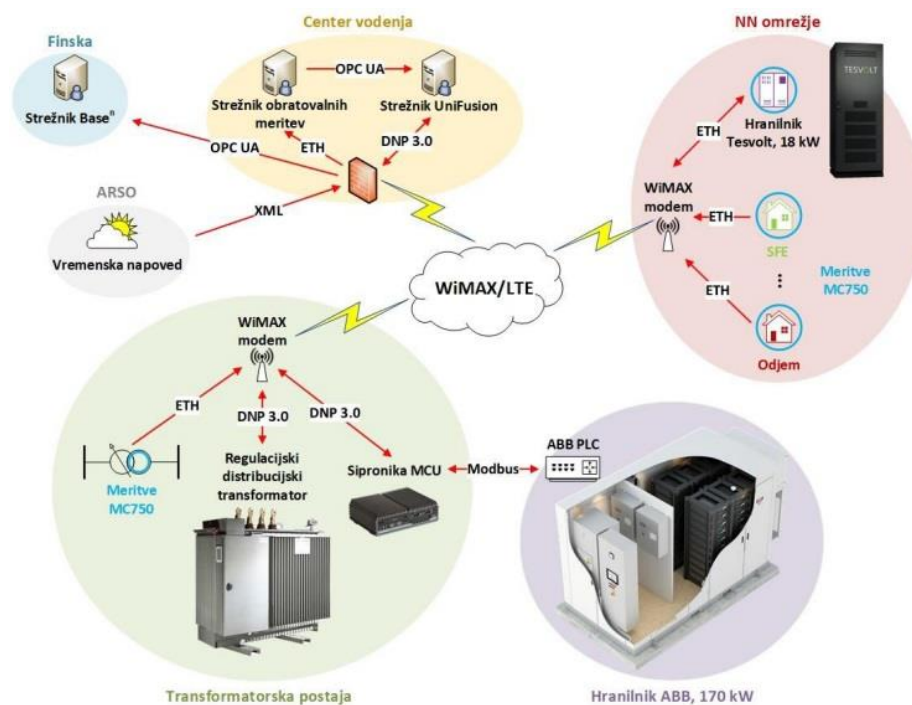


Slika 34. Jednopolna shema NNO-a napajanog preko TP Suha [45]



*Slika 35. Dnevni protok snage na transformatoru (jutarnji i večernji vršni) i proizvodnja fotonaponske elektrane [45]*

Slika 36 prikazuje komunikacijsku shemu temeljenu na WiMAX-ovoj vlastitoj komunikacijskoj infrastrukturi koja će se u budućnosti zamijeniti privatnom LTE mrežom. Za potrebe preliminarnih analiza, ulazni podaci regulatora algoritma, a za rad spremnika električne energije nalaze se na dvanaest lokacija s najnepovoljnijim naponskim uvjetima ugrađeni mrežni analizatori Iskra MC750 (plavi krugovi na slici 34). Mjerenja svih parametara u intervalu od 1 minute putem povezanih WiMAX modema prenose se u bazu operativnog mjernog poslužitelja. Za kontrolu i upravljanje trafostanice, regulacijskim distribucijskim transformatorom i spremnikom električne energije koristi se sustav baziran na SCADA-i [45]. Algoritam upravljanja ABB spremnikom električne energije temelji se na vremenskoj prognozi koju dobiva s adrese Agencije Republike Slovenije za okoliš (ARSO), odabire odgovarajuću krivulju dnevnog protoka snage preko transformatora i izračunava granice punjenja i pražnjenja spremnika. Za prijenos podataka i obavljanje funkcija daljinskog nadzora i upravljanja koristi se WiMAX mreža.



Slika 36. Komunikacijska shema [45]

Spremnik za potrebe projekta je razvio i proizveo ABB i ima sljedeće karakteristike:

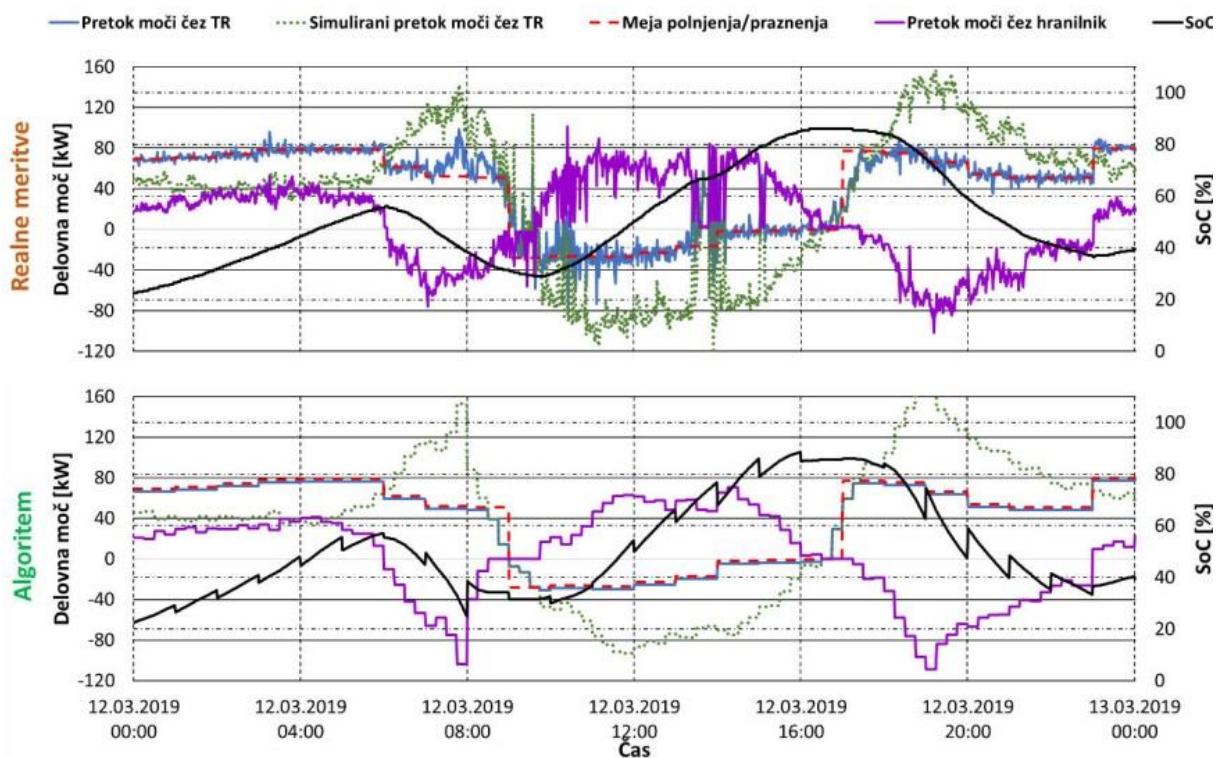
Tablica 8.1 Karakteristike ABB spremnika električne energije

Instalirana snaga	170 kVA @ 400Vac
Faktor snage	100% P (kW) ali Q (kVAr), induktivno ali kapacitivno
Kapacitet	450 kWh
Korisnost	87%
Broj ugrađenih baterijskih modula	84

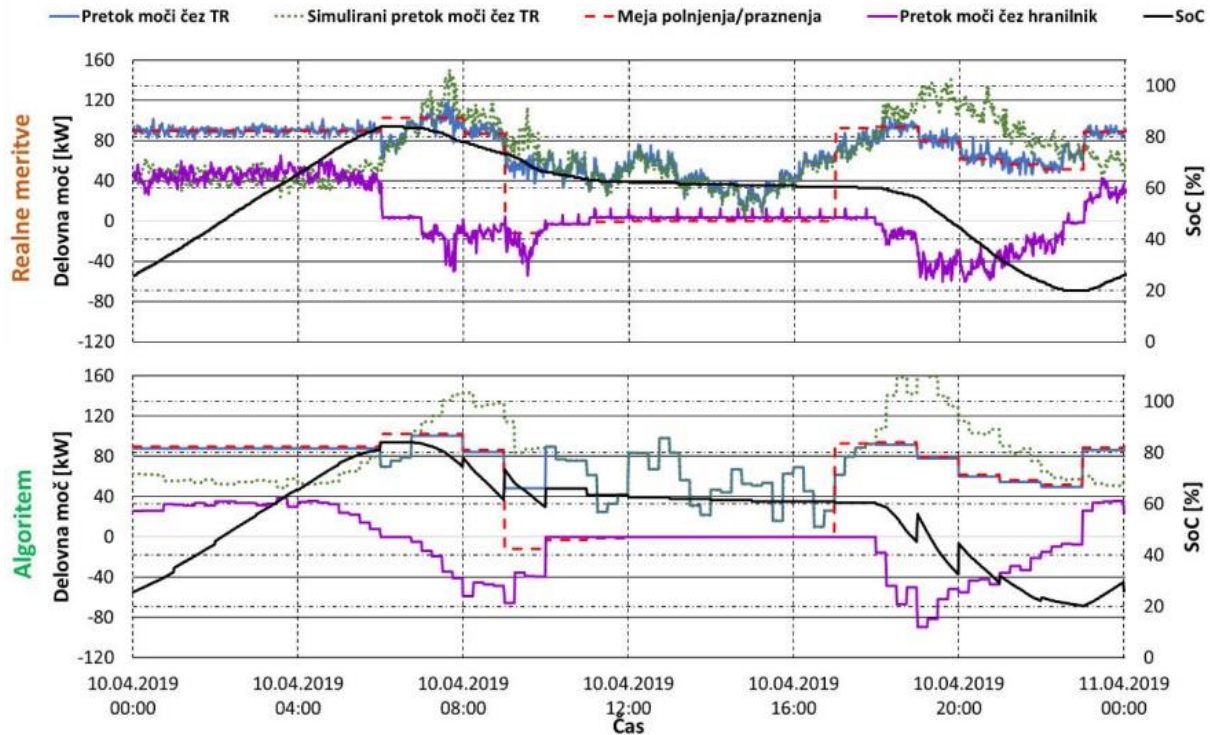
Prema definicijama projekta i zahtjevima distribucijskog operatora, spremnik električne energije ima sljedeće funkcije:

- smanjenje vršnog opterećenja,
- kompenzacija jalove snage,
- harmonijska kompenzacija,
- osiguranje tercijarne pričuve i
- simulacija otočnog rada

Za distribucijskog opratora je najvažnija funkcija smanjenja vršnog opterećenja, čija je svrha smanjiti protok snage kroz transformator, što je uzrokovano lokalnom potrošnjom s jedne strane i proizvodnjom fotonaponske elektrane s druge strane (Slika 35). Algoritam smanjenja vršnog opterećenja je razvijen u okviru projekta. Za samu izvedbu algoritma je vrlo važna vremenska prognoza, točnije prognoza sunčevog zračenja u  $W/m^2$  na lokaciji naselja Suha. Iz arhive mjerenja protoka snage preko transformatora i sunčevog zračenja za posljednje tri godine napravljeni su različiti tipični profili toka snage kroz transformator. Algoritam iz dobivene prognoze na temelju izračuna sunčevog zračenja daje procijenjenu generiranu energiju iz fotonaponske elektrane, odabire tip profila protoka snage preko transformatora i uzimajući u obzir uvjet punjenja (SoC) određuje granice punjenja i pražnjenja spremnika električne energije (Slika 37 i 38 - donji grafikon). Na slikama je vidljivo da se stvarna mjerenja (Slika 37 i 38 - gornji grafikon) vrlo dobro slažu s izračunom algoritma.



