

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

# FLEXIBASE

## Izvešće o primjerima aplikacije mikromreže s velikim udjelom pretvarača

izv.prof. Hrvoje Pandžić  
Ivan Pavić  
Ivan Grcić  
Domagoj Badanjak



Europska unija  
Zajedno do fondova EU



15-07-2020

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Analiza istosmjernih tereta</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Analiza uređaja za pohranu energije</b>	<b>4</b>
3.1	Baterije . . . . .	4
3.2	Superkondenzatori . . . . .	5
3.3	Zamašnjaci . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Analiza uređaja za proizvodnju električne energije</b>	<b>7</b>
4.1	Solarni paneli . . . . .	7
4.2	Gorive ćelije . . . . .	8
4.3	Vjetroagregati . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Mikromreže</b>	<b>10</b>
5.1	Definicija . . . . .	10
5.2	Motivi . . . . .	11
<b>6</b>	<b>Pozadina elektroenergetske tranzicije</b>	<b>13</b>
<b>7</b>	<b>Primjene mikromreža - prednosti</b>	<b>17</b>
7.1	Institucijske . . . . .	17
7.2	Vojne svrhe . . . . .	17
7.3	Kućanstva . . . . .	17
7.4	Udaljene lokacije . . . . .	18
<b>8</b>	<b>Primjeri iz svijeta</b>	<b>19</b>
8.1	Bordesholm, Njemačka . . . . .	19
8.2	Rudnik zlata, Zapadna Australija . . . . .	20
8.3	Mikromreža Blue Lake Rancheria . . . . .	21
8.4	Zatvor Santa Rita . . . . .	22
8.5	E.ON ERC Microgrid . . . . .	22
8.6	Odd nogometni klub . . . . .	22

<b>9 Uloga pretvarača</b>	<b>24</b>
<b>10 Otvorena pitanja</b>	<b>25</b>
10.1 Zakonska regulativa . . . . .	25
10.2 Utjecaj na tradicionalne opskrbljivače . . . . .	26
10.3 Integracija mikromreža . . . . .	26
10.4 Konkurentski koncepti . . . . .	27
<b>11 Zaključna razmatranja</b>	<b>28</b>
<b>Literatura</b>	<b>31</b>

# Popis slika

2.1	Punionica EVLINK . . . . .	3
2.2	Karakteristika brzina-moment različitih vrsta istosmjernih motora [23] . . . . .	3
3.1	Usporedba gustoća snage i energije različitih tehnologija baterija [9] . . . . .	5
3.2	V2G koncept [20] . . . . .	6
4.1	Ekvivalentni strujni krug fotonaponske ćelije []. . . . .	7
4.2	Shematski prikaz gorive ćelije [36] . . . . .	9
4.3	Spoj vjetroagregata na mrežu [34] . . . . .	9
6.1	Proces liberalizacije . . . . .	13
6.2	Rast udjela OIE po državi/regiji [16] . . . . .	16
8.1	Spremnik energije u Bordesolmu [21] . . . . .	19
8.2	Rudnik zlata u Zapadnoj Australiji [1] . . . . .	20
8.3	Blue Lake Rancheria, fotografija u vlasništvu Siemens grupacije . . . . .	21
8.4	Nogometni stadion kluba Odd [2] . . . . .	23

# 1. Uvod

Teško je reći po čemu će se sve pamtiti 21. stoljeće, no vrlo je velika vjerojatnost da će energetska tranzicija ili barem težnja i pokušaji prema njoj biti jedna od značajnijih sastavnica tekućeg stoljeća. Uzbudljive nove tehnologije, ekološki osviještene zakonske regulative i zanimljivi koncepti aktivnog sudjelovanja u procesu proizvodnje i potrošnje električne energije uvelike mijenjaju konvencionalnu paradigmu elektroenergetskog sustava. Jedna od bitnijih sastavnica energetske tranzicije jest upravo koncept mikromreže. Napori znanstvene i industrijske zajednice idu u smjeru otkrivanja optimalnih načina za ubrzanu integraciju velikog broja obnovljivih izvora energije bez štetnih pojava po sustav. Upravo se tom problemu mikromreže nameću kao jedno logično rješenje. No, kako ćemo kasnije i pokazati, primjene i prednosti koncepta mikromreža su razne. U daljnjem tekstu će kroz prva tri poglavlja pobliže biti objašnjene općenite sastavnice mikromreže (istosmjerni tereti, uređaji za pohranu energije te uređaji za proizvodnju električne energije). U poglavlju 5 se definira pojam mikromreže te generalne karakteristike koje ju obilježavaju, a sljedeće poglavlje pruža širu sliku o tome što je sve prethodilo početku intenzivnog razvoja tog koncepta. Poglavlja 7 i 8 opisuju razne primjene mikromreža s primjerima iz svijeta.

## 2. Analiza istosmjernih tereta

Moderni uređaji poput mobitela, laptopa, televizora pa sve do onih većih poput električnih vozila koriste za svoj rad istosmjerni napon. Osim modernih i neki klasični uređaji imaju svoje istosmjerne ekvivalente, npr. električne žarulje. Većina samostalnih električnih uređaja u sebi sadrži bateriju, koja je također istosmjerni teret. Baterije, televizori te vozila nisu uvijek na istoj naponskoj razini pa je često neizbježno da istosmjerni tereti moraju biti spojeni na sustav preko pretvarača. U slučaju istosmjernog sustava za to će se koristiti istosmjerni pretvarač dok će u suprotnom biti potreban ispravljač.

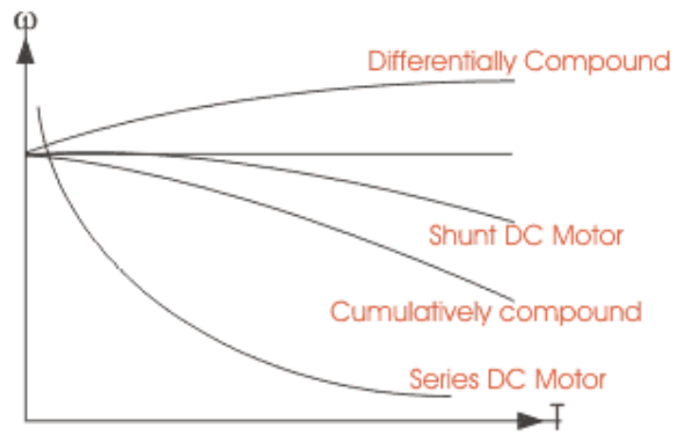
Promjenjivi istosmjerni elektronički teret se koristi za jednostavno i brzo simuliranje različitih radnih stanja. Neki od uređaja čija se radna stanja mogu ispitati su ispravljači, istosmjerni pretvarači i baterije. Nadalje, elektronički teret može oponašati karakteristike različitih uređaja, što smanjuje potrebu za kupovinom istih. Elektronički teret proizvođača Elektro-Automatik, EL 9000 B [10], ima mogućnosti rada u više radnih stanja koja uključuju konstantan napon, struju, snagu ili otpor. Podržava i generiranje funkcija opterećenja. Dovoljno je poznavati radnu karakteristiku uređaja kako bi ga uspješno analizirali, što u slučaju većine tereta nije problematično.

Punionice električnih vozila imaju za teret bateriju koja ima prilično kompliciranu radnu karakteristiku, stoga je upitno može li se aproksimirati te analizirati pomoću promjenjivog istosmjernog tereta. Punionice automobila dolaze u dvije izvedbe koje karakterizira brzina punjenja, pa razlikujemo normalne i brze punionice. Brza punionica je uobičajeno veće snage i uspijeva napuniti automobilsku bateriju u kraćem vremenskom razdoblju. Primjer brze punionice je *EVLINK DC Fast Charger* [11] proizvođača Schneider Electric. Projektirane su tako da mogu napuniti 80% kapaciteta baterije u manje od 30 minuta, te potpuno napuniti bateriju za manje od jednog sata. Podržava više vrsta utikača, među njima Combo CCS, CHAdeMO, te AC Type 2 (izmjenični, podržava manju snagu punjenja od ostalih).

Istosmjerni strojevi su također skupina trošila koju bi bilo prilično teško analizirati poglavito zbog pojave prijelaznih stanja. Istosmjerni strojevi se dijele na više skupina: nezavisno uzbuđene, samouzbuđene te strojeve s trajnim magnetima. Svaka od navedenih skupina se razlikuje po momentnoj karakteristici, što i određuje primjenu stroja. Nezavisno uzbuđeni strojevi se najčešće koriste za električnu vuču, dok su samouzbuđeni korišteni u industrijskim primjenama (ovisno o načinu samouzbuđene). Istosmjerni strojevi s trajnim magnetima koriste magnetsko polje trajnog magneta za uzbuđu. Iako su po dimenzijama manji, skuplji su zbog cijene magneta. Mogu se koristiti za različite primjene, ako je ekonomski opravdano. Slika 2.2 prikazuje različite karakteristike istosmjernih motora ovisno o izvedbi.



