

Brodске istosmjjerne mikromreže

Curać, Marin

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:110841>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-17**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

MARIN CURAĆ

BRODSKE ISTOSMJERNE MIKROMREŽE

DIPLOMSKI RAD

Rijeka, 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

**BRODSKE ISTOSMJERNE MIKROMREŽE
MARITIME DIRECT CURRENT MICROGRIDS**

DIPLOMSKI RAD

Kolegij: Brodske elektroenergetske mreže

Mentor: izv. prof. dr. sc. Aleksandar Cuculić

Student: Marin Curać

Studijski smjer: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0069076607

Rijeka, srpanj 2023.

Student: Marin Curać

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

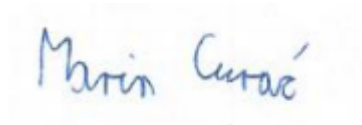
JMBAG: 0069076607

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI DIPLOMSKOG RADA

Kojom izjavljujem da sam diplomski rad s naslovom **Brodske istosmjerne mikromreže** izradio samostalno pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Aleksandra Cuculića.

U radu sam primijenio metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio/la literaturu koja je navedena na kraju diplomskog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u diplomskom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezao s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student



Marin Curać

Student: Marin Curać

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0069076607

IZJAVA STUDENTA – AUTORA
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG DIPLOMSKOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor diplomskog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa diplomskim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog diplomskog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student - autor

A handwritten signature in blue ink that reads "Marin Curać". The signature is written in a cursive style and is positioned below the text "Student - autor".

SAŽETAK

U ovom je radu opisan način funkcioniranja brodskih istosmjernih mikromreža. Razrađeni su osnovni koncepti istosmjernog razvoda, što uključuje samu definiciju mikromreže, te prednosti odnosno nedostatke korištenja istosmjernog razvoda nad izmjeničnim razvodom na brodu. Govoreći o mikromrežama, opisane su koristi mikromreža van pomorstva, kao i način upravljanja njima. Opisane su sklopne tehnike istosmjernog razvoda i razni tipovi prekidača. Nadalje, razmatrana su baterijska skladišta energije kao jedan od načina plovidbe. Rad također razrađuje tematiku energetske pretvarača kao način prijenosa energije. Definirani su načini spajanja brodskih istosmjernih mreža sa kopnenim sustavima, od kojih svaki način ima svoje prednosti i mane. U zaključku je objašnjena trenutna situacija, kao i budućnost istosmjernog razvoda u pomorstvu. Zaključak također na sažet način sintetizira cijeli rad te daje generalnu sliku i pregled brodskih istosmjernih mikromreža.

Ključne riječi: brod, kopneni sustavi, istosmjerni razvod, mikromreže, skladište energije

SUMMARY

In this thesis, the mode of functioning of maritime DC microgrids is described. The basic concepts of direct current distribution have been elaborated, which includes the very definition of microgrid, and the advantages and disadvantages of using direct current distribution over alternating current distribution on board. Speaking of microgrids, uses of microgrids outside of maritime activity is explained, as well as their control scheme. Switching techniques of direct current distribution and various types of switches are described. Furthermore, battery energy storage was considered as one of the ways of navigation. The thesis also elaborates on the topic of energy converters as a way of transferring energy. The methods of connecting the ship's direct current networks with land systems are defined, each of which has its own advantages and disadvantages. Conclusion elaborates the current situation as well as the future of direct current distribution in maritime affairs. The conclusion also summarizes the entire paper in a concise manner and provides a general picture and overview of maritime DC microgrids.

Keywords: ship, land systems, direct current distribution, microgrids, energy storage

SADRŽAJ

SAŽETAK.....	II
SUMMARY.....	II
SADRŽAJ	III
1. UVOD.....	1
1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA.....	1
1.2. RADNA HIPOTEZA	1
1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA	2
1.4. ZNANSTVENE METODE	2
1.5. STRUKTURA RADA.....	2
2. OSNOVNI KONCEPTI DC RAZVODA NA BRODU.....	4
2.1. POVIJEST ISTOSMJERNOG RAZVODA NA KOPNU	4
2.2. POVIJEST ISTOSMJERNOG RAZVODA NA BRODU.....	5
2.3. RAZLIKE IZMEĐU DC I AC RAZVODA NA BRODU.....	5
2.3.1. <i>Izmjenična brodska mreža</i>	<i>5</i>
2.3.2. <i>Istosmjerna brodska mreža.....</i>	<i>6</i>
3. MIKROMREŽE	8
3.1. PROBLEMATIKA MIKROMREŽA.....	8
3.2. MIKROMREŽE - ARHITEKTURA PRSTENASTE SABIRNICE.....	9
3.3. ISTOSMJERNI ZONSKI ELEKTRIČNI SUSTAV	10
3.4. UPRAVLJANJE MIKROMREŽAMA.....	11
3.3.1. <i>Hijerarhijsko upravljanje</i>	<i>11</i>
3.3.2. <i>Centralizirano upravljanje</i>	<i>12</i>
3.3.3. <i>Decentralizirano upravljanje.....</i>	<i>13</i>
3.3.4. <i>Distribuirano upravljanje</i>	<i>13</i>
3.4. KONTROLA PADA BRZINE – DROOP CONTROL	14
3.4.1. <i>Računanje droopa.....</i>	<i>14</i>
3.5. RAZLIKE IZMEĐU AC I DC MIKROMREŽA.....	15
3.5.1. <i>Prednosti DC mikromreža</i>	<i>15</i>
3.5.2. <i>Nedostaci DC mikromreža.....</i>	<i>16</i>
3.6. PRIMJENE DC MIKROMREŽA U INDUSTRIJI.....	18
3.6.1. <i>Primjene u pomorstvu.....</i>	<i>18</i>
3.6.2. <i>Primjene u prometu</i>	<i>19</i>