Slika 37. Rad algoritma za smanjenje vršnog opterećenja - sunčani dan [45]



Slika 38. Rad algoritma za smanjenje vršnog opterećenja - oblačan dan [45]

### Kompenzacija jalove snage

Spremnik električne energije može pružiti 100% induktivno ili kapacitivno punjenje/praznjenje, koje se koristi za kompenzacija jalove snage transformatora. Postavljanjem maksimalne i minimalne dopuštene jalove snage transformatora, algoritam na temelju mjerenja u stvarnom vremenu izračunava optimalne zadane vrijednosti skladištenja i šalje ih u upravljački sustav spremnika električne energije.

### Kompenzacija harmonika

Sljedeća funkcionalnost je harmonijska kompenzacija. Na spremniku električne energije je moguće postaviti kompenzaciju od 20 strujnih i 20 naponski harmonika. Na temelju mjerenja harmonika na lokaciji transformatora postavlja se gornja granica struje ili napona iznad kojih spremnik električne energije kompenzira harmonike.

### Tercijalna pričuva

Spremnik električne energije spreman je za pružanje usluga sustava dizajniranih da osiguraju siguran i kontinuirani rad elektroenergetskog sustava. U slučaju tercijarne rezerve – uspostavljanje statusa normalne pričuve u regulaciji frekvencije, može osigurati određeni dio pričuve.

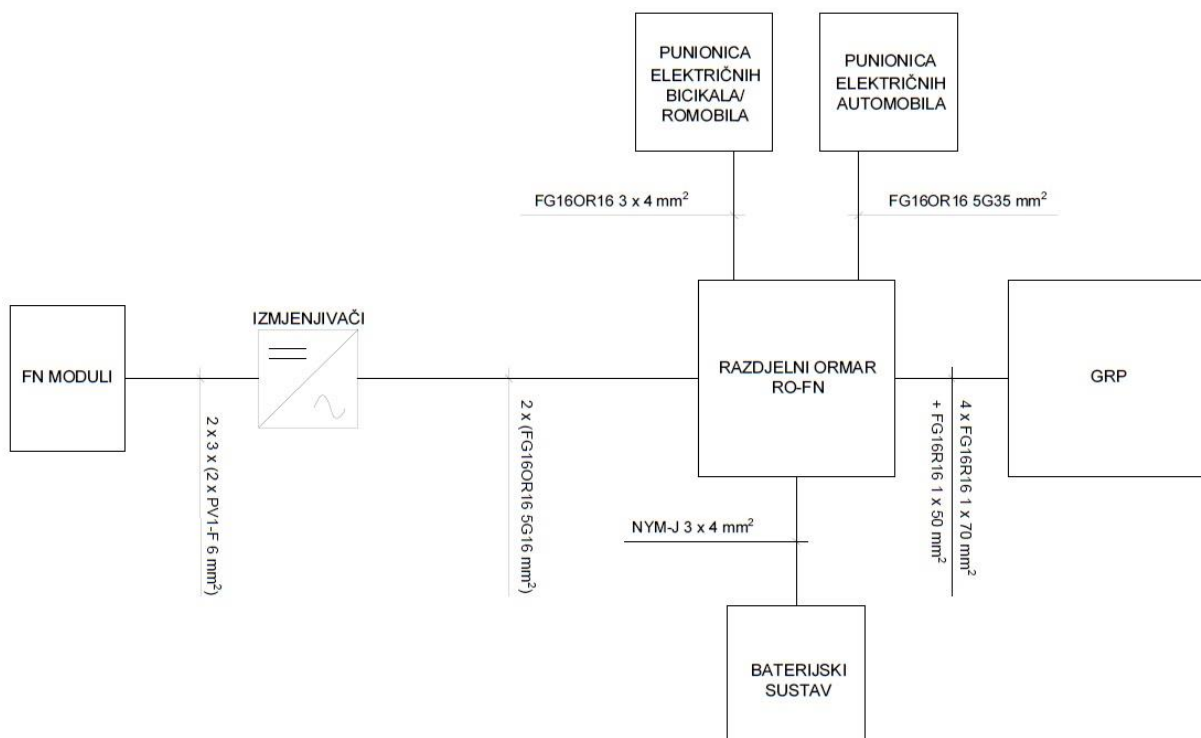


## Simulacija otočnog rada

S obzirom na veliku proizvodnju energije iz fotonaponske elektrane, razvijen je algoritam za simulaciju otočnog rada. Sustav nije pripremljen za otočni rad, ali ima razvijen algoritam za tzv. "Zero Load Provision". Algoritam stalno prati protok snage kroz transformator i kontrolira spremnik električne energije u smjeru nultog protoka snage kroz transformator. Algoritam dobro obavlja zadatak i tijekom testiranja protok kroz transformator bio je unutar  $\pm 10$  kW.

## 8.2 Ugradnja spremnika električne energije u NN potrošačko postrojenje

Tehnički opis projekta je izgradnja sustava kojim će se preko solarnim panelima proizvoditi električna energija te primarno opskrbljivati punionica električnih vozila (PEV) i potrošači poslovnog objekta, dok će se eventualni višak proizvedene električne energije pohranjivati u baterijama odnosno predavati u EE mrežu. U slučaju nedovoljne proizvodnje električne energije solarnih panela te nedovoljno pohranjene energije u bateriji, ista će se preuzimati iz EE mreže.



Slika 39. Blok shema fotonaponskog sustava sa spremnikom električne energije

Uvjeti priključenja novonastalog objekta dani su tehničkim rješenjem elektrodistributera – Elektroenergetskom suglasnosti. Sustav se priključuje na postojeću niskonaponsku elektroenergetsku mrežu poslovnog objekta, na sekundarnu instalaciju postojećeg kupca unutar postojeće glavne razvodne ploče (dalje: GRP). Priključak građevine se izvodi tipiziranim podzemnim kabelom odgovarajućeg presjeka, od glavne razvodne ploče objekta (GRP) do mjesta spoja na predmetnu građevinu (RO-FN).

Način rada sustava, paralelno s niskonaponskom distribucijskom mrežom. Priključna snaga sustava u smjeru proizvodnje iznosi 40 kW. Priključna snaga Sustava u smjeru potrošnje iznosi 50 kW te s obzirom na postojeću priključnu snagu objekta, koja iznosi 150,39 kW, nema potreba za dodatnim zakupom snage. U zajednički kabelski kanal, od GRP do RO-FN, se s priključnim kabelom polaže i zaštitni uzemljivač koji se spaja na sabirnicu izjednačenja potencijala (IP) GRP-a i RO-FN-a.

## 9. ZAKLJUČAK

Kako bi se postigao cilj EU-a za potpunu energetska neovisnost, zemlje EU-a naporno rade kako bi EU postala globalni lider u obnovljivoj energiji. Prema različitim predviđenim scenarijima, opći trend pokazuje povećanje potražnje i integracije OIE, zajedno sa smanjenom proizvodnjom nuklearne energije i ugljena. U regiji jugoistočne Europe, postojeća integracija OIE još uvijek su manji u usporedbi sa zemljama s vodećim elektranama OIE u Europi, kao što su UK i Njemačka. Međutim, u tim se regijama može predvidjeti ambiciozno širenje, uzimajući u obzir politiku i pogodne uvjete terena za iskorištavanje obnovljivih izvora energije. Od 2017. povećanje obnovljivih izvora energije, npr. vjetara i solarnih panela, veći je od onog koji se odnosi na hidroenergiju i biomasu. Zbog toga sustavi za proizvodnju električne energije moraju proći kroz značajne strukturne promjene kako bi se osigurala kontinuirana pouzdanost i stabilnost.

Integracija distribuiranih izvora ima niz prednosti, poput smanjenja linijskih gubitaka, poboljšane fleksibilnosti mreže, održivost proizvodnje energije i minimiziranje ulaganja u postojeću mrežu tijekom proširenja kapaciteta. Stabilnost elektroenergetskih mreža ostaje najvažniji čimbenik u integraciji, posebno obnovljivih distribuiranih izvora energije.

Tehnologije skladištenja energije smatraju se prihvatljivim i nužnim rješenjem koje jamči glatke prijelaze s energetska mreža s konvencionalnim strukturama na deregulirane sustave s integriranim velikim brojem obnovljivih i distribuiranih izvora. Vrijednost sustava za pohranu energije dobro je shvaćena iz tehničke perspektive. U ovom radu, odgovarajuća kategorizacija je ilustrirana s obzirom na različite snage i energetske ocjene tehnologija za pohranu energije. Tehnologije pohrane u različitim kategorijama prikladne su za pružanje specifičnih usluga mrežama, u rasponu od dinamičke podrške do upravljanja energijom. Potrebno je angažirati portfelj različitih tehnologija za pohranu kako bi se pružile različite usluge, što je od koristi i za mreže i za vlasnike pohrane. Usluge koje pružaju spremnici električne energije su smanjenje vršnog opterećenja, kompenzacija jalove snage, harmonijska kompenzacija, osiguranje tercijarne pričuve. Potrebna je odgovarajuća agregacija, tako da mali skladišni objekti na distribucijskim razinama mogu pomoći u održavanju stabilnosti i pružiti fleksibilnost na vlastitom teritoriju, te ponuditi podršku dinamici i prijenos energije. Skladišni objekti biti će pušteni u rad u blizini velikih distribuiranih obnovljivih elektrana čime se rješavaju pitanja integracije OIE.