Slika 2.1: Punionica EVLINK



Slika 2.2: Karakteristika brzina-moment različitih vrsta istosmjernih motora [23]

## 3. Analiza uređaja za pohranu energije

### 3.1 Baterije

Baterije su sačinjene od jedne ili više ćelija u kojima se događaju kemijske reakcije koje stvaraju tok elektrona. Ćelija se uobičajeno sastoji od tri glavna dijela: anode (negativna elektroda), katoda (pozitivna katoda) te elektrolita. Anoda oslobađa, a katoda prihvaća elektrone kad je baterija spojena na električno trošilo. Kad je baterija odvojena od trošila elektrolit sprječava redistribuciju elektrona. Baterije se dijele na dvije vrste: primarne i sekundarne (punjive). Primarne se ne mogu više koristiti jednom kad se isprazne. Punjive mogu, te se zbog tog korištene za pohranu energije. Postoje četiri velike skupine punjivih baterija:

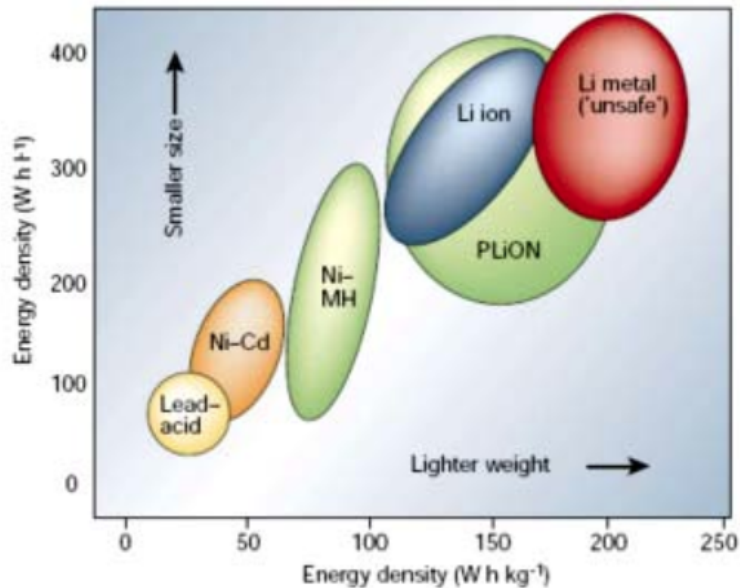
- Litij-ionske (Li-ion)
- Nikl-kadmijske (Ni-Cd)
- Nikl-metal hidridne (Ni-MH)
- Olovne

Baterije su okarakterizirane s nekoliko parametara: gustoćom energije, gustoćom snage, brojem dostupnih ciklusa punjenja/praznjenja te cijenom. Zbog svojih karakteristika, litij-ionske baterije prednjače nad ostalim tehnologijama (Slika 3.1), te se stoga koriste u zahtjevnim ulogama poput električnih automobila ili kao potpora obnovljivim izvorima energije.

Baterije su modularne izvedbe, kako bi se mogli dobiti baterijski sustavi različitih napona i snaga. Moduli se dijele na *Master* i *Slave*. Obje vrste modula sadrže litij-ionske ćelije, no *Master* sadrži i upravljački sistem koji nadzire baterijski paket. U ponudi proizvođača PowerTechSystems je upravo takav sustav [3].

Porastom broja električnih vozila, raste i broj baterija koje se mogu koristiti za napajanje kućanstva ili mreže. Kad je vozilo u mirovanju, pohranjena energija se može iskoristiti kao pomoć elektroenergetskom sustavu prilikom povećanja opterećenja. Iz istog se razloga može spojiti na kućnu mrežu. Naravno, za to je potrebna dvosmjerna punionica. Rješenja za spajanje vozila na mrežu (engl. *vehicle to grid* - V2G) već postoje [20], a temelje se na pametnom punjenju, nadgledanju flote električnih automobila te praćenja zahtjeva mreže.





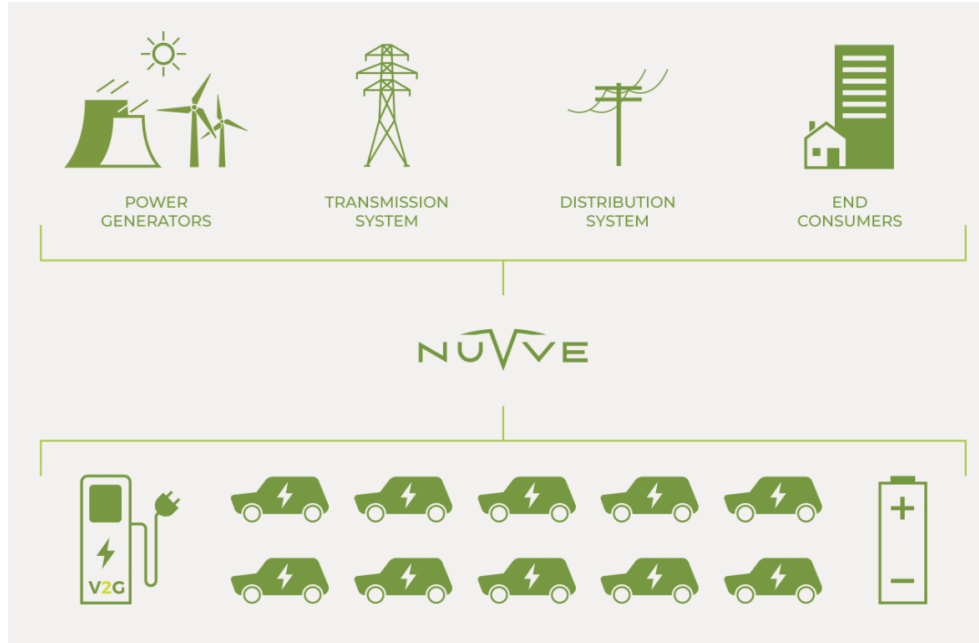
Slika 3.1: Usporedba gustoća snage i energije različitih tehnologija baterija [9]

## 3.2 Superkondenzatori

Superkondenzator je kondenzator visokog kapaciteta, ali s nižim naponskim limitima. Tipično sadrži 10 do 100 puta više energije po jedinici volumena ili mase od elektrolitskih kondenzatora. Također mogu proizvesti više snage te izdržati više ciklusa punjenja/pražnjenja od punjivih baterija. Prema vrsti pohrane naboja ih dijelimo na tri skupine:

- Elektrokemijski dvoslojni - skladištenje naboja na granici faza elektroda/elektrolit (elektrostatički)
- Pseudo-superkondenzatori - skladištenje putem kemijskih reakcija (elektrokemijski)
- Hibridni kondenzatori - kombinacija već navedenih.

Superkondenzatori se koriste u primjenama gdje je potrebno mnogo ciklusa punjenja/pražnjenja poput gradskih autobusa. Dolaze u tri izvedbe: cilindričnoj, prizmatičnoj te *pouch-bag*. Izvedba direktno utječe na karakteristike kondenzatora. Cilindrični su najkorišteniji, imaju veliku gustoću energije, cijenovno su isplativi te sigurni. Nedostaci su zauzimanje prostora te otežano hlađenje. Prizmatični su robustni te zauzimaju manje prostora ali im je hlađenje također otežano. *Pouch-bag* superkondenzatori imaju dobru gustoću energije te su jako kompaktni. Nedostaci su moguća smanjena krutost te pojava oticanja [26].



Slika 3.2: V2G koncept [20]

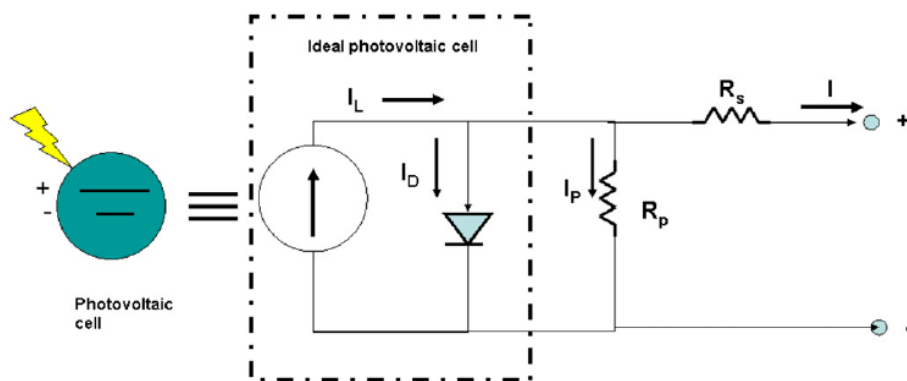
### 3.3 Zamašnjaci

Zamašnjaci pohranjuju energiju tako da se rotor zaleti na veliku brzinu. Brzine mogu biti od 20 do 50 tisuća okretaja u minuti. Sustav se sastoji od zamašnjaka postavljenog na ležaju u vakuumu, spojenog na motor/generator. Nekad su korišteni kao kratkotrajna rotirajuća rezerva za trenutnu regulaciju frekvencije mreže te balansiranje naglih promjena u potrošnji energije. Snaga sustava za pohranu energije baziranih na zamašnjacima može biti i do 20 MW [1]. Sustav od 200 zamašnjaka pohranjuje 5 MWh energije.

## 4. Analiza uređaja za proizvodnju električne energije

### 4.1 Solarni paneli

Solarni paneli izravno pretvaraju sunčevu energiju u električnu. Princip rada temelji se na izbacivanju elektrona iz poluvodičkih materijala prilikom izloženosti svjetlosti. Čelije su spojene serijski ili paralelno, ovisno o naponskoj razini koju se želi postići odnosno snazi modula. Solarni paneli su na mrežu spojeni preko pretvarača, uobičajeno istosmjernih, upravljanih metodom praćenja maksimalne radne točke. Snaga koju daje solarni panel ovisi o osunčanosti i temperaturi.



Slika 4.1: Ekvivalentni strujni krug fotonaponske ćelije [1].

Fotonaponske ploče iz silicija se izvide u više morfoloških oblika kao monokristalne, polikristalne i amorfne.

Monokristalne silicijske ploče koriste apsolutno čisti silicij. Monokristalni štapići se dobivaju iz rastaljenog silicija te režu na pločice. Ovakva obrada omogućava relativno veliku korisnost. Ovaj tip ploče, površine  $1 \text{ m}^2$ , uz sunčevo zračenje od  $1000 \text{ W/m}^2$  može isporučiti  $140 \text{ W}$  snage.