3.7.3. Podatkovni centri.....	19
3.7.4. Primjene u zgradama	20
3.7.5. Osvjetljenje javnih površina i cesta.....	20
3.7.6. Električna vozila i stanice za punjenje	21
3.7.7. Primjene u industriji.....	21
3.7.8. Tablica usporedbe	22
3.7. POMOĆNE USLUGE	22
4. SKLOPNA TEHNIKA I ZAŠTITE NA DC RAZVODU	25
4.1. NISKONAPONSKI PREKIDAČI	25
4.1.1. Zračni prekidači.....	26
4.1.2. Kompaktni prekidači.....	29
4.1.3. Mali prekidači.....	30
4.2. SOLID STATE PREKIDAČI.....	31
4.2.1. Z-source SSCB	32
4.2.2. SiC JFET.....	33
5. SKLADIŠTA ENERGIJE.....	34
5.1. ZAMAŠNJACI.....	34
5.2. SUPERKONDENZATORI	36
5.3. ELEKTROKEMIJSKE BATERIJE	37
5.3.1. Olovni akumulatori	37
5.3.2. Nikal-kadmij (NiCd) baterije	38
5.3.3. Litij-ionske baterije.....	39
5.3.4. Natrij-nikal-klorid (NaNiCl) baterije	40
6. ENERGETSKI PRETVARAČI.....	41
6.1. IZMJENIČNO-ISTOSMJERNI PRETVARAČI	41
6.2. ISTOSMJERNO-IZMJENIČNI PRETVARAČI	42
6.3. ISTOSMJERNO-ISTOSMJERNI PRETVARAČI	44
6.3.1. Pretvarač za sniženje napona (Buck converter)	44
6.3.2. Pretvarač za povećanje napona (Boost converter).....	45
6.3.3. Pretvarač za povećanje i snižavanje napona (Buck-boost converter).....	46
7. SPAJANJE BRODSKE DC MREŽE I KOPNENOG SUSTAVA	48
7.1. ISTOSMJERNI PRIKLJUČAK ZA PUNJENJE BRODOVA S ISTOSMJERNOM SABIRNICOM	48
7.2. IZMJENIČNI PRIKLJUČAK ZA PUNJENJE BRODOVA SA ISTOSMJERNOM SABIRNICOM	49
8. ZAKLJUČAK	51
POPIS LITERATURE.....	52

KAZALO KRATICA.....	57
POPIS ILUSTRACIJA.....	59
POPIS TABLICA.....	61
POPIS FORMULA	62

Ovim putem zahvaljujem se roditeljima i prijateljima na podršci kroz moje sveukupno akademsko putovanje. Posebna zahvala mentoru izv. prof. dr.sc. Aleksandru Cuculiću za dostupnost i pomoć prilikom pisanja rada.

1. UVOD

Istosmjerni razvod na brodu nije novi koncept. Prvi brod s istosmjernim razvodom u svrhu osvjjetljenja bio je „SS Colombia“ 1880. godine [1], dok je 2015. godine napravljen prvi brod sa stopostotnim baterijskim skladištem energije. Nedavno, nakon dugačke pauze, istosmjerni razvod je napravio povratak i u kopnenim industrijama i na brodovima. Naprimjer, HVDC (eng. *High Voltage Direct Current* – Visokonaponsko istosmjerni) sustav prijenosa energije može prenijeti više električne energije nego slični AC (engl. *Alternating Current* – Izmjenična struja) sustavi, zbog toga što nema gubitke zbog reaktancije. DC razvod se također sve više počinje koristiti u svemirskim stanicama, avionima, električnim vozilima, a nedavno i brodovima. Rad se bazira na objašnjavanju pojma mikromreže u istosmjernim brodskim sustavima i ostalim podsustavima kao što su prekidači, spajanje s kopnom, skladišta energije i sl. Analizirano je zašto su mikromreže bitne za elektroenergetske sustave diljem svijeta.