## LITERATURA

- [1] Manz D, Walling R, Miller N, LaRose B, D'Aquila R, Daryanian B. The grid of the future: Ten trends that will shape the grid over the next decade.
- [2] Strbac G, Aunedi M, Pudjianto D, Djapic P, Teng F, Sturt A, et al. Strategic assessment of the role and value of energy storage systems in the UK low carbon energy future. Energy Futures Lab, Imperial College London.
- [3] Gray D, editor. Smart grid forum - Smart grid vision and routemap. 3 Whitehall Place, London SW1A 2AW, England: Department of Energy & Climate Change, Ofgem - Office of Gas and Electricity Markets, Department of Energy & Climate Change; 2014.
- [4] Farhangi H. The path of the smart grid. IEEE Power Energy Mag 2010.
- [5] Carley, S. Distributed generation: An empirical analysis of primary motivators. Energy Policy 2009.
- [6] Allan, G.; Eromenko, I.; Gilmartin, M.; Kockar, I.; McGregor, P. The economics of distributed energy generation 2015.
- [7] „Distributed generation economy“, s interneta, <https://www.gnpw.com.br/en/economy/investments-in-distributed-generation-dg-in-brazil/03.12.22>
- [8] Ackermann, T.; Anderson, G.; Söder, L. Distributed generation: A definition. Elect. Power Sys. Res. 2001.
- [9] Dondi, P.; Bayoumi, D.; Haederli, C.; Julian, D.; Suter, M. Network integration of distributed power generation. J. Power Sources 2002.
- [10] Chambers, A. Distributed Generation: A Non-Technical Guide; Pennwell: Tulsa, OK, USA, 2001.
- [11] Willis, H.L.; Scott, W.G. Distributed Power Generation; Marcel Dekker: New York, NY, USA, 2000.
- [12] Energies; Distributed Generation and Renewable Energy Integration into the Grid: Prerequisites, Push Factors, Practical Options, Issues and Merits, 2021.
- [13] Ackermann, T.; Anderson, G.; Söder, L. Distributed generation: A definition. Elect. Power Sys. Res. 2001.
- [14] Khetrapal, P. Distributed generation: A critical review of technologies, grid integration issues, growth drivers and potential benefits. Inter. J. Renew. Energy Dev. 2020.
- [15] Adil, A.M.; Ko, Y. Socio-technical evolution of decentralized energy systems: A critical review and implications for urban planning and policy. Renew. Sustain. Energy Rev. 2016.
- [16] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21). Renewables 2020 Global Status Report; REN21 Secretariat: Paris, France, 2020.

- [17] „Renewable energy capacity 2021“ , s interneta, <https://www.statista.com/statistics/267233/renewable-energy-capacity-worldwide-by-country/> 15.12.22
- [18] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21). Renewables 2020 Global Status Report; REN21 Secretariat: Paris, France, 2020.
- [19] Bayer, B.; Marian, A. Innovative measures for integrating renewable energy in the German medium-voltage grids. Energy Rep. 2020.
- [20] Zahedi, A. A review of drivers, benefits, and challenges in integrating renewable energy sources into electricity grid. Renew. Sustain. Energy Rev. 2011.
- [21] Markiewicz, H.; Klajn, A. Voltage Disturbances: Standard EN 50160 Voltage Characteristics in Public Distribution Systems; European Copper Institute: Brussels, Belgium, 2011.
- [22] Roy, N.; Pota, H.R. Current status and issues of concern for the integration of distributed generation into electricity networks. IEEE Sys. J. 2015.
- [23] Bayer, B.; Matschoss, P.; Thomas, H.; Marian, A. The German experience with integrating photovoltaic systems into the low-voltage grids. Renew. Energy 2018.
- [24] Wang, Q.; Zhang, C.; Ding, Y.; Xydis, G.; Wang, J.; Østergaard, J. Review of real time electricity markets for integrating Distributed Energy Resources and Demand Response. Appl. Energy 2015.
- [25] Muntathir, A.T.; Chokri, A.B. Optimal PV penetration for power losses subject to transient stability and harmonics. Proc. Comput.Sci. 2020.
- [26] Khetrapal, P. Distributed generation: A critical review of technologies, grid integration issues, growth drivers and potential benefits. Inter. J. Renew. Energy Dev. 2020.
- [27] Conti, S.; Raiti, S.; Tina, G. Small scale generation effect on embedded on voltage profile: An analytical Method. IEEE Proc. Gener. Transm. Distrib. 2003.
- [28] Khalesi, N.; Rezaei, N.; Haghifam, M.R. DG allocation with application of dynamic programming for loss reduction and reliability improvement. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 2011.
- [29] Zaheeruddin, M.M. Renewable energy management through microgrid central controller design: An approach to integrate solar, wind and biomass with battery. Energy Rep. 2015.
- [30] British Standards Institution (BSI). BS EN61400-21 Wind Turbines: Measurement and Assessment of Power Quality Characteristics of Grid Connected Wind Turbines; BSI: London, UK, 2009.
- [31] Belcher, B.; Petry, B.J.; Davis, T.; Hatipoglu, K. The effects of major solar integration on a 21-Bus system: Technology review and PSAT simulations. In Proceedings of the SoutheastCon 2017, Concord, NC, USA, 30 March–2 April 2017.
- [32] Archana, R.; Subramaniya, S.A. A perspective analysis for the impact of PV and wind hybrid distributed generation using eTAP. Int. J. Adv. Res. Electr. Electron. Instrum. Eng. 2018.

- [33] Brearley, J.B.; Raja, P.R. A review on issues and approaches for microgrid protection. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017.
- [34] Ishchenko, D.; Oudalov, A.; Stoupis, J. Protection coordination in active distribution grids with IEC 61850. In *Proceedings of the IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, Orlando, FL, USA, 7–10 May 2012.
- [35] Alejandra, T.; Norberto, M.; Lucas, G.; José, F.R.; Fredy, J.F. Optimal capacity sizing for the integration of a battery and photovoltaic microgrid to supply auxiliary services in substations under a contingency. *Energies* 2020.
- [36] Denholm, Paul, Erik Ela, Brendan Kirby, and Michael Milligan. Role of energy storage with renewable electricity generation. No. NREL/TP-6A2-47187. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2010.
- [37] [13] IEA, “Energy Technology Perspectives,” IEA, 2014.
- [38] B. Energiespeicher, „Effizienzleitfaden für PV-Speichersysteme,“ 2017.
- [39] I. R. E. Agency, “Battery storage for renewables,” 2015.
- [40] C. Gandolfi et al., “Study of a Universal Power SMES Compensator for LV Distribution Grid,” 2018 110th AEIT Int. Annu. Conf. AEIT 2018, pp. 1–6, 2018.
- [41] Foley A, Lobera ID. Impacts of compressed air energy storage plant on an electricity market with a large renewable energy portfolio. *Energy* 2013;57:85–94.
- [42] Devlin J, Li K, Higgins P, Foley A. System flexibility provision using short term grid scale storage. *IET Gener, Transm Distrib* 2016;10(3):697–703.
- [43] Devlin J, Li K, Higgins P, Foley A. The impact of short term storage on power system operation. In: 2015 Proceedings of the 12th International Conference on the European Energy Market (EEM), 2015, pp. 1–5.
- [44] Evans A, Strezov V, Evans TJ. Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration. *Renew Sustain Energy Rev* 2012;16(6):4141–7.
- [45] <https://horizon2020-story.eu/> , A vision of our future energy system, 20.04.2023.

## SAŽETAK RADA I KLJUČNE RIJEČI

Integracija distribuiranih izvora ima niz prednosti, poput smanjenja linijskih gubitaka, poboljšane fleksibilnosti mreže, održivost proizvodnje energije i minimiziranje ulaganja u postojeću mrežu tijekom proširenja kapaciteta. Stabilnost elektroenergetskih mreža ostaje najvažniji čimbenik u integraciji, posebno obnovljivih distribuiranih izvora energije.

Tehnologije skladištenja energije smatraju se prihvatljivim i nužnim rješenjem koje jamči glatke prijelaze s energetske mreže s konvencionalnim strukturama na deregulirane sustave s integriranim velikim brojem obnovljivih i distribuiranih izvora. Vrijednost sustava za pohranu energije dobro je shvaćena iz tehničke perspektive. U ovom radu, odgovarajuća kategorizacija je ilustrirana s obzirom na različite snage i energetske ocjene tehnologija za pohranu energije. Tehnologije pohrane u različitim kategorijama prikladne su za pružanje specifičnih usluga mrežama, u rasponu od dinamičke podrške do upravljanja energijom. Potrebno je angažirati portfelj različitih tehnologija za pohranu kako bi se pružile različite usluge, što je od koristi i za mreže i za vlasnike pohrane. Usluge koje pružaju spremnici električne energije su smanjenje vršnog opterećenja, kompenzacija jalove snage, harmonijska kompenzacija, osiguranje tercijarne pričuve. Potrebna je odgovarajuća integracija, tako da mali skladišni objekti na distribucijskim razinama mogu pomoći u održavanju stabilnosti i pružiti fleksibilnost na vlastitom teritoriju, te ponuditi podršku dinamici i prijenos energije. Skladišni objekti biti će pušteni u rad u blizini velikih distribuiranih obnovljivih elektrana čime se rješavaju pitanja integracije OIE.

Ključne riječi: obnovljiva energija, strukturne promjene, pohrana energije, spremnici energije, distribuirana generacija, integracija, tehnologije pohrane energije, spremnici električne energije.

## **ABSTRACT AND KEY WORDS**

The integration of distributed sources has a number of advantages, such as reduction of line losses, improved network flexibility, sustainability of energy production and minimization of investment in the existing network during capacity expansion. The stability of power grids remains the most important factor in the integration, especially of renewable distributed energy sources.

Energy storage technologies are considered an acceptable and necessary solution that guarantees smooth transitions from energy networks with conventional structures to deregulated systems with an integrated large number of renewable and distributed sources. The value of energy storage systems is well understood from a technical perspective. In this paper, the appropriate categorization is illustrated with respect to different power and energy ratings of energy storage technologies. Storage technologies in different categories are suitable for providing specific services to networks, ranging from dynamic support to energy management. A portfolio of different storage technologies needs to be deployed to provide different services, which benefits both networks and storage owners. The services provided by electricity storage tanks are peak load reduction, reactive power compensation, harmonic compensation, and provision of tertiary reserve. Adequate aggregation is required, so that small storage facilities at the distribution levels can help maintain stability and provide flexibility in their own territory, and offer dynamic support and energy transfer. The storage facilities will be put into operation near large distributed renewable power plants, thus solving the issues of renewable energy integration.

Key words: renewable energy, structural changes, energy storage, energy storage devices, distributed generation, integration, energy storage technologies.



## **PRILOG**

"PROJEKT FOTONAPONSKOG SUSTAVA S POHRANOM ELEKTRIČNE ENERGIJE I PUNIONICA ZA ELEKTRIČNE AUTOMOBILE I BICIKLE"

### **1. Tehnički opis projekta**

Tehnički opis projekta je izgradnja sustava kojim će se preko solarnim panelima proizvoditi električna energija te primarno opskrbljivati punionica električnih vozila (PEV) i potrošači poslovnog objekta, dok će se eventualni višak proizvedene električne energije pohranjivati u baterijama odnosno predavati u EE mrežu. U slučaju nedovoljne proizvodnje električne energije solarnih panela te nedovoljno pohranjene energije u bateriji, ista će se preuzimati iz EE mreže.

#### **OSNOVNI TEHNIČKI PODACI:**

Vršna snaga: 40 kW

Način pogona: paralelno s distribucijskom mrežom

### **2. Priključak sustava na EE mrežu**

Uvjeti priključenja novonastalog objekta dani su tehničkim rješenjem elektrodistributera –Elektroenergetskom suglasnosti.