Polikristalne silicijske ploče mogu proizvesti  $130 \text{ W}$  snage uz prethodno navedene uvjete. Proizvodnja ovih ploča je ekonomski isplativija, no sam proces uzrokuje pojavu nepravilnosti na rubovima ploča što smanjuje efikasnost.

Amorfne silicijske ploče su najmanje učinkovite jer proizvode  $50 \text{ W}$  snage u istim uvjetima u kojima bi monokristalne i polikristalne proizvodile više od dva puta veću snagu. Međutim,

cijena materijala te troškovi proizvodnje su mnogo manji.

Galij arsenidne ploče su skuplje izvedbe, no učinkovitije su od silicijskih. Stupanj iskorištenja im je 30%, što znači da proizvode 300 W snage iz 1000 W sunčevog zračenja. Relativno su neosjetljive na toplinu u uporedbi sa silicijskim, te na zračenja. Nedostatak je visoka cijena.

Komercijalno su najčešće dostupni silicijski monokristalni te polikristalni. Na [17, 18] su dostupni u raznim snagama od 5 do 300 W.

## 4.2 Gorive ćelije

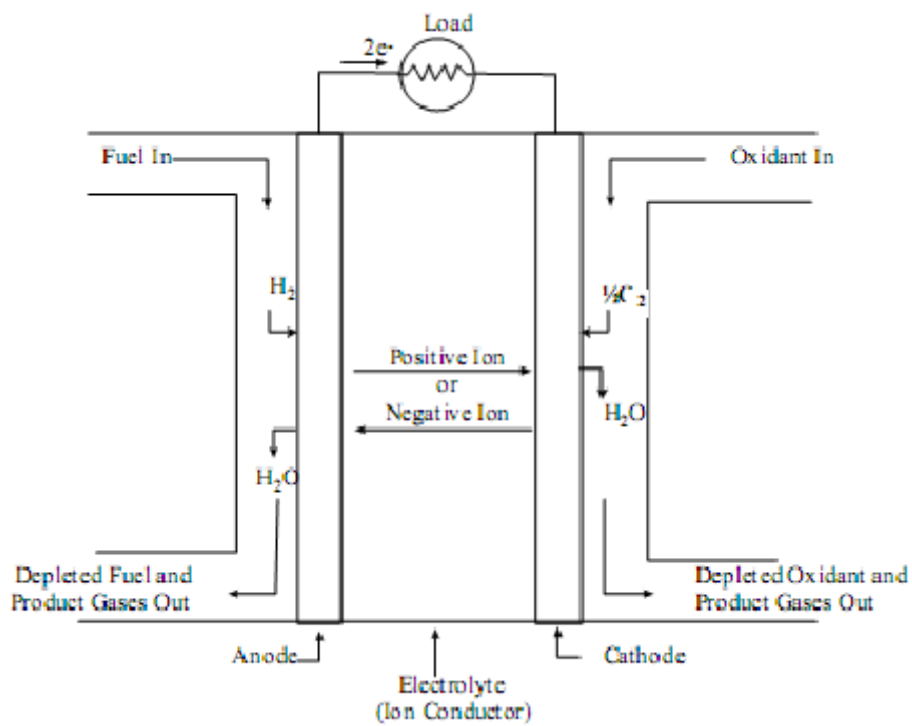
Gorive ćelije su jedan od najstarijih načina pretvorbe energije. Pretvaraju kemijsku energiju goriva u električnu energiju. Uobičajeno je gorivo vodik s kojim, u redoks reakciji, djeluje oksidans - uobičajeno kisik. Pri pretvorbi ne nastaju ekološki neprihvatljive tvari, jer je produkt redoks reakcije voda i toplina. Danas postoji pet glavnih tipova ćelija, koje se razlikuju po tipu elektrolita: alkalij, protonski propusna membrana, čvrsti oksid, fosforna kiselina te ugljična talina [33]. Ovisno o tehnologiji variraju i radna temperatura, korisnost te proizvedena snaga. Tipična snaga paketa dolazi u izvedbama od <1 kW do 2 MW. Učinkovitost gorivih ćelija je između 40 i 60%. Primjene su razne: u automobilima, kao pomoćni izvor energije ili kao distribuirani izvor energije. Specifikacije pojedine tehnologije, te prednosti i nedostaci su dodatno navedeni na [25].

Na [13] su dostupne gorive ćelije snaga od <5 W do 10 kW za razne primjene. Neke se ćelije mogu koristiti kao neprekinuti izvori napajanja.

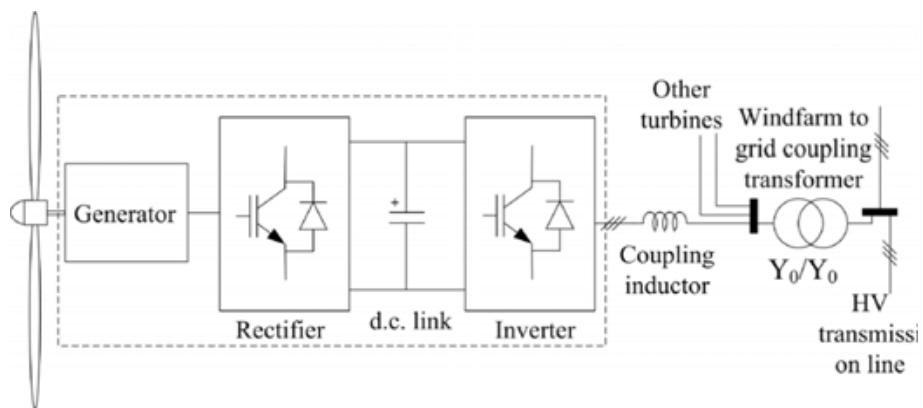
## 4.3 Vjetroagregati

Vjetroagregat je osnovni dio vjetrom pogonjenog sustava za proizvodnju električne energije. Sastoji se od vjetroturbine i električnog generatora. Vjetroturbina će se, zbog svog aerodinamičkog svojstva, pod utjecajem vjetra rotirati. Kinetička energija trubine se tada u generatoru pretvara u električnu energiju. Vrsta generatora su najčešće sinkroni ili asinkroni. O izvedbi ovisi upravljanje pretvaračima te sam tip pretvarača potrebnih za spoj na mrežu. Uobičajeno je generator spojen na ispravljač koji ga povezuje na istosmjerni međukrug. Tada izmjenjivač za spoj na mrežu pretvara istosmjerni napon u izmjenični, prilagođen mreži po iznosu, fazi i frekvenciji.

Snage vjetroagregata dolaze od nekoliko kilovata pa sve do nekoliko megavata. Izvedba turbine može biti vertikalna i horizontalna. Horizontalna izvedba se koristi za veće snage dok je vertikalna za snage do 10 kW. Osim toga, vertikalne turbine su u prednosti jer zauzimaju manje prostora, stvaraju manje buke, otpornije su na udare vjetra te stvaraju manje buke [14]. Na [4] se mogu pronaći vjetroturbine u obje izvedbe, u različitom rasponu snaga.



Slika 4.2: Shematski prikaz gorive ćelije [36]



Slika 4.3: Spoj vjetroagregata na mrežu [34]

## 5. Mikromreže

### 5.1 Definicija

Pregledavajući različitu literaturu, mogu se naći raznorazne definicije pojma "mikromreža". Definicije se ponajprije razlikuju ovisno o kontekstu u kojemu se određena mikromreža koristi. Tako se spominju definicije mikromreža koje opisuju isključivo rad na lokacijama udaljenim od klasične mreže (čisti otočni rad), kao i one koje opisuju rad mikromreža koje su dio neke veće mreže (obično distributivne). Mikromreže u sklopu neke druge, veće, mreže moraju biti sposobne i za otočni rad i za rad u sklopu te, veće, mreže uz dobro osmišljen i realiziran način prijelaza iz jednog stanja u drugo i obrnuto. Dakle, mogli bismo zaključiti kako se iz raznoraznih definicija mogu izvući neke generalne karakteristike koje bi sve potencijalne mikromreže trebale zadovoljavati. Proučavajući pobliže njene sastavne jedinice, lako se daje uočiti skup distribuiranih izvora energije, spremnika energije pa i raznorazni tereti (od klasičnih kućanstava, industrije i institucija do električnih automobila). No da bi se došlo do raznih definicija mikromreža, prije svega su uopće trebala započeti istraživanja u tom području. U kasnim devedesetim godinama prošlog stoljeća, znanstvenici su otvorili novo poglavlje istraživanja o decentraliziranim rješenjima koja bi bila pogodna za integraciju velikog mnoštva distribuiranih izvora energije. Pritom su se vodili maksimizacijom pouzdanosti i otpornosti na elementarne nepogode (poplave, uragani, potresi,...), različite napade (što fizičke, što elektronske) te kaskadne kvarove u mreži. Rezultat tog istraživanja, više-manje paralelno vođenog i u Europi i u Americi, jest mrežna arhitektura koja je dio veće mreže, sadrži teret i proizvodne subjekte te se u nužnim slučajevima može odvojiti od veće mreže i funkcionirati (barem da zadovolji kritične potrebe) u otočnom načinu rada. Takvom principu mrežne arhitekture dodijeljeno je ime "*mikromreža*" [31]

Što se karakteristika tiče, generalni dogovor jest da mikromreža mora zadovoljavati sljedeća svojstva:

- Predstavljati se ostatku mreže kao jedinstvena cjelina
- Pružanje usluge kontrole frekvencije poput sinkronog generatora
- Regulacija napona i frekvencije u okviru dozvoljenih granica u otočnom režimu rada
- Održavanje toka snaga u okviru dozvoljenih granica
- Održavanje energijske ravnoteže (prikladno dispečiranje)

- Glatki i sigurni prijelaz iz jednog režima rada u drugi (zadovoljavajući sve potrebne uvjete -> npr. resinkronizacija s glavnom mrežom)

Upravljanje mikromrežom možemo predstaviti trofaznim hijerarhijskim sustavom. Prve dvije razine (primarna i sekundarna regulacija) upravljaju frekvencijom i naponom, dok treća razina (tercijarni upravljački sloj) omogućava i upravljanje mikromrežom iz ekonomske perspektive. Točnije rečeno, tercijarni sloj se bavi optimizacijom rada mikromreže s fokusom na upravljanju i usklađivanju rada energijskih spremnika, distribuiranih izvora energije, uvozu/izvozu energije obzirom na ostatak mreže i sličnim operacijama kojima za zadatak mogu biti postavljeni ciljevi poput minimizacije ukupnog troška i sl.