1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA

Predmet istraživanja ovog preglednog rada je objasniti pojam mikromreže, zašto se koriste, i koje su im prednosti odnosno nedostaci kada se koriste u istosmjernom razvodu. Svi podsustavi mikromreža, od prekidača preko energetske pretvarača i spajanja sa kopnenim sustavima biti će objašnjeni i potkrijepljeni dokazima i ilustracijama.

1.2. RADNA HIPOTEZA

Radna hipoteza ovog rada je : „, *Potencijal korištenja brodskih istosmjernih mikromreža se tek otkriva, i ovaj sustav napajanja, odnosno prijenosa energije može zamijeniti tradicionalne izmjenične mreže i mikromreže.*“

1.3.SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Cilj, odnosno svrha ovog istraživanja je dokazati i predočiti čitatelju pregledni rad o brodskim istosmjernim mikromrežama, te zašto se iste koriste.

1.4.ZNANSTVENE METODE

Znanstvene metode koje su korištene u ovom radu jesu: metoda promatranja, deduktivna metoda, metoda analize i sinteze, te metoda deskripcije.

1.5.STRUKTURA RADA

Diplomski rad podijeljen je u sedam dijelova koji su međusobno povezani i sustavno upoznaju čitatelja s svim potrebnim znanjima za upoznavanje koncepta istosmjernog razvoda na brodu i brodskih istosmjernih mikromreža.

Prvi dio: Prvi dio je Uvod i u njemu su opisani problem, predmet i objekt istraživanja. Potom je dana radna hipoteza, svrha i ciljevi istraživanja te znanstvene metode koje su korištene. Na kraju se nalazi struktura rada.

Drugi dio: „Osnovni koncepti DC razvoda na brodu“ daje generalnu sliku te objašnjava čitatelju zašto se i kako koriste istosmjerni sustavi na brodu. Također je dan uvod u osnovne načine rada istosmjerne električne energije, te prednosti i mane korištenja istosmjernog nadizmjeničnim razvodom na brodu.

U trećem dijelu naslova „Mikromreže“ se detaljno objašnjava što su mikromreže, čemu služe, te kako se koriste. Objašnjene su razne topologije brodskih mikromreža, te ostale primjene mikromreža van pomorske industrije.

Četvrti dio naslova „Sklopna tehnika i zaštite na DC razvodu“ objašnjava problematiku sa prekidačima istosmjernih razvoda na brodu, kao i razne zaštitne sklopove u svrhu očuvanja same električne centrale kao i ljudskog života.

Peti dio naslova „Skladišta energije“ objašnjava više tehnika na koji se način energija može skladištiti. Svaki od ovih načina je objašnjen te su iznesene prednosti i mane svakog načina.

U šestom dijelu naslova „Energetski pretvarači“ je pregledno opisano što su energetski pretvarači, zašto se koriste i kakvi sve tipovi pretvarača postoje.

Sedmi dio naslova „Spajanje brodskih DC mreža i kopnenog sustava“ objašnjava način spajanja brodske infrastrukture sa kopnenom infrastrukturom te objašnjava načine kako se to događa.

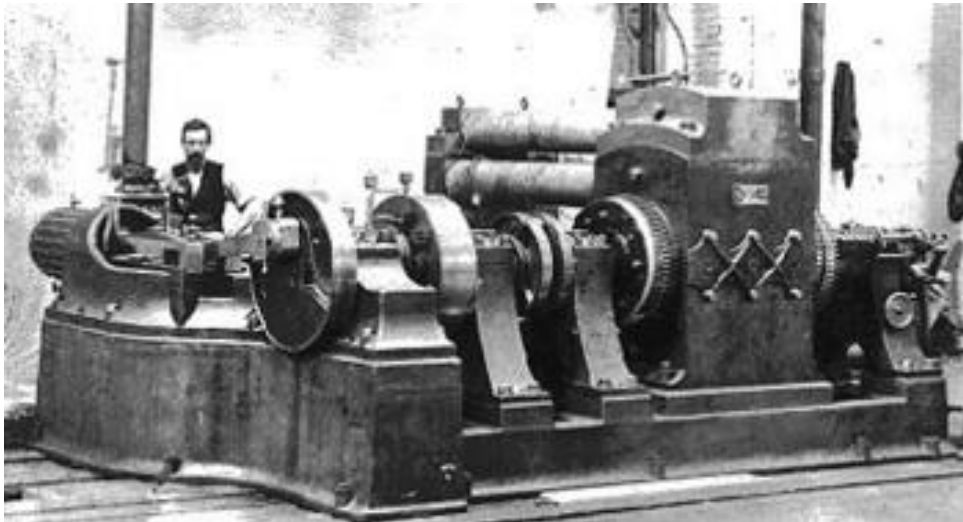
„Zaključak“ je osmi dio ovog rada u kojem su iznesene najbitnije informacije iz svih navedenih dijelova, te se potvrđuje radna hipoteza. Također se govori o budućnosti istosmjernog razvoda na brodovima.