Sustav se priključuje na postojeću niskonaponsku elektroenergetsku mrežu poslovnog objekta, na sekundarnu instalaciju postojećeg kupca unutar postojeće glavne razvodne ploče (dalje: GRP).

Priključak građevine se izvodi tipiziranim podzemnim kabelom odgovarajućeg presjeka, od glavne razvodne ploče objekta (GRP) do mjesta spoja na predmetnu građevinu (RO-FN).

Način rada sustava, paralelno s niskonaponskom distribucijskom mrežom.

Priključna snaga sustava u smjeru proizvodnje iznosi 40 kW. Priključna snaga sustava u smjeru potrošnje iznosi 50 kW te s obzirom na postojeću priključnu snagu objekta, koja iznosi 150,39 kW, nema potreba za dodatnim zakupom snage.

U zajednički kabelski kanal, od GRP do RO-FN, se s priključnim kabelom polaže i zaštitni uzemljivač koji se spaja na sabirnicu izjednačenja potencijala (IP) GRP-a i RO-FN-a.

Obračunsko mjerno mjesto mora biti opremljeno dvosmjernim brojiлом budući da Investitor ima status kupca s vlastitom proizvodnjom.

## 2.1 Priključak na NN instalaciju i mjerenje potrošnje električne energije

Napajanje električnom energijom se izvodi podzemno, postojećim energetskim kanalom, tipiziranim NN kabelom, spojem na novopredviđeni razvodni ormar (RO-FN).

Priključak od novopredviđenog RO-FN do novopredviđene punionice se izvodi kabelom tip kao FG16OR16 5 x 35 mm<sup>2</sup> ili jednakovrijednim proizvodom, koji se cijelom dužinom trase provlači kroz korugiranu plastičnu savitljivu cijev tip kao PEHD 63. Na mjestu novopredviđene punionice izrađuje se betonski temelj sa sidrom koje nosi punionicu i omogućava dovod kabela. Kroz instalacijsku cijev, koja se ugrađuje u temelj punionice, provlači se elektroenergetski i telekomunikacijski kabel. Pri polaganju kabela, obratiti pozornost na opremu unutar punionice. Predviđeno je priključenje s kabelom FG16OR16 5G35 mm<sup>2</sup>. Priklučenje kabela izvesti prema uputama proizvođača opreme. Snaga napajanja ovisi o snazi punjenja svake utičnice (ovisno o konfiguraciji punionice). Konfiguracija novopredviđene punionice zahtijeva snagu napajanja navedenu u nastavku.

### **44 kW:**

2 x trofazna utičnica s maksimalnom strujom od 32 A po fazi. Snaga napajanja punionice mora biti na odgovarajući način dimenzionirana za istovremeno punjenje dva automobila.

Kod spoja na EE mrežu, moraju biti ispunjeni sljedeći zahtjevi:

- osigurati selektivnost zaštitne funkcije
- nadstrujna zaštita mora biti za najmanje jedan razred iznad one koja se upotrebljava na mjestu spajanja punionice na elektroenergetsku mrežu
- zaštitna sklopka na diferencijalnu struju (RCD) koja se upotrebljava u punionici za punjenje radi na niskom naponu ( $\Delta I$  iznosi 30 mA i bez kašnjenja), selektivnost zaštite na razini objekta postiže se većim kašnjenjem ili većim diferencijalom struje

- u punionicu voditi pet vodiča, tri fazna, neutralni i zaštitni vodič (kad se punionica priključuje na postojeću elektroinstalaciju)
- vodič za uzemljenje spojiti na traku za uzemljenje

U punionicu moraju biti ugrađena energetska brojila za svaku utičnicu i pripadajuća napajajuća oprema. Vlastita potrošnja se mjeri brojiлом električne energije. Maksimalna (instalirana) snaga novopredviđene punionice iznosi 44 kW. S obzirom na priključnu snagu poslovnog objekta na postojećem obračunskom mjernom mjestu, dodatni zakup snage u nije potreban.

### 3. Fotonaponski moduli, izmjenjivači i baterijski sustav pohrane električne energije

#### 3.1 Fotonaponski moduli (generatorski blok)

Generatorski blok se sastoji od FN modula povezanih u stringove (serije, nizove). Odabran je FN modul, tip kao proizvođača BISOL Group d.o.o., BDO 380, monokristal, snage 380 Wp ili jednakovrijedan proizvod.

Dimenzije odabranog modula iznose 1770 x 1050 x 35 mm, dok težina iznosi 20 kg.

Ukupno se postavlja 119 fotonaponskih modula što daje ukupnu snagu generatorskog polja od 45,22 kWp.

Karakteristike odabranog FN modula:

	Monokristal
Maksimalna snaga ( $P_{MPP}$ ) W	380
Napon pri MPP ( $U_{MPP}$ ) V	35,0
Napon otvorenog kruga ( $U_{oc}$ ) V	42,1
Struja pri MPP ( $I_{MPP}$ ) A	10,85
Struja kratkog spoja ( $I_{sc}$ ) A	11,45
Stupanj korisnosti	20,4%
Površina modula $m^2$	1,86
Temp. Koeficijent $I_{sc}$ ( $\alpha$ )	0,06 %/K
Temp. Koeficijent $V_{oc}$ ( $\beta$ )	-0.27 %/K
Temp. Koeficijent (TC $P_{MPP}$ ) ( $\gamma$ )	-0.35 %/K
NOCT	44 ± 2 °C

U sustav je, kod generatorskog polja, potrebno ugraditi senzore vjetrova, temperature okoline i FN modula te iradijacije na površinu FN modula. Senzori mogu biti proizvođača Fronius GmbH ili jednakovrijedan proizvod. Bitno je senzore moći povezati na odabran

komunikacijski (nadzorni) sustav kojim će biti omogućen pregled podataka. Pristup nadzornom sustavu mora biti omogućen putem web sučelja (ažuriranje podataka mora biti u intervalu ne većem od jedne minute), ali i direktno putem TCP/IP protokola.

### 3.2 Izmjenjivački blok

Pretvorba istosmjernog DC napona u izmjenični AC napon vrši se izmjenjivačkim blokom koji se sastoji od dva izmjenjivača, tip kao proizvođača Fronius International GmbH, 2 x Symo 20.0-3-M (20 kW) ili jednakovrijedan proizvod, te se smješta uz konstrukciju nadstrešnice parkirališta, ispod FN modula. Ukupna snaga izmjenjivača iznosi 40 kW te predstavlja izlaznu snagu sustava odnosno priključnu snagu u smjeru proizvodnje.

Karakteristike odabranih izmjenjivača:

Tip	Symo 20.0-3-M
<b>DC primarna (ulazna) strana</b>	
2 ulaza; MPPT1 / 3 stringa – MPPT2 / 3 stringa	
Max. snaga PV generatora (kWp)	30
MPP naponski raspon ( $U_{min} - U_{max}$ ) V	420 – 800
Startni napon V	200
Nominalni napon V	600
Maks. ulazna struja (ulaz 1/2) A	33,0 / 27,0
<b>AC sekundarna (izlazna) strana</b>	
Nominalna snaga (kW)	20
Maksimalna snaga (kVA)	20
Napon EE mreže (V)	400 / 230
Nominalna izlazna struja (A)	28,9
Frekvencija (Hz)	50 / 60 Hz
Učinkovitost ( $\eta_{EU}$ ) (%)	97,9
Faktor snage	0 - 1 ind./cap.
THD (%)	1,3
Noćna potrošnja (W)	< 1W

Izmjenjivači se automatski odvajaju od distribucijske mreže ukoliko je/su:

- previsoki ili preniski napon mreže
- previsoka ili preniska frekvencija mreže
- impendancija mreže ( $Z_{ac}$ ) veća od postavljene
- ispadne jedna faza mreže na koju je izmjenjivač priključen
- pojavi dozemni kvar ili diferencijalna struja kvara

U izmjenjivačima se nalazi ugrađena komponenta DATCOM pomoću koje se izmjenjivači međusobno povezuju te zatvaraju komunikacijsku liniju s komponentom Fronius Datamanager Box 2.0 ili jednakovrijednim proizvodom. Podaci rada, dijela Sustava, se direktno šalju na web portal proizvođača opreme. Osim mogućnosti prijenosa i pregleda podataka putem web portala proizvođača (ažuriranje podataka mora biti u intervalu ne većem od jedne minute), odabrani izmjenjivač obavezno mora imati mogućnost pristupa podacima putem TCP/IP protokola, ali i putem spomenutog protokola biti upravljani odnosno imati mogućnost upravljanja radnom i jalovom komponentom snage u realnom vremenu. U izmjenjivač se ugrađuju odvodnici prenapona, tip kao proizvođača Fronius International GmbH, DC SPD TYPE 2 - M ili jednakovrijedan proizvod. Izmenjivači su kompatibilni s normama elektromagnetske kompatibilnosti EN 61000-6-2:2005, EN 61000-6-3:2007, DIN VDE 0126-1-1. Izmenjivači su u izvedbi IP66 te su povoljni za vanjsku montažu. Izmenjivače smjestiti na način da nisu izloženi direktnom udaru sunca te učiniti sve korake potrebne da se osobama onemogućiti laki pristup odnosno kontakt s izmjenjivačima smještenima na lokaciji parkirališta.

### 3.3 Baterijski sustav

Baterijskim sustavom je omogućeno skladištenje viška proizvedene električne energije odakle se po potrebi predaje potrošačima. Pohranjivanje električne energije omogućeno je primjenom komponente tip kao proizvođača Sonnen GmbH, sonnenBatterie 10, 10/11 ili jednakovrijedan proizvod. Navedena komponenta se sastoji od modula s integriranim izmjenjivačem i prekidačem te baterijskih modula za pohranu električne energije. Ugrađuje se i komponenta WM271 (brojilo) s odgovarajućim strujnim mjernim transformatorima. Navedenom komponentom se bilježi potrošnja i proizvodnja električne energije. Komponentom je omogućeno sustavu za pohranu da ostvaruje energetski balans odnosno da definira trebaju li se baterije puniti ili je potrebno preuzeti energiju iz baterija za potrebe potrošača. Na taj način baterijski sustav pohrane radi u modu potrošnje energije za vlastite potrebe sustava. Baterije se moraju moći puniti proizvedenom električnom energijom kao i električnom energijom iz EE mreže.