## 5.2 Motivi

- Energetska sigurnost
- Ekonomske blagodati
- Integracija obnovljivih izvora energije

Gore spomenuti motiv energetske sigurnosti je možda i najviše vezan uz prilike u SAD-u. Naime, povremeni prekidi opskrbe električnom energijom uzrokovani što vremenskim nepogodama, što tehničkim kvarovima uslijed zastarjelosti opreme, koštaju SAD i preko 100 milijardi dolara godišnje [30]. Važniji problem i od samih ekonomskih gubitaka jest rad kritičnih ustanova poput bolnica, komunikacijske infrastrukture, vodovodne infrastrukture i sličnih važnih jedinica tijekom izvanrednih okolnosti, što može izravno rezultirati ljudskim stradanjima. Klimatske promjene koje za posljedicu imaju sve češće i razornije vremenske nepogode, samo dodatno naglašavaju prijeku potrebu za otpornijim sustavom. Sve to su i više nego jaki razlozi za ulaganje u inovativne koncepte koji će doprinijeti većoj otpornosti sustava na izvanredna stanja i samim time većoj sigurnosti sustava i građana. Štoviše, pojedine države u SAD-u putem potpora i istraživanja razmatraju te potiču mikromreže kao zamjenu za zastarjele proizvodne kapacitete i vid smanjenja zagušenja u kritičnim dijelovima mreže. No nisu vremenske nepogode jedina vrsta nesigurnosti, u današnjim vremenima učestali su i kibernetički napadi. Velike centralizirane mreže uslijed takvog napada mogu ostati nezanemarivo dugo onesposobljene dok se sam uzročnik napada ne otkloni i pogođena infrastruktura popravi. Dočim je decentralizirana arhitektura, koja krasi mikromreže, u puno manjoj mjeri ranjiva. Ukoliko određeni dio i bude pogođen, ostatak mreže bi trebao funkcionirati normalno. Možda i prvi takav slučaj kibernetičkog napada na elektroenergetski sustav je zabilježen na teritoriju Ukrajine krajem 2015. godine. Spomenuti napad je uzrokovao poteškoće za preko 200 tisuća ljudi i nestanke struje između jednog i čak šest sati (ovisno o dijelu mreže). Kasnije provedena istraživanja su ukazivala na ruske hakere koji su podmetnuli zlonamjerni softver koji je onda pokrenuo

lančanu reakciju kolapsa u sustavu, no dalje od čisto informativnog navođenja indicija i sumnji nije tema ovog izvještaja [12, 6].

Druga dva motiva, koja su međusobno i povezana, nekako je najprirodnije vezati uz EU (te Kinu), no naravno da i SAD tu također vidi razloge za daljnji razvoj mikromreža. Primjerice koncept mikromreža može pomoći u dijelovima gdje je mreža zastarjela tako što pruža izvor energije i potpore za najkritičnije točke sustava, a ujedno je i način odgode ulaganja u infrastrukturu ako studije pokažu da je to isplativiji pristup osiguravanja zadovoljenja potražnje za električnom energijom na nekom području. Dodatne ekonomski blagodati su mogućnost pružanja pomoćnih usluga sustavu te smanjenje ukupnih troškova zbog optimizacije rada distribuiranih izvora energije unutar mikromreže koji su možebitno komplementarni. Što se tiče integracije obnovljivih izvora energije, zbog svoje nepredvidljivosti i nemogućnosti kontroliranja predstavljaju potencijalne probleme za mrežu, što se može i iščitati analizom cijena s velikim udjelom obnovljivih izvora energije. Naime, u pojedinim se regijama prodavala i po negativnoj cijeni (prodavatelj plaća kupcu da preuzme električnu energiju jer nema kamo s njom) uslijed neravnoteže proizvodnje i potražnje. Primjer donekle analogan ovom jest nagli pad cijena nafte (čak i ispod nule) u prvoj polovici 2020. godine, upravo zbog premale potražnje na preveliku proizvodnju. Koristeći energijske spremnike i ostale prednosti koncepta mikromreže, pritisak na sustav se uvelike smanjuje, sigurnost i pouzdanost opskrbe rastu, a samim time se otvaraju vrata sve većoj integraciji obnovljivih izvora energije u energetske mikse pojedine države/regije/zajednice.

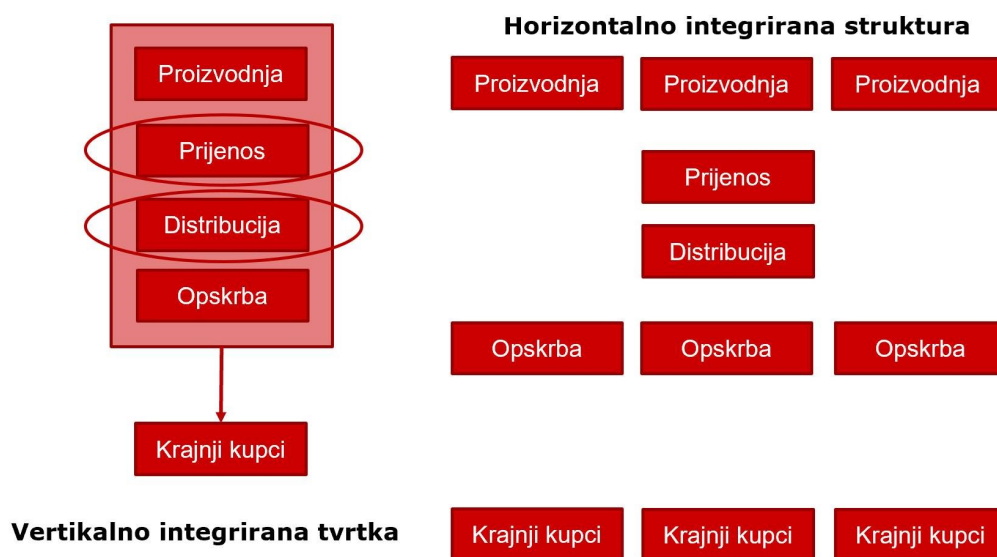
Prema [28], upravo su Europska unija (s preko 135 mil.€ budžeta u sklopu Horizon 2020 projekata vezanih za mikromreže), Sjedinjene Američke Države te Kina predvodnice u istraživanju, razvoju i primjeni mikromreža. To se može posljedično vezati i za činjenicu da navedeni ulažu mnoštvo truda u jačanje udjela obnovljivih izvora energije u ukupnom energetske miksu, a mikromreže pružaju vrlo obećavajući koncept kako ih uklopiti sigurno, pouzdano i ekonomski isplativo u sustav.



## 6. Pozadina elektroenergetske tranzicije

Razvoj tehnologije i društveno-ekonomskog uređenja uglavnom moraju biti usklađeni da bi pojedini koncepti zaživjeli i našli svoju primjenu u svakodnevnom životu. Izuzevši mikromreže koncipirane za rad na udaljenim lokacijama isključivo u otočnom načinu rada (jer niti nemaju mogućnost spajanja na ostatak mreže), monopolistički elektroenergetski sustav, baziran na fosilnim gorivima, tipičan u prošlosti nije bio izrazito plodno tlo za razmišljanja o nekim novim, inovativnim konceptima. Trendovi koji nastupaju u bližoj prošlosti otvaraju vrata istraživanju i razvoju te implementaciji mnogih modernih rješenja, među kojima je i koncept mikromreža. Štoviše, nije moderni elektroenergetski sustav razvijen radi koncepta mikromreža, već upravo suprotno. Modernom elektroenergetskom sustavu takav koncept predstavlja rješenje za integraciju distribuiranih (obnovljivih) izvora te spremnika energije u snagama i kapacitetu energije koji itekako imaju tendenciju preuzeti značajan udio u energetsom miksu. Na stranu tehnološki razvoj, započeti procesi deregulacije i liberalizacije elektroenergetskog tržišta uz javljanje razvoja ekološke osviještenosti i posljedično tomu favoriziranje obnovljivih izvora energije, pogonsko su gorivo istraživanju i integraciji inovativnih rješenja u postojeći sustav.

Devedesete godine prošlog stoljeća možemo označiti kao početak procesa deregulacije i liberalizacije u Europi. Sve započinje otvaranjem tržišta Engleske i Walesa [35] te donošenjem regulativa i smjernica na razini Europske unije o postepenom otvaranju elektroenergetskog tržišta u svim državama članicama.