Karakteristike odabranog baterijskog sustava:

Tip	sonnenBatterie 10
Nominalni kapacitet baterije (kWh)	11
Iskoristivi kapacitet baterije (kWh)	10
Tehnologija ćelija	LFP
Težina (kg)	172
Dimenzije (V/Š/D) (cm)	172-184/69/27
Nominalna snaga (punjenje/pražnjenje) (kW)	4,6
Maksimalna učinkovitost izmjenjivača (%)	95
Maksimalna učinkovitost baterije (%)	98
Stupanj zaštite	IP30
Priključak na mrežu	1 f / 230 V / 50 Hz
Jamstvo	10 godina
Ciklusa	10 000

Nadzornim odnosno komunikacijskim sustavom mora biti omogućeno prikupljanje sljedećih parametara: temperature baterije, stanje napunjenosti, napon i frekvencija EE mreže, radne snaga, faktor snage, snaga punjenja/pražnjenja. Navedeni podaci moraju biti dostupni putem web platforme odakle ih se mora moći preuzeti dok ažuriranje podataka mora biti u intervalu ne većem od jedne minute. Podacima se mora moći pristupiti i direktno, putem TCP/IP protokola. Putem prethodno spomenutog protokola mora se moći upravljati odnosno imati mogućnost upravljanja radnom i jalovom komponentom snage izmjenjivača u realnom vremenu. Baterijski sustav ima mogućnost nadogradnje komponentom sonnenProtect kojom se omogućuje izolirani pogon te bi se u slučaju ispada EE mreže moglo napajati bitnije potrošače. Navedena mogućnost nije obrađena predmetnim projektom.

## 4. Tehnički proračuni

### 4.1 Solarni potencijal lokacije

Lokacija	Rijeka	
Geografska širina	45°01'56"	
Geografska dužina	14°34'10"	
Nadmorska visina	55	m
Nazivna snaga pojedinačnog FN modula	380	Wp
Izmjenjivač	Fronius Symo	
Nagib FN modula	4°	
Azimut (-90° - +90°)	45°	
Specifična godišnja proizvodnja sunčane elektrane	1.130	kWh/kWp
Ukupan broj FN modula	119	
Ukupna snaga izmjenjivača	40,0	kW
Ukupna snaga FN modula	45,22	kWp
Godišnja proizvodnja	51.099	kWh

Stvarna godišnja proizvodnja sunčane elektrane može odstupati od navedene vrijednosti ovisno o meteorološkim odstupanjima, povećanom utjecaju sjene okolnih objekata, ali i načinu održavanja opreme sunčane elektrane.

### 4.2 Proračun opterećenja izmjenjivača

Proračun za primjer izmjenjivača Symo 20.0-3-M s instaliranim stringovima na ulazu 1 (2 x 20) i 2 (1 x 20):

P/U/I podaci	Instalirano	Dozvoljeno
Ukupna snaga	22,80 kWp	30 kWp
UMPP 25°	700 V	<800 V
UMPP 70°	598 V	>420 V
Uoc -10°	922 V	<1000 V
IMAX	22,90 (11,45) A	33,0 (27,0) A

Proračun za primjer izmjenjivača Symo 20.0-3-M s instaliranim stringovima na ulazu 1 (2 x 20) i 2 (1 x 19):

P/U/I podaci	Instalirano	Dozvoljeno
Ukupna snaga	22,42 kWp	- kWp
UMPP 25°	700 (665) V	<800 V
UMPP 70°	598 (568) V	>420 V
Uoc -10°	922 (875) V	<1000 V
IMAX	22,90 (11,45) A	33,0 (27,0) A

#### 4.3 Odabir kabela i proračun pada napona po stringu

Proračun pada napona napravljen je za najgori slučaj, string najveće dužine.

✚ nazivna snaga FN modula pri STC ( $W_p$ )	380 Wp
✚ napon MPP ( $U_{MPP}$ )	35,00 V
✚ struja MPP ( $I_{MPP}$ )	10,85 A
✚ napon otvorenog kruga ( $U_{OC}$ )	42,10 V
✚ struja kratkog spoja ( $I_{SC}$ )	11,45 A
✚ broj stringova (n)	1
✚ broj FN modula u stringu (m)	20
✚ faktor polaganja kabela ( $f_p$ )	0,80

Odabiremo vodič PV1-F 1 x 6 koji se može opteretiti strujom od 70 A.

Dimenzioniranje na pad napona:

Pad napona računamo po formuli gdje je:

✚ dužina kabela (l)	32 m
✚ specifični otpor vodiča ( $\rho$ )	0,0179 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$
✚ presjek kabela (A)	6 $\text{mm}^2$

$$u(\%) = \frac{2 \cdot I \cdot l \cdot \rho}{A} = 2,07 \text{ V} \quad 0,30\%$$

Prema propisu VDE 0100 dio 712. ograničen je gubitak energije u DC kabelima na najviše 1 % pri STC uvjetima. Proračun za najgori slučaj zadovoljava.

#### 4.4 Proračun vršnog opterećenja i vršne struje

Predviđeno vršno opterećenje i vršna struja:

Sustav elektro punionice	Instalirana snaga [kW]	Faktor istovremenosti	Vršna snaga [kW]	cos $\phi$	Nazivni napon [Un]	Vršna struja [A]
Punionica automobila	44,16	1	44,16	0,95	400	<b>67,10</b>
Punionica bicikala/romobila	1,76	0,9	1,58	0,95	230	<b>7,25</b>
Baterijski sustav	4,6	1	4,60	0,95	230	<b>21,05</b>
<b>UKUPNO</b>	<b>50,52</b>		<b>50,34</b>			<b>95,40</b>



Ukupno vršno opterećenje iznosi :  $\sum P_{vrš} = 50,34 \text{ kW}$

Ukupna vršna struja iznosi :  $\sum I_{vrš} = 95,40 \text{ A}$

Pri izradi izračuna vršne struje korištene su sljedeće formule:

-Za trofazni sustav: 
$$I_b = \frac{P_{vr}}{\sqrt{3} \cdot U_L \cdot \cos \varphi}$$

-Za jednofazni sustav: 
$$I_b = \frac{P_{vr}}{U_f \cdot \cos \varphi}$$

gdje je:

$I_b$  - struja opterećenja (tereta) [A]

$P_{vr}$  - vršna snaga [W]

$U_L$  - linijski napon [V]

$U_f$  - fazni napon [V]

$\cos \varphi$  - faktor snage = 0,95

Proračun struje opterećenja vršen je za strujne krugove projektirane građevine.

#### 4.5 Odabir kabela i zaštita od preopterećenja

##### ODABIR KABELA

Na temelju izračunate struje opterećenja i razmatranja instalacijskih uvjeta vrši se odabir napojnih kabela.

Presjeci kabela određeni su sukladno normi **HRN HD 60364-5-52:2012** - Niskonaponske električne instalacije - Dio 5-52: Odabir i ugradba električne opreme - Sustavi razvođenja (IEC 60364-5-52:2009, MOD+Corr:2011; HD 60364-5-52:2011).

Kod proračuna su u obzir uzeti: način polaganja kabela, broj opterećenih žila u vodu/kabelu te korekcijski faktori kako bi se dobila realna trajno podnosiva struja odabranog kabela.

U donjoj tablici dani su ulazni podaci i rezultati proračuna te prikaz tipa odabranog kabela.

## ZAŠTITA OD PREOPTEREĆENJA

Zaštitni elementi vodova odabrani su prema **HRN HD 60364-4-43:2011** - Niskonaponske električne instalacije -- Dio 4-43: Sigurnosna zaštita -- Nadstrujna zaštita (IEC 60364-4-43:2008, MOD+Corr.1:2008; HD 60364-4-43:2010), tako da ne može doći do pregrijavanja kabela i vodova.

U projektu su zadovoljeni sljedeći zahtjevi:

$$I_b < I_n < I_z$$

$$I_2 < 1,45 I_z$$

- gdje je:

$$I_b - \text{struja opterećenja} \quad (A)$$

$$I_n - \text{nazivna struja zaštitnog uređaja} \quad (A)$$

$$I_z - \text{trajno dozvoljena struja kabela} \quad (A)$$

$$I_2 - \text{struja prorade zaštitnog uređaja } I_2 = k \times I_n \quad (A)$$

- pri čemu je faktor k ovisan o vrsti zaštitnog elementa na sljedeći način:

- za rastalne osigurače:

$$k = 2,1 \text{ za } I_n < 4 \text{ A}$$

$$k = 1,9 \text{ za } 4 \text{ A} \leq I_n \leq 10 \text{ A}$$

$$k = 1,75 \text{ za } 10 \text{ A} \leq I_n \leq 25 \text{ A}$$

$$k = 1,6 \text{ za } I_n > 25 \text{ A}$$

- za prekidače  $k = 1,45$

Strujni krugovi provjereni i zadovoljavaju navedeni uvjet, što se vidi iz niže prikazanog.

ODABIR KABELA								ZAŠTITA OD PREOPTEREĆENJA						
DIONICA	Odabrani kabel	Poprečni presjek opterećenih vodiča	Način polaganja	Trajno podnosiva struja kabela (bez korekcijskog faktora)	Redukcijski faktor grupiranja	Korekcijski faktor okolne temperature	Trajno podnosiva struja kabela	Struja opterećenja (vršna)	Nazivna struja zaštitnog uređaja	Faktor prorade zaštitnog uređaja	Struja prorade zaštitnog uređaja	1,45I <sub>z</sub>	Uvjet I <sub>b</sub> < I <sub>n</sub> < I <sub>z</sub> zadovoljen	Uvjet I <sub>2</sub> < 1,45I <sub>z</sub> zadovoljen
		s [mm <sup>2</sup> ]		I [A]				k <sub>1</sub>						
IZMJENJIVAČ → RO-FN	FG16OR16 5 x 16	16	B2	80	0,88	1	70,4	30,4	40	1,45	58	102	da	da
IZMJENJIVAČ → RO-FN	FG16OR16 5 x 16	16	E	100	0,88	1	88	30,4	40	1,45	58	128	da	da
RO-FN → GRO	4 x FG16R16 1 x 70	70	D1	167	0,9	0,95	142,8	95,4	125	1,6	200	207	da	da
RO-FN → punionica aut.	FG16OR16 5 x 35	35	D1	115	0,85	0,95	92,86	67,1	80	1,6	128	135	da	da
RO-FN → punionica bic.	FG16OR16 3 x 4	4	D1	43	0,85	0,95	34,72	7,25	20	1,45	29	50,3	da	da
RO-FN → bat. sustav	NYM-J 3 x 4	4	E	34	0,82	1	27,88	21,05	25	1,45	36,3	40,4	da	da

#### 4.6 Proračun pada napona

Pad napona svih vodova kontroliran je i udovoljava preporuci iz norme **HRN HD 60364-5-52:2012**

Pad napona između početka instalacije potrošača i opreme treba biti ne veći od 3 % za rasvjetu i 5 % za ostale potrošače, nazivnog napona instalacije.

Pad napona računamo po formuli:

a) trofazni sustav:  $u = \frac{100 \cdot l \cdot P}{K \cdot U_f^2 \cdot S}$  (%)

b) jednofazni sustav:  $u = \frac{100 \cdot 2l \cdot P}{K \cdot U_f^2 \cdot S}$  (%)

Gdje je:

u - pad napona (%)

I - duljina voda (m)

P - snaga tereta (W)

U<sub>f</sub> - nazivni napon (V)

U<sub>L</sub> - nazivni napon (V)

S - presjek vodiča (mm<sup>2</sup>)

K - specifična vodljivost vodiča (Sm/mm<sup>2</sup>)

Ovaj izračun nije potreban za udaljenosti elektroenergetskog kabela manje od  $l = 10$  m, već se koristi samo za udaljenosti veće od 10 m.

Provjera pada napona u dovodnom vodu od NN priključka do priključka PEV – izračun maksimalne duljine:

Kabel FG16OR16 5G35 mm<sup>2</sup>

$P_m = 44160$  W

$U_{\%} = 5$  %

$$l = \frac{u \cdot K \cdot U_f^2 \cdot S}{100 \cdot P} = \frac{5 \cdot 56 \cdot 400^2 \cdot 35}{100 \cdot 44160} = 355 \text{ (m)}$$

Za ukupan maksimalno dozvoljeni pad napona  $U_{\%} = 5$  %, maksimalna duljina napojnog voda punionice smije biti 355 m.

Kabel FG16OR16 3 x 4 mm<sup>2</sup>

$P_m = 1580$  W

$U_{\%} = 5$  %

$$l = \frac{u \cdot K \cdot U_f^2 \cdot S}{2 \cdot 100 \cdot P} = \frac{5 \cdot 56 \cdot 230^2 \cdot 4}{2 \cdot 100 \cdot 1580} = 187 \text{ (m)}$$

Za ukupan maksimalno dozvoljeni pad napona  $U_{\%} = 5$  %, maksimalna duljina napojnog voda punionice smije biti 187 m.

*Tablica proračuna pada napona na promatranim dionicama:*

DIONICA	Popr. pr. voda $s$ (mm <sup>2</sup> )	Specifična vodljivost $\kappa$ (Sm/mm <sup>2</sup> )	Duljina $l$ (m)	Snaga tereta $P$ (kW)	Napon $U$ (V)	Pad napona $u$ (%)
<b>Provjera pada napona na dionicama</b>						
IZMJENJIVAČ 1 - RO-FN	16	56	38	20	400	0,53
IZMJENJIVAČ 2 - RO-FN	16	56	40	20	400	0,56
BAT. SUSTAV - RO-FN	16	56	7	4,6	230	0,14
RO-FN - GRO	50	56	10	50,25	400	0,11

#### 4.7 Zaštita od električnog udara – automatski isklop u slučaju kvara

Zaštitni uređaji odabrani su prema **HRN HD 60364-4-41:2007**: Niskonaponske električne instalacije-4-41.dio: Sigurnosna zaštita - Zaštita od električnog udara

#### ZA NADSTRUJNU ZAŠTITU – AUTOMATSKE PREKIDAČE I OSIGURAČE

Provjera automatskog isklopa izvršena je prema uvjetu:

$$Z_s \times I_a \leq U_o$$

$Z_s$  impedancija u ohmima ( $\Omega$ ) petlje kvara koja obuhvaća:

- izvor
- linijski vodič do mjesta kvara
- zaštitni vodič između mjesta kvara i izvora

$I_a$  struja u amperima (A) koja prouzrokuje automatsku proradu isklopne naprave u vremenu određenom u navedenoj normi.

$U_o$  nazivni napon linijskog vodiča prema zemlji izmjenične struje ili istosmjerne struje.

#### ZA DIFERENCIJALNU ZAŠTITU

Kako bi zaštitni uređaj diferencijalne struje (ZUDES) djelovao ispravno, uz pravilan način ugradnje moraju biti zadovoljeni sljedeći uvjeti:

$$R_p \leq \frac{U_d}{I_{\Delta n}} \quad \text{i} \quad R_i \geq \frac{U}{I_{\Delta n}}$$

$R_p$  - otpor petlje šticeenog strujnog kruga [Ω]

$R_i$  - otpor izolacije strujnog kruga [Ω]

$I_{\Delta n}$  - struja prorade diferencijalne zaštite [A]

$U_d$  - dozvoljeni napon dodira [V]

$U$  - fazni napon [V]

Napon dodira ne smije biti veći od 50 V.

Da bi zaštitni uređaj diferencijalne struje greške  $I_{\Delta n} = 0,03$  A pravilno funkcionirao, kabel šticekih trošila mora zadovoljiti sljedeće vrijednosti dobivene iz gore navedenih izraza:

$$R_p \leq \frac{50}{0,03} = 1666,7\Omega \quad \text{i} \quad R_i \geq \frac{230}{0,03} = 7666,7\Omega$$

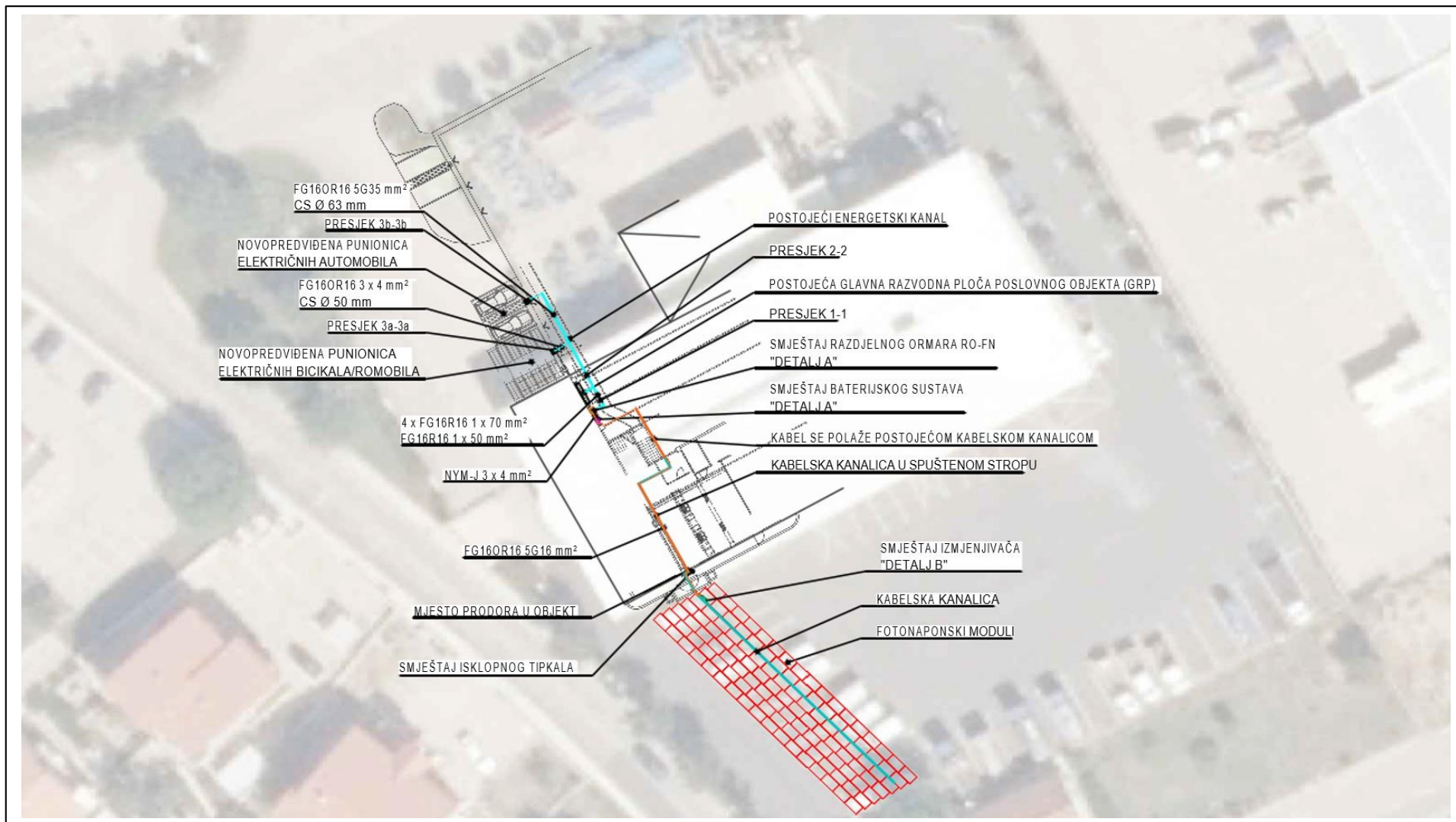
Da bi zaštitni uređaj diferencijalne struje greške  $I_{\Delta n} = 0,3$  A pravilno funkcionirao, kabel šticekih trošila mora zadovoljiti sljedeće vrijednosti dobivene iz gore navedenih izraza:

$$R_p \leq \frac{50}{0,3} = 166,6\Omega \quad \text{i} \quad R_i \geq \frac{230}{0,3} = 766,6\Omega$$