Slika 6.1: Proces liberalizacije

Slika 6.1 vrlo zorno predočava kako je bilo ustrojstvo u prošlosti i kako je ono danas. Prije je, uglavnom, jedna vertikalno integrirana kompanija bila zadužena za sve karike u lancu, počevši od proizvodnje pa prijenosa, distribucije te naposljetku opskrbe do krajnjeg korisnika. Dakle, bio je čisti monopolistički sustav u kojemu je ulazna barijera bila nepremostiva za bilo koju eventualno zainteresiranu stranu. Desni dio slike 6.1 pak ilustrira u grubim crtama stanje danas. Odmah je uočljivo kako je struktura s lijeve strane razlomljena i pojedine razine nude prostor za više od jednog igrača, što prije nije bio slučaj. Odnosno, nekad jedno poduzeće je razdvojeno na više međusobno neovisnih poduzeća. Tako se proizvodna postrojenja međusobno natječu po načelima slobodnog tržišta (uz jasnu regulativu o tehničkim uvjetima), a vidimo i mnoštvo opskrbljivača koji se međusobno natječu za pružanje usluga krajnjim korisnicima. Prijenos i distribucija električne energije su ostali u domeni reguliranih djelatnosti. Analize su pokazale da prijenos nema smisla biti prepušten tržišnim načelima jer je ulazna barijera sama po sebi prevelika te ustroj u kojemu je to strogo regulirana djelatnost uz izričito svojstvo nediskriminatornosti prema igračima koji usluge prijenosa žele koristiti jamči siguran, efikasan i pouzdan način prijenosa električne energije. Nadalje, infrastruktura koja omogućuje opskrbu električnom energijom od strateške je važnosti svakoj državi (poglavito u slučajevima rata ili drugih iznenadnih situacija), te kao takva mora biti u neku ruku i pod državnom kontrolom.

Uz deregulaciju i liberalizaciju tržišta, spoj rasta ekološke osviještenosti i ubrzane penetracije obnovljivih izvora energije te komercijalno dostupna (i isplativa) rješenja spremanja električne energije drugi su skup akceleratora razvoja mikromreža. Tako čimbenici poput tendencije smanjivanja fosilnih goriva, ekološke štetnosti korištenja tih istih fosilnih goriva (emisije stakleničkih plinova, globalno zatopljenje,...), težnje energetske neovisnosti od trenutnih zemalja predvodnica u proizvodnji konvencionalnih izvora energije (a koje su često same politički nestabilne) te u krajnjoj liniji pad troškova i poboljšanje tehnologije (distribuiranih) obnovljivih izvora energije čine snažne poticaje za užurbanu energetske tranziciju.

U sklopu težnji zemalja Europske unije prema odmaku od fosilnih goriva, svakako valja izdvojiti paket "*Čista energija za sve Europljane*", znan i kao "*Zimski paket*". Paket se sastoji od osam legislativnih akata [5], među kojima i pravno obvezujuće smjernice za ispunjenje Pariškog sporazuma, a dugoročno gledano smatran je kao važan doprinos ostvarenju cilja Europske unije postizanja ugljične neutralnosti do 2050. godine. Među ciljevima paketa, u kontekstu mikromreža svakako treba izdvojiti:

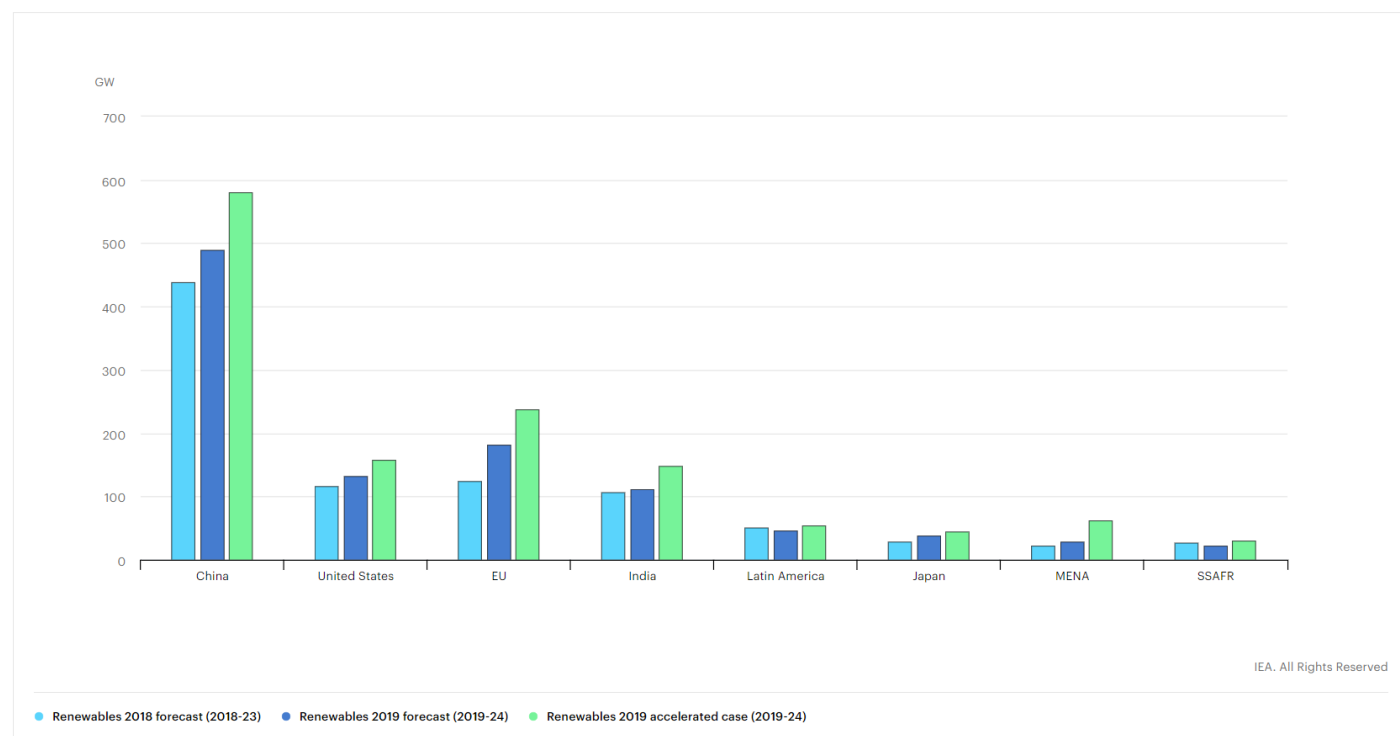
- Obvezujući cilj od minimalno 32% udjela obnovljivih izvora energije u energetske miksu do 2030. godine
- Obvezujući cilj povećanja energetske efikasnosti barem na 32.5% do 2030. godine (u usporedbi s "business-as-usual" slučajem)
- Uređenje tržišta električne energije s ciljem da postane:
  - Fleksibilnije

- Okrenuto aktivnom potrošaču (osim što troši, može i proizvoditi te prodavati el. energiju)
- Sposobno integrirati velik udio obnovljivih izvora energije

Upravo promjene u organizaciji energetskeg tržišta te jačanje naglaska na fleksibilnost i aktivnu ulogu krajnjeg korisnika tvore regulatorne preduvjete za implementaciju mikromreža, a one pak nude tehnički koncept uspješne integracije velikog udjela obnovljivih izvora energije u sustav. Osim spomenutih paketa i mjera na razini Europske unije, niti u ostatku svijeta ne manjka inicijativa koje teže energetskej tranziciji. Naravno, pitanje je koliko su uspješne i koliko su pojedine vlasti uistinu i motivirane provesti ono što najave na papiru. No bez obzira na takve dileme, potpunosti radi bit će spomenute i pojedine inicijative van okvira država članica Europske unije. Tako primjerice, prema izvješčaju Međunarodne energetske agencije iz 2019. godine [16], na Kinu bi trebalo otpasti čak oko 40% ukupnog novoinstaliranog kapaciteta obnovljivih izvora energije. Za argumente toj tezi navode poboljšanu integraciju sustava, smanjenje neiskorištenog dijela proizvedene energije te povećanje kompetitivnosti PV panela te kopnenih (eng. *onshore*) vjetroelektrana. Što se SAD-a tiče, trenutno su na federalnoj razini porezne olakšice vid poticaja ulaganju investitora u projekte zelene energije. No kako im se bliži kraj, kroz 2019. su investitori užurbano ulazili u projekte kako bi iskoristili spomenute poticaje. Nadalje, korporativni ugovori o kupoprodaji snage (eng. *corporate power purchase agreements*) te inicijative na razini pojedine države također potiču rast.

Spomenuti korporativni ugovori o kupoprodaji snage su, u ovom kontekstu, ugovori kojima kupac dogovara kupnju električne energije od proizvođača koji koristi neki od obnovljivih izvora energije. Mogu biti kratkoročni i dugoročni, a razlikuju se i po načinu realizacije. Postoji fizički oblik u kojemu generator realizira ugovor tako da uistinu kupcu isporuči traženu energiju, dok u financijskom obliku generator prodaje energiju na veleprodajnom tržištu, a ugovorne strane financijskog kupoprodajnog ugovora onda razračunavaju razliku između dogovorene cijene i cijene na veleprodajnom tržištu. Fizička realizacija može biti i koncipirana u vidu mikromreže a kupci su ponekad potaknuti stupati u takve ugovore i zbog takozvanih zelenih certifikata koji jamče o ekološki prihvatljivom porijeklu energije.

Za kraj poglavlja još vrijedi priložiti sliku 6.2. Ona ilustrira predviđanja Međunarodne energetske agencije o rastu ukupne instalirane snage obnovljivih izvora energije po pojedinim državama ili zajednicama/regijama. Uz pretpostavku da se obistini zeleni scenarij za 3 vodeće sile u prihvaćanju obnovljivih izvora energije (Kina, SAD, EU), vrijedi istaknuti i sljedeće. Prema javno dostupnim podacima Kina trenutno broji oko 1.4 milijarde žitelja [7], SAD oko 331 milijun [24] te Europska unija oko 445 milijuna [8]. Usporedivši demografske podatke s predviđenom snagom obnovljivih izvora energije, EU vodi s otprilike 560 W/perCapita, slijedi SAD s oko 540 W/perCapita dok u Kini po glavi stanovnika dolazi oko 405W instalirane snage obnovljivih izvora energije.