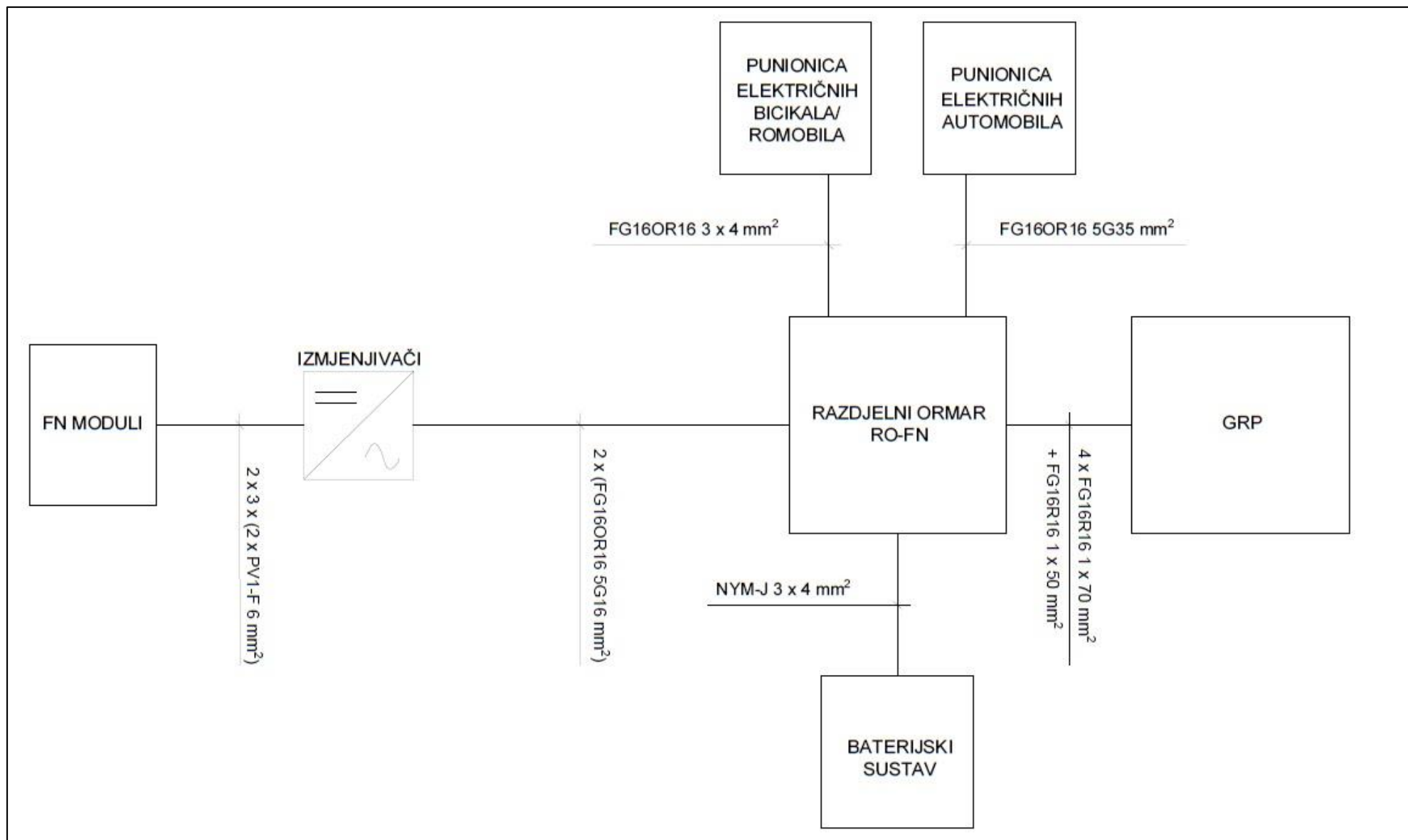
Ispunjavanje traženih uvjeta, za ispravno djelovanje zaštitne sklopke diferencijalne struje, potrebno je provjeriti na licu mjesta odgovarajućim mjerenjem.

## 5 Grafički prikazi

### 5.1 Situacija građevine na ortofoto karti – smještaj opreme

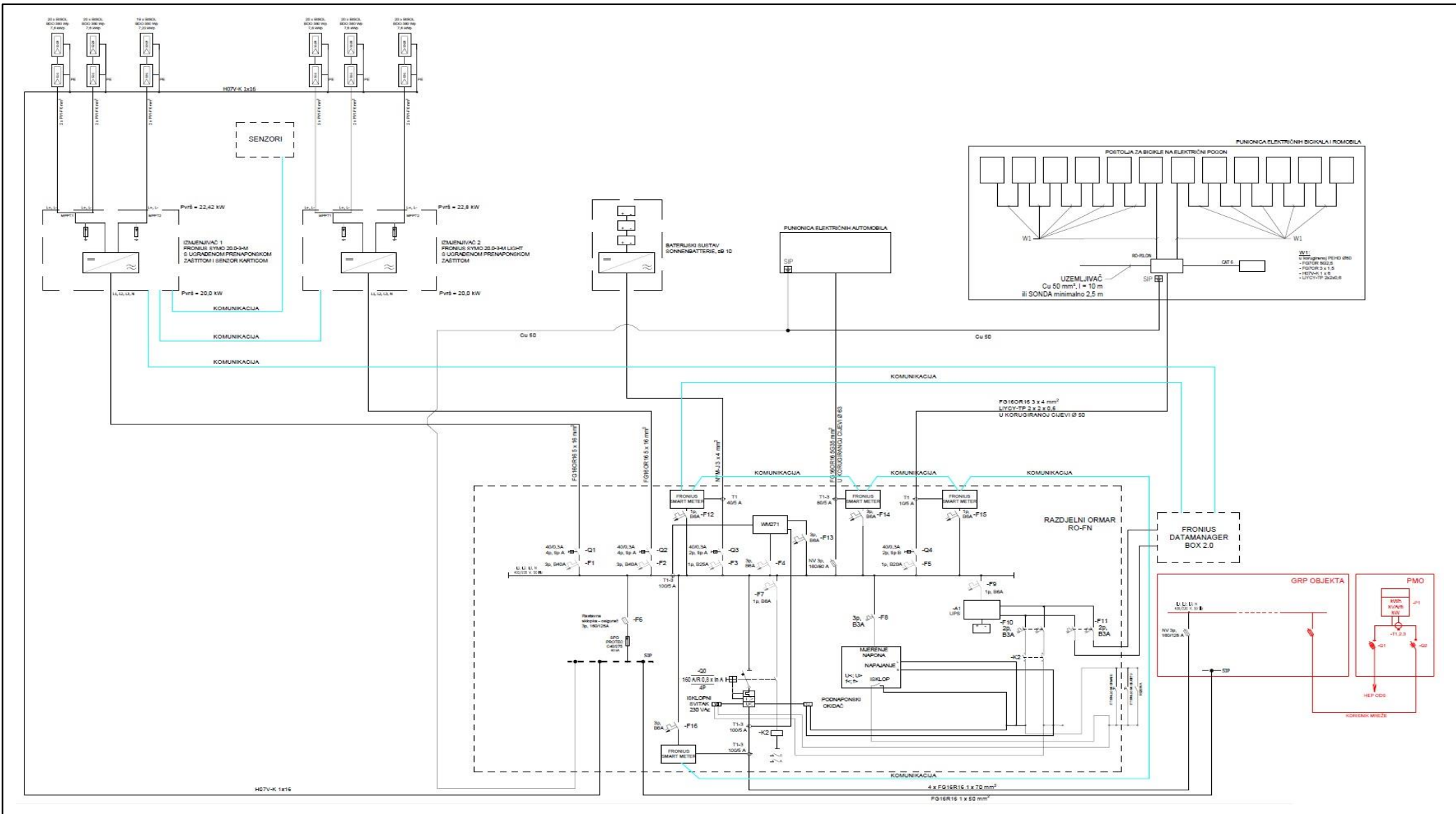


## 5.2 Blok shema

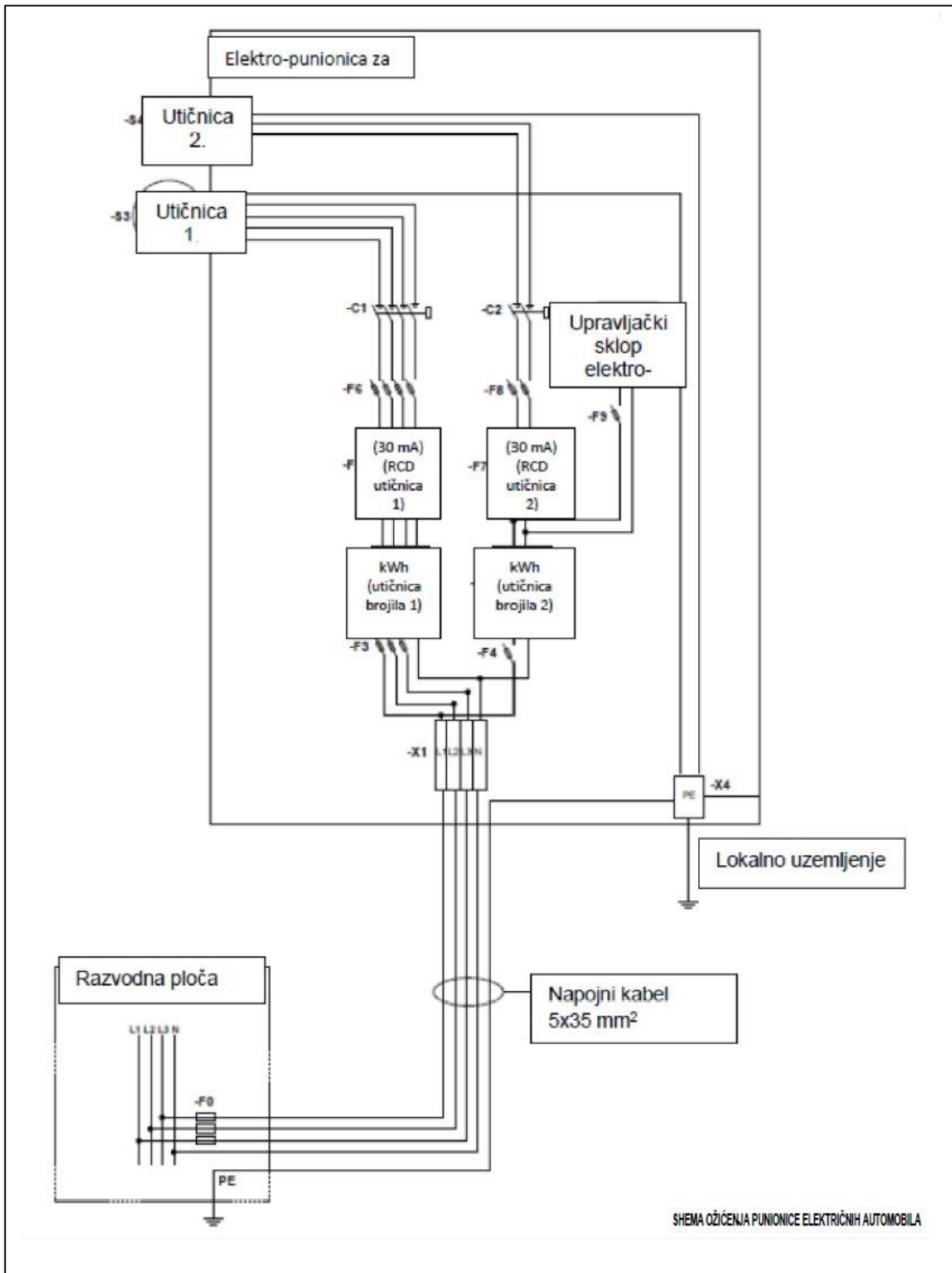


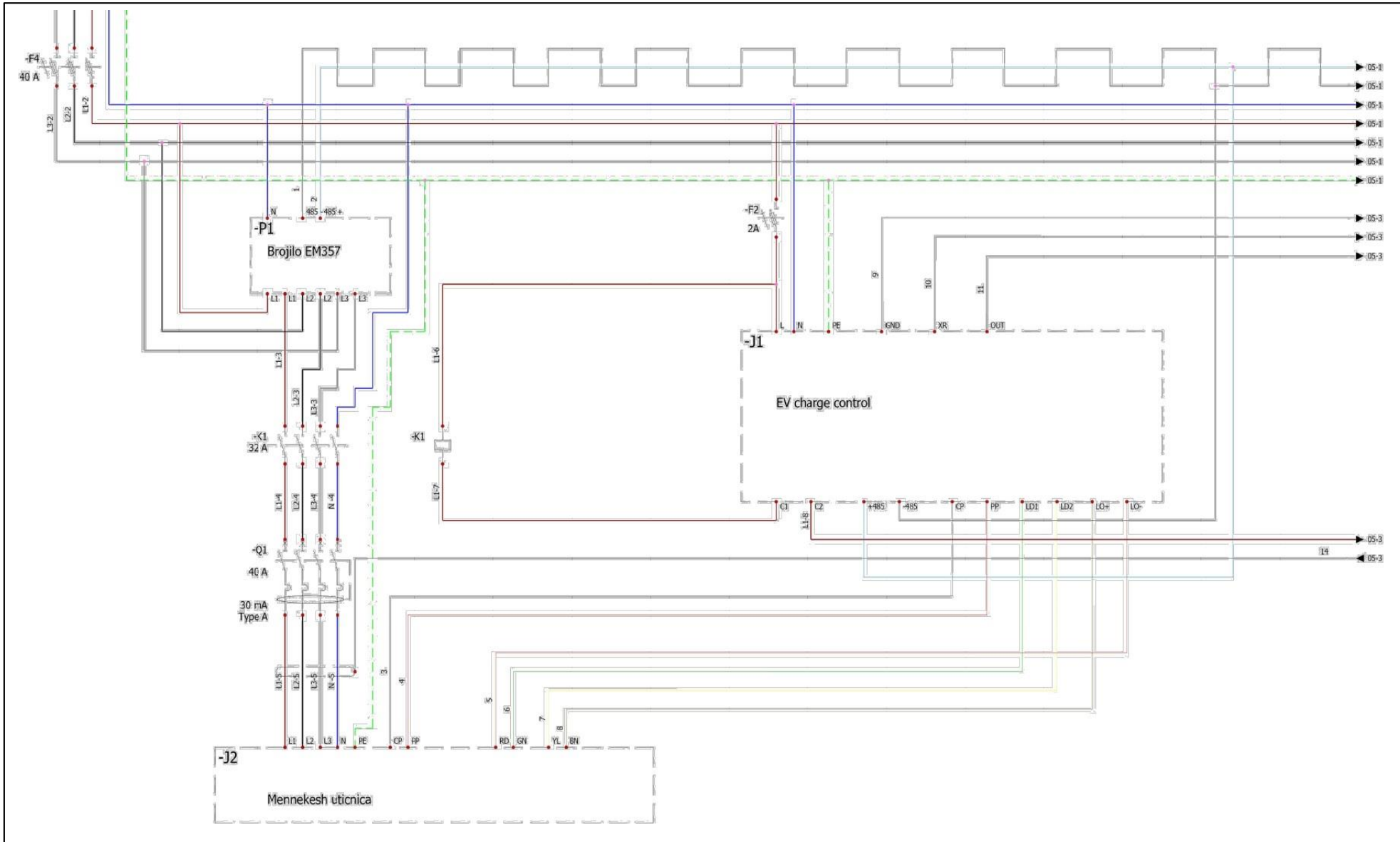


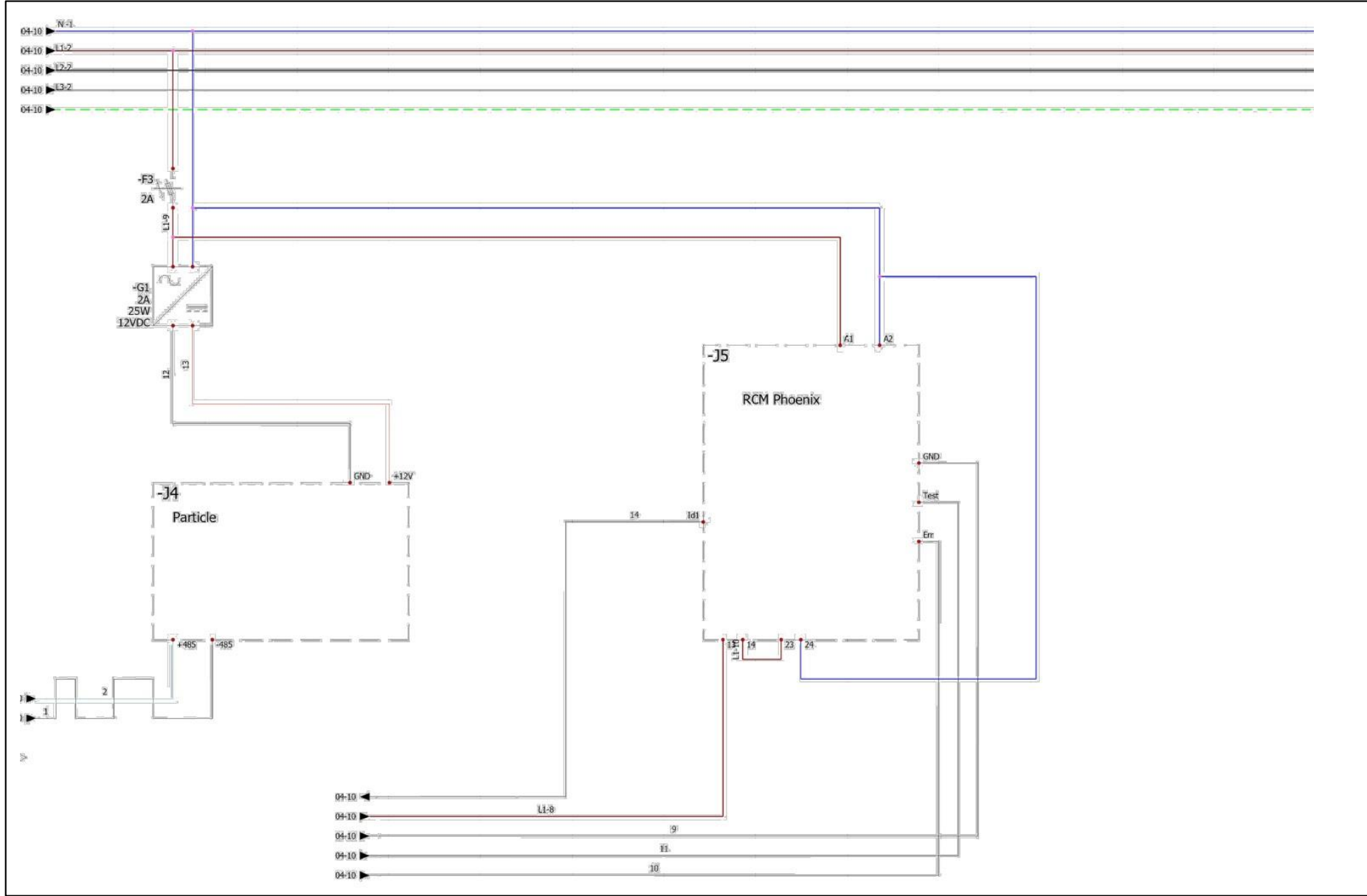
### 5.3 Jednopolna shema

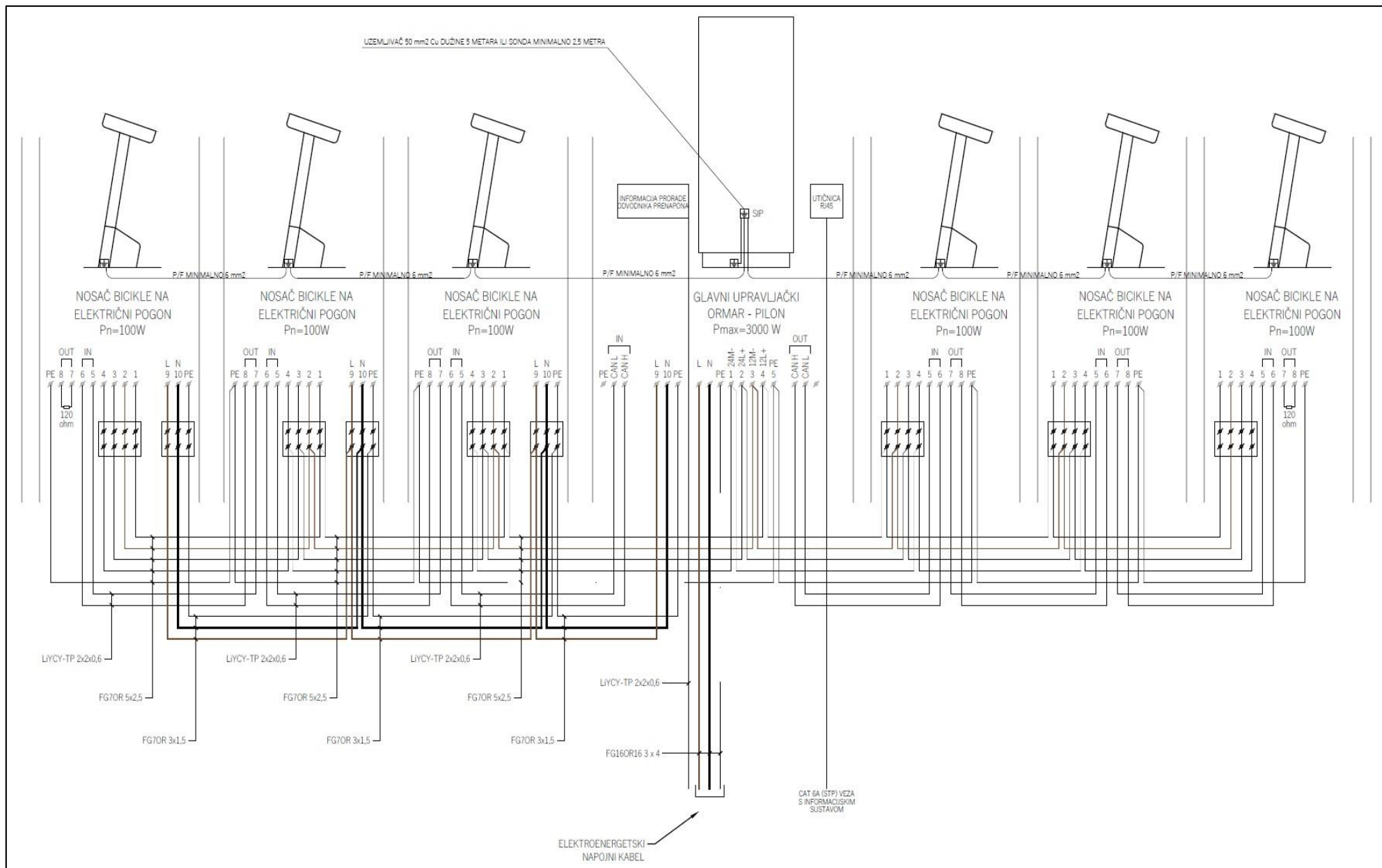


### 5.4 Shema ožičenja PEV









## 5.5 Dispozicija FN modula i kableske kanalice



## 5.6 Dispozicija izmjenjivača, baterijskog sustava i razdjelnika RO-FN