Slika 6.2: Rast udjela OIE po državi/regiji [16]

## 7. Primjene mikromreža - prednosti

### 7.1 Institucijske

Velike institucije koje imaju velike energetske potrebe, priliku za uštedu imaju u vidu vlastite proizvodnje. Tako recimo mogu kombinirati različite varijante potrošnje energije, od grijanja do napajanja raznih uređaja kako bi optimalno iskoristili sve resurse te čak eventualno i njihove nusproizvode. Shodno tomu, mikromreža se može sastojati od različitih obnovljivih izvora energije, energetske spremnika i, recimo, dizel generatora za slučaj kad druge opcije nisu iz nekog razloga dostupne. Naime, mnogim institucijama je od vitalne važnosti da u svakom trenutku, bez prestanka, mogu računati na sigurnu i pouzdanu opskrbu električnom energijom. Tu je prvenstveno pomisao na bolnice, a onda i recimo kontrolne tornjeve na aerodromima, zatvore,... U poglavlju 8.4 možete više doznati o uspostavljenoj mikromreži u sklopu jednog zatvora, ustanovi kojoj nestanak struje i na trenutak može predstavljati veliku opasnost. Nadalje, u sklopu europskog Horizon 2020 projekta *Elsa* uspješno je demonstriran koncept mikromreže u nerezidencijalnim ustanovama (poglavlje 8.5). Vrijedi istaknuti da, kao što je i opisano u općenitim karakteristikama, mikromreže moraju imati mogućnost rada kako u otopnom načinu rada tako i u sklopu veće mreže.

### 7.2 Vojne svrhe

Što se tiče mikromreža za vojne svrhe, tu svakako treba razlikovati dvije podvrste. Prva je ona tipična, koja je povezana s većom mrežom i mora biti zadovoljavati energetske potrebe uslijed duljeg prekida opskrbe električnom energijom. Druga podvrsta pak predstavlja one mikromreže koje a-priori rade u otopnom režimu rada jer su uspostavljene na nekoj udaljenoj lokaciji koja nema mogućnosti klasične opskrbe električnom energijom.

### 7.3 Kućanstva

Stambene četvrti, stambene zgrade ili čak i pojedinačni domovi mogu koristiti neki oblik mikromreže za zadovoljavanje vlastitih energetske potreba, snižavanje troškova te kao vid sigurnosti i stabilnosti u slučaju nepredviđenih situacija s ostatkom mreže. Samom instalacijom distribuiranih obnovljivih izvora energije u sklopu mikromreža, korisnici posljedično potpomažu i energetske tranziciju prema niskougljičnoj proizvodnji električne energije. Dileme nastaju u razmišljanjima o skaliranju same mikromreže. Dok potpuna decentralizacija na pojedina

kućanstva, dakle mikromreže iza već postojećih brojila, ima prednosti u vidu minimalnih regulatornih i zakonskih komplikacija, takav princip ima i svojih nedostataka. Ponajprije, na temelju jednog kućanstva gube se prednosti učinka *ekonomije razmjera* te diversifikacije proizvodnih postrojenja i tereta. Dakle, okrupnjavanjem, tj. okupljanjem više kućanstava (npr. ulica ili četvrt) u jedinstvenu mikromrežu mogu se smanjiti troškovi po instaliranoj jedinici snage/kapaciteta te raste pouzdanost i sigurnost opskrbe u izvanrednim situacijama (otočni rad). Kao negativne strane valja izdvojiti moguće poteškoće vezane uz trenutnu zakonsku regulativu. Između dva gore navedena vida rezidencijalnih mikromreža, nalazi se i hibridna opcija u kojoj mikromreže pojedinačnih kućanstava međusobno komuniciraju na razini, recimo, susjedstva te ta gornja razina (master) koordinira i upravlja radom podređenih jedinica (slave) - mikromrežama na razini kućanstva. Sukus svega je da implementacija mikromreže u rezidencijalne svrhe, pametnim upravljanjem, može donijeti izravnu korist njenim korisnicima, što u vidu ekonomskog blagostanja, što u vidu sigurnosti, što u vidu brige za okoliš, a i samom sustavu mogu pomoći u održavanju frekvencije i napona unutar traženih granica[31]. Zanimljiv primjer mikromreže u rezidencijalne svrhe možete naći u poglavlju 8.6. Primjer govori o nogometnom klubu na krovu čijeg su stadiona instalirani PV paneli te u kombinaciji s baterijskim spremnikom osiguravaju električnu energiju za potrebe samog stadiona, ali i za okolna kućanstva.

## 7.4 Udaljene lokacije

Kao što je rečeno u dijelu o primjenama u vojne svrhe. Mikromreže su izvrsna opcija za osiguranje opskrbe električnom energije u daleke i zabačene krajeve koji su ili skroz odsječeni od konvencionalne opskrbe ili trpe česte prekide opskrbe. Dok je to slučaj koji se vrlo vjerojatno uistinu i realizira u nekim dijelovima razvijenih država, u zemljama trećeg svijeta to je više pravilo nego li iznimka. Što se tiče razvijenih država, tu valja istaknuti geografski teže pristupačna područja poput otoka, naselja u planinama i slično. Konvencionalni, pomalo zastarjeli, pristup je bio proizvoditi prijeko potrebnu električnu energiju pomoću dizel generatora. Danas mikromreže, koje uključuju spremnike energije, distribuirane obnovljive izvore električne energije (PV paneli, vjetroelektrane,...), osiguravaju sigurniji, pouzdaniji, čišći i često (dugoročno gledano) ekonomski isplativiji način opskrbe električnom energijom za udaljene lokacije. Rudnik zlata opisan u poglavlju 8.2 izvrstan je primjer mikromreže na udaljenoj lokaciji.

## 8. Primjeri iz svijeta

### 8.1 Bordesholm, Njemačka

Bordesholm je grad u njemačkoj pokrajini Schleswig Holstein. Broji svega oko 7500 stanovnika, a zanimljiv je po tome što je u 2019. tamo izveden pokus prelaska cijelog grada u otočni način rada u trajanju od jednog sata. Naglasak pokusa je bio provjeriti može li se grad napajati isključivo kombinacijom baterijskog spremnika i obnovljivih izvora energije te je li u praksi izvediv gladak prijelaz u otočni način rada i obratno. Baterijski spremnik je imao snagu 10MW i kapacitet energije 15 MWh. Raspon usluga za koje je spremnik namijenjen ide od pružanja primarne rezerve, pružanje električne energije za prodaju te za osiguranje opskrbe električnom energijom u slučaju problema u mreži [19]. Od iznimne važnosti za projekt je bio i izbor invertera, a korišten je *Sunny Central Storage battery inverter* zajedno s upravljačem *SMA Hybrid Controller XL*. Vrijedi spomenuti i to da je navedeni inverter opremljen i "black-start" funkcijom koja za svrhu ima brzu ponovnu uspostavu opskrbe električnom energijom u slučaju neočekivanog ispada mreže. To je jamčilo da, ukoliko pokus pođe po zlu, stanovnici ostanu ne više od nekoliko minuta bez opskrbe električnom energijom. Prema [22], uspješno su se odspojili s mreže, radili u otočnom režimu rada jedan sat te potom spojili natrag na mrežu bez ikakvih poteškoća i smetnji za krajnje korisnike.



Slika 8.1: Spremnik energije u Bordesholmu [21]

## 8.2 Rudnik zlata, Zapadna Australija

Izvrstan primjer uloge mikromreže u osiguravanju nesmetane opskrbe električnom energijom na udaljenim lokacijama jest hibridna mikromreža snage 56 MW koja služi za opskrbu električnom energijom rudnik zlata u Zapadnoj Australiji. Sastoji se od vjetroelektrane instalirane snage 18 MW, solarne plantaže koja može pružati snagu od 4MW, baterijskog spremnika snage 13MW te kapaciteta 4MWh i elektrane snage 21MW pogonjene na dizel motor[1].Kako je tek nedavno mikromreža puštena u pogon punim kapacitetom, ovdje ne navodimo rezultate rada, no tvrdnja je da oko 70% energetske potreba rudnika može biti pokriveno obnovljivim izvorima energije. Tome pomažu i upravljački algoritmi koji za cilj imaju osiguranje opskrbe električnom energijom te maksimizaciju iskorištenja potencijala obnovljivih izvora energije (uz precizne alate za prognozu). Na slici 8.2 mogu se uočiti (bar jedna od) vjetroelektrana, solarno polje te spremnici energije i dizel generator.



Slika 8.2: Rudnik zlata u Zapadnoj Australiji [1]



## 8.3 Mikromreža Blue Lake Rancheria

Sljedeći primjer zorno ilustrira kako koncept mikromreže može iskazati svoje prednosti i u kritičnim trenucima kad sigurna opskrba električnom energijom nekome doslovce može spasiti život. Od 2017. godine na lokaciji Blue Lake Rancheria u pogonu je 430 kW snažno PV polje uz instaliran Teslin baterijski spremnik snage 500 kW i kapaciteta 2 kWh. Dok kao osiguranje služe dva dizel generatora ukupne snage 1.8 MW. U normalnim uvjetima, mikromreža ponajprije svoju svrhu ima u smanjenju stakleničkih plinova te smanjenju troškova opskrbe električnom energijom. Tako je odmah u prvoj godini od puštanja mikromreže u rad smanjena emisija štetnih plinova za oko 175 tona te ušteda od oko 195000 dolara. No svoju, novcem neprocjenjivu, vrijednost mikromreža je prikazala kada je distribucijska mreža odspojena zbog požara koji su vladali u regiji te je ranč primio lokalno stanovništvo i pružio potrebitima sve usluge koje zahtijevaju stabilnu opskrbu električnom energijom. Naravno, najplastičniji primjer po život važnih karakteristika mikromreže bi bilo u sklopu neke bolnice, no i ovdje se može uvidjeti što znači imati decentraliziran oblik izvora energije u kritičnim trenucima.



Slika 8.3: Blue Lake Rancheria, fotografija u vlasništvu Siemens grupacije

## 8.4 Zatvor Santa Rita

Institucije poput zatvora moraju u svakom trenutku imati osiguranu opskrbu električnom energijom. Naime, u slučaju nestanka energije, može doći do nereda, bježanja zatvorenika te posljedično i ljudskih žrtava. Ovisno o korištenoj tehnologiji, o električnoj mreži može biti ovisno sve od nadzorne i komunikacijske strukture pa do samog (daljinskog) zaključavanja vrata. Do implementacije mikromreže, zatvor Santa Rita je patio od povremenih ispada mreže te slabe kvalitete opskrbe općenito. Iz tog razloga su se uzdali u nepogrešiv rad dizel generatora, kojima je pak uvijek trebalo oko 10 sekundi da se upogone po padu mreže, a solarni paneli i gorive ćelije nisu mogli paralelno raditi s generatorom zbog lošeg rješenja o održavanju konstantnog napona i frekvencije primitivne mikromreže prilikom paljenja generatora. Štoviše, frekvencija generatora sam po sebi nije bila stabilna te je i on izazivao probleme... Poboljšana mikromreža uključuje gorive ćelije snage 1MW, PV panele snage 1.2 MW, baterijski spremnik snage 2MW i kapaciteta 4MWh te dva dizel generatora svaki snage 1.2MW. Uz brzu statičku sklopku i pomno dizajniran upravljački algoritam, mikromreža zadovoljava najstrože uvjete za prelazak u otočni rad te kasniju resinkronizaciju na mrežu[27].

## 8.5 E.ON ERC Microgrid

Sveučilište RWTH, Aachen u Njemačkoj je kao aktivni sudionik Horizon 2020 projekta Elsa, pružilo dio svoje infrastrukture u svrhu poligona za testiranje razvijenih modela u realnim uvjetima, Naime, naglasak projekta je bio na razvijanju rješenja s distribuiranim spremnicima energije (malih do srednje velikih kapaciteta) kao pouzdanu potporu integraciji obnovljivih izvora energije. Demonstracijsko područje koje je RWTH ustupio uključuje 3 zgrade, vjetroelektranu, PV panele te bateriju. Međusobno su sve sastavnice povezane te dinamički upravljane. Svrha mikromreže je da podnese volatilnost obnovljivih izvora energije te da ima sposobnost odgovarati na zahtjeve operatora distribucijskog sustava. Tako najveća od tri zgrade ima mogućnost donekle prilagođavati svoje energetske zahtjeve kroz kombiniranu proizvodnju snage i topline. Generirana snaga se može ili pružati sustavu ili pomoću nje pogoniti toplinsku pumpu za grijanje, odnosno hlađenje zgrade. Projekt se pokazao uspješnim, pokazao je iskoristivost rabljenih baterija (korištene su baterije iz automobila Renault Kangoo, ukupnog kapaciteta 96 kWh) te ekonomske uštede i smanjenje emisija štetnih plinova.

## 8.6 Odd nogometni klub

Uprava nogometnog kluba Odd u Norveškoj razmišljala je kako pametno iskoristiti slobodnu površinu krova njihovog stadiona. U suradnji s tvrtkom ABB su dogovorili koncept mikromreže koja ima za svrhu opskrbljivati stadion električnom energijom te okolnih 15-ak kućanstava. Po

cijeloj površini krova instalirali su PV panele. Moduli su rasprostranjeni na 5700 kvadratnih metara te imaju maksimalnu instaliranu snagu od 800 kWp. Uz to, instaliran je i baterijski spremnik snage 800 kW i kapaciteta 1000 kWh. Načelna svrha je zadovoljiti godišnju potrošnju stadiona koja iznosi oko 375 MWh, pružati uslugu opskrbe električnom energijom prema 15-ak kućanstava u okolici te pružati dovoljnu snagu (i količinu energije) za napajanje osvjetljenja stadiona tokom utakmica. Implementacija i rad cjelokupnog projekta je pod lupom tvrtke ABB, energetske ustanove u Norveškoj te istraživačke zajednice u težnji za boljim i dubljim shvaćanjem kako se takav sustav *prosumera* (aktivni korisnik) ponaša u različitim uvjetima koji ga mogu zateći.



Slika 8.4: Nogometni stadion kluba Odd [2]

Slika 8.4 zorno prikazuje spomenute PV module instalirane po cijeloj površini Skagerak Arena stadiona.

## 9. Uloga pretvarača

Static disconnect switch je ključna komponenta za prelazak u otočni rad i sinkronizaciju. Može biti isprogramiran da djeluje vrlo brzo po otkriću prenapona, podnapona, previsoke frekvencije, preniske frekvencije i/ili previsoke struje [31]. Mikromreža na ostatak mreže može biti spojena sinkronom AC vezom, ali i raznim pretvaračima. Dok je prva opcija možda jednostavnije rješenje, druga opcija izolira mikromrežu obzirom na kvalitetu snage (frekvencija, napon, harmonici)[31]. Štoviše, većina tereta i distribuiranih izvora energije radi u DC načinu, tako se mogu smanjiti i gubici ako je cijela mikromreža ustrojena na jednosmjernan način rada. Praktično gledano, eventualni kvar unutar DC mikromreže vrlo lagano se izolira blokirajućom diodom, dok u AC sustavu zbog karakteristika izmjeničnog prijenosa energije to nije slučaj. Vrijedi svakako istaknuti nepobitno veliku ulogu pretvarača u svakodnevnom uspješnom radu mikromreže. Kao jedna od ključnih komponenti za uspjeh samog projekta, od velike je važnosti posvetiti izboru prikladnog pretvarača za pojedinu svrhu dovoljno vremena te analizirati što detaljnije moguće situacije koje bi odabrani pretvarač trebao uspješno prebroditi. No više o funkcionalnosti pretvarača, njihovim tehničkim karakteristikama i načinu primjene u drugim izvještajima.

## 10. Otvorena pitanja

### 10.1 Zakonska regulativa

Ovisno koji se kontinent promatra, odnosno koja država ili zajednica država uređuje zakonsku regulativu vezanu za nadležnost mikromreža, mogla bi se naći različita razmišljanja kako gledati na mikromrežu koja sudjeluje kao jedna cjelina na tržištu. Smjestiti ju u neku od do sad razvijenih uloga te tako regulirati trgovinu, proizvodnju i distribuciju električne energije, ili se okrenuti nekim novim rješenjima. U svakom slučaju, vrlo je bitno ugraditi opseg djelovanja i samu definiciju mikromreža u zakonsku regulativu kako bi takvi projekti bili što pristupačniji investitorima. Gledamo li, recimo, iz prizme da mikromreža pruža usluge opskrbe električnom energijom prema više nepovezanih korisnika preko nekakvog prijenosnog kabla, tad ima smisla definirati ju kao opskrbljivača i regulirati istim zakonskim okvirom kao i regularne opskrbljivače. Isto tako može biti definirana i kao distribucijsko poduzeće koje tada ima obvezu pružati uslugu na temelju pisanog ili usmenog zahtjeva potencijalnog korisnika.

Tu se nadovezuje regulativa o spajanju distribuiranih izvora energije na (distribucijsku) mrežu. Jedna od najbitnijih činjenica vezanih za nju jest standardizacija svih bitnih protokola kako bi troškovi razvijanja mikromreže bili što manji. Recimo *IEE 1547.4* iz 2011. uključuje protokole i smjernice za planiranje, dizajn, rad i integraciju distribuiranih izvora energije u veću (distribucijsku) mrežu [31]. Pod gore navedeno spadaju i regulacije rada u otočnom režimu, paralelno s mrežom te prijelaza iz jednog režima u drugi, pritom imajući uvijek u vidu dopuštene granice za frekvenciju, napon te fazni kut.

Nameće se i pitanje o vlasništvu jedinica koje čine mikromrežu. Među mogućim rješenjima koja su u prošlosti analizirana, ovdje su navedena, prema uzoru na EU projekt "*More Microgrids*" [15] ona u kojima vlasnik može biti:

- Operator distribucijskog sustava
- Krajnji korisnik
- Neovisni proizvođač električne energije
- Opskrbljivač električnom energijom

Svaka od gore navedenih opcija ima svoje prednosti i mane te, uz poštivanje zakonske regulative, različiti slučajevi mogu za optimalni način vlasništva imati različita rješenja vlasničke strukture. Primjerice, prema istraživanju iz 2016. godine [29], većina mikromreža koja su spojena na distribucijsku mrežu su bila u vlasništvu i financirana od strane krajnjih korisnika.

Odnosno, preciznije rečeno - institucija. Takav rezultat je nimalo iznenađujući, uzevši u obzir činjenicu da primjenom koncepta mikromreže institucije imaju priliku značajno sniziti svoje troškove opskrbe električnom energijom te u isto vrijeme osigurati veću stabilnost i sigurnost uslijed neočekivanih poteškoća "vanjske" mreže na koju su spojeni.

## 10.2 Utjecaj na tradicionalne opskrbljivače

Ideja mikromreža ima prije svega za svrhu osiguranje opskrbom električne energije na lokacijama gdje je ona zbog raznoraznih razloga nesigurna. Nadalje, pruža korisnicima mogućnost uštede kombinirajući vlastite distribuirane izvore energije, spremnike te usluge konvencionalnih opskrbljivača. Dobrom koordinacijom s operatorima distribucijskih sustava, mikromreže mogu i pripomoći u očuvanju sustava u dozvoljenim granicama napona i frekvencije. Ono što tradicionalni opskrbljivači mogu doživjeti kao prijetnju jest potpuno odvajanje korisnika mikromreže od konvencionalnog sustava. Drugim riječima, konstantni boravak u otočnom načinu rada gledano prema ostatku mreže. Takav ishod im nanosi velike financijske poteškoće, a krajnjim korisnicima (koji nisu dio neke mikromreže) i poskupljenja električne energije, što vodi do potpune neisplativosti generacije. Kako do tog, ipak vrlo hipotetskog, slučaja ne bi došlo, tradicionalni opskrbljivači imaju priliku, ali i obvezu uključiti se u razvijanje nove paradigme uvelike distribuiranog elektroenergetskog sustava te naći poslovnu strategiju koja i njima donosi boljitak. Članak [32] se bavi upravo pitanjem koliko je realno da dođe do scenarija u kojemu pojedinci ili čak i skupine u potpunosti napuštaju mrežu i prelaze u neki vid otočnog načina opskrbljivanja električnom energijom. Autori takav scenarij nazivaju "spiralom smrti" za opskrbljivače jer, kao što je već i navedeno, takav scenarij za posljedicu ima povećanje troška energije za korisnike koji se nisu odvojili od mreže te će im svakim daljnjim poskupljenjem odvajanje biti sve isplativija opcija. Takvim pristupom će se domino-efektom u ekstremnom slučaju svi odvojiti od mreže i osuditi opskrbljivače na propast. Autori dalje u članku opisuju razvijeni mixed-integer linear program koji za cilj ima korisniku ponuditi ekonomski optimalnu odluku za neki vremenski horizont. Rezultati su pokazali da i uz padajuće cijene, kombinacija PV panela i baterijskog spremnika zahtijeva vrlo velike kapitalne troškove kako bi se osigurala sigurna opskrba energijom u većini slučajeva, no i dalje je mogućnost manjka električne energije u pojedinim satima vrlo izvjesna. Drugim riječima, mikromreža ima moć utjecati na smanjenje potrošnje energije koja dolazi konvencionalnim putem, ali i dalje se isplati koristiti usluge opskrbljivača.

## 10.3 Integracija mikromreža

Gorući problem, no prije svega izazov i zadatak kako za akademsku, tako i za industrijsku zajednicu predstavlja sve izraženija i agresivnija potreba za integracijom mikromreža u sustav, ponajprije zbog penetracije obnovljivih izvora energije. Pandorina kutija sadržava od tehničkih

i regulatornih pitanja do ekonomskih. Za globalni uspjeh koncepta, nužno je naći odgovore na sva ta pitanja koja trenutno kočé daljnji razvoj.

## 10.4 Konkurentski koncepti

Uz razvijanje mikromreža, stručnjaci iz akademske i industrijske zajednice proučavaju i druge mogućnosti kako bi sutrašnjica u elektroenergetskom svijetu mogla izgledati. Prije svega treba naglasiti kako kolokvijalno nazvani konkurentski koncepti nisu međusobno isključivi, nego se u pojedinim slučajevima mogu i izvrsno nadopunjavati. Ubrzani razvoj komunikacijske infrastrukture i tehnologije, poput *Internet of Things* (IoT) potpomažu razvoju mikromreža, ali i koncepta poput *virtualnih elektrana* te *pametnih supermreža*. Kao argument međusobnoj neisključivosti služi i činjenica da virtualne elektrane možemo zamisliti i kao sastavni dio mikromreže. Naime, to je koncept koji se bazira na agregiranju mnoštva distribuiranih izvora energije malih snaga te nastupu na tržištu kao jedinstvena cjelina nezanemarive snage i kapaciteta.

## 11. Zaključna razmatranja

Izveštaj D1.4.1 uključuje tehničku analizu sastavnica mikromreže te općeniti uvod u samu definiciju mikromreže, kao i primjere njene primjene. Tako prva tri poglavlja ukratko analiziraju istosmjerne terete, uređaje za pohranu energije te uređaje za proizvodnju električne energije. U nastavku se поближе opisuje koncept mikromreže te razne mogućnosti gdje njena primjena donosi pogodnosti sustavu. Iz izvještaja je vidljivo kako za uspješnu integraciju velikog udjela obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sustav, mikromreže predstavljaju vrlo dobro rješenje. Naime, decentraliziranom arhitekturom, distribuiranim izvorima energije i spremnicima energije sprječavaju negativan utjecaj na sustav uzrokovan nepredvidivosti i isprekidanosti rada obnovljivih izvora energije. Štoviše, u poglavljima 6. i 7. mogu se jasno uočiti prednosti koje takav koncept može donijeti u raznim područjima, od opskrbe električnom energijom udaljenih lokacija (primjer je bio rudnik zlata) do pružanja pomoćnih usluga, smanjenja ekonomskih troškova i osiguranja u slučaju problema s ostatkom mreže (kombinacija otočnog rada i paralelnog rada s mrežom).

Još predstoji puno znanstvenog rada na temu mikromreža kako bi se u potpunosti ispunio potencijal koji taj koncept donosi. Od razmatranja optimalnih zakonskih regulativa i intenzivnog istraživanja i razvoja tehnologija (učinska elektronika, spremnici energije, ...) koje su ključne sastavnice mikromreže pa do razvoja inovativnih poslovnih modela i strategija nastupa na tržištu, pritom uvijek imajući na umu prije svega sigurnost i pouzdanost opskrbe električnom energijom.

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



# Literatura

- [1] 56 MW hybrid microgrid powers up at Western Australian gold mine – pv magazine Australia.
- [2] ABB technology powers soccer club’s Skagerak Arena in Norway.
- [3] BMS (Battery Management System) : Embeds core intelligence of PowerRack system  
PowerRack system composition : ENERGY STORAGE MODULES 2.56 kWh BMS\*  
MODULE \*Battery Management System Modular Lithium-Ion Energy Storage System.  
Technical report.
- [4] China Wind Generator, Wind Generator Manufacturers, Suppliers, Price | Made-in-China.com.
- [5] Clean energy for all Europeans package | Energy.
- [6] Cyberattack on Critical Infrastructure: Russia and the Ukrainian Power Grid Attacks - The Henry M. Jackson School of International Studies.
- [7] Demographics of China - Wikipedia.
- [8] Demographics of the European Union - Wikipedia.
- [9] Different Types of Batteries and their Applications.
- [10] EA-EL 9000 B 1.2 kW-14.4 kW. Technical report.
- [11] EVD1S24THB - Fast charging station, EVlink, DC fast charger, 24 kW, SAE CCS / CHAdeMO connectors, wall mount | Schneider Electric Global.
- [12] First on CNN: U.S. investigators find proof of cyberattack on Ukraine power grid - CNNPolitics.
- [13] Fuel Cell Stacks.
- [14] Horizontal Axis Wind Turbine VS Vertical Axis Wind Turbine - AEOLUS Wind Energy.
- [15] More Microgrids | JRC Smart Electricity Systems and Interoperability.
- [16] Renewables 2019 – Analysis - IEA.
- [17] Solarni paneli MONO 5W-300W: Solar Shop.

- [18] Solarni paneli POLY 5W-300W: Solar Shop.
- [19] Storage systems with SMA battery inverters enable stable power supply using renewable energies | SMA Solar.
- [20] TECHNOLOGY - NUVVE Corp.
- [21] The Bordesholm stand-alone grid ensures power supply even in the event of a grid failure - Sunny. The SMA Corporate Blog.
- [22] Town in Germany Uses 100% Renewable Energy for an Hour as It Disconnects from Grid.
- [23] Types of DC Motors And Their Applications | Electrical4U.
- [24] United States Population (2020) - Worldometer.
- [25] FUEL CELL TECHNOLOGIES PROGRAM, 2 2011.
- [26] XT Supercapacitors Snap-in cylindrical cells. Technical report, 2018.
- [27] Eduardo Alegria, Tim Brown, Erin Minear, and Robert H. Lasseter. CERTS microgrid demonstration with large-scale energy storage and renewable generation. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(2):937–943, 2014.
- [28] Amjad Ali, Wuhua Li, Rashid Hussain, Xiangning He, Barry W. Williams, and Abdul Hameed Memon. Overview of current microgrid policies, incentives and barriers in the European Union, United States and China. *Sustainability (Switzerland)*, 9(7), 2017.
- [29] Peter Asmus and Mackinnon Lawrence. Emerging Microgrid Business Models. *Navigant*, page 14, 2016.
- [30] Véronique Boutin, Mark Feasel, Kevin Cunic, and Jean Wild. How Microgrids Contribute to the Energy Transition. *Schneider Electric*, page 7, 2016.
- [31] Adam Hirsch, Yael Parag, and Josep Guerrero. Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90(September 2017):402–411, 2018.
- [32] Rajab Khalilpour and Anthony Vassallo. Leaving the grid: An ambition or a real choice? *Energy Policy*, 82(1):207–221, 2015.
- [33] Géraldine Merle, Matthias Wessling, and Kitty Nijmeijer. Anion exchange membranes for alkaline fuel cells: A review, 7 2011.
- [34] Chong H. Ng, Max A. Parker, Li Ran, Peter J. Tavner, Jim R. Bumby, and Ed Spooner. A multilevel modular converter for a large, light weight wind turbine generator. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23(3):1062–1074, 5 2008.

- [35] J Shikoski and V Katic. Deregulation of the Power Industry in Europe. *Emo.Org.Tr*, 1999.
- [36] A Shokuhi-Rad, N Nariman-Zadeh, and M Naghash-Zadegan. *Model Development and Optimization Base on Generalized Steady-State Electrochemical Equations for a PEM Fuel Cell*.