2. OSNOVNI KONCEPTI DC RAZVODA NA BRODU

Kao što je već rečeno, koncept istosmjernog razvoda na brodu nije nova ideja, ali tek u novije vrijeme je dobila na značenju, zbog sve jačeg razvijanja istosmjernog razvoda. Kako bi se približila problematika, u nastavku poglavlja opisana je povijest istosmjernih kopnenih i brodskih mreža, i prednost korištenja istosmjernih nad izmjeničnim mrežama.

2.1. POVIJEST ISTOSMJERNOG RAZVODA NA KOPNU

Svi praktični izumi su počeli s istosmjernom električnom energijom. Izumi znanstvenika kao što su Volta ili Ampere su započeli s istosmjernom električnom energijom [2]. Prvu električnu centralu na svijetu napravio je Thomas Edison u New Yorku 1882. godine [3]. Napajala je okolicu u radijusu od oko 1.6 kilometara naponom od 110 V. Edison je imao istosmjerne generatore napajane pomoću parnih strojeva, kao što se vidi na Slici 1.



Slika 1 - Thomas Edison i istosmjerni generator

Izvor: <https://ethw.org/w/images/1/14/Pearl2.jpg>

2.2. POVIJEST ISTOSMJERNOG RAZVODA NA BRODU

Kao što je već rečeno, prvi poznati električni sustav (za rasvjetu) implementiran na brodu bio je istosmjerni sustav dizajniran za komercijalni brod „SS Columbia“. Prvi električni pogon prvi je put primijenjen za mornarička plovila, „Vandal“ i „USS Jupiter“, ranih 1900-ih [4]. Kako su kopnene električne mreže težile korištenju izmjeničnih sustava u distribuciji električne energije, tako je i pomorska industrija prihvatila izmjenične sustave zbog lakšeg pristupa električnoj opremi. Originalni istosmjerni sustavi su nakon toga ukinuti za novije brodove, a najčešće korišteni sustavi su izmjenične mreže od 440 V, 690 V, 3,3 kV, 6,6 kV i 11 kV.

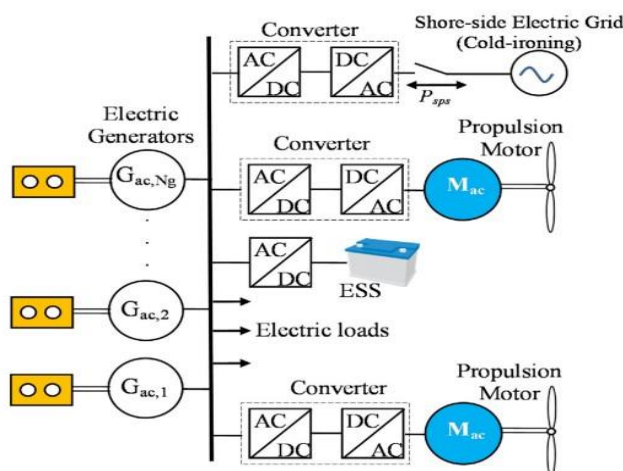
2.3. RAZLIKE IZMEĐU DC I AC RAZVODA NA BRODU

Brodski istosmjerni razvod može biti promatran kao ekstenzija više istosmjernih veza koje su bitni dio pretvarača frekvencije u propulziji i pogonskim uređajima na IFEP (engl. *Integrated Full Electric Propulsion* – Kompletno integrirana električna propulzija) brodovima. Budući da ovi pogonski uređaji čine preko osamdeset posto potrošnje električne energije na brodu, cilj je ujediniti sve istosmjerne veze u jednu zajedničku istosmjernu sabirnicu. Ovaj koncept sadržava sve komponente kao što su izmjenični generator, izmjenični motori itd. ali bez glavne izmjenične razvodne ploče i propulzijskih transformatora [5].

2.3.1. Izmjenična brodska mreža

U izmjeničnoj brodskoj mreži pretvarač frekvencije (koji se sastoji od ispravljača i izmjenjivača) koristi se za kontrolu brzine vrtnje indukcijskog ili sinkronog motora. Dakle, izmjenični napon se ispravlja u istosmjerni, pa se izmjenjuje natrag u izmjenični napon. Kod istosmjerne mreže, na strani motora potreban je samo izmjenjivač, dok je ispravljač premješten na stranu gdje sinkroni generator daje energiju. Iako su propulzijski transformatori izostavljeni, HV/LV(eng. *High Voltage/Low Voltage* – Visoki napon/Niski napon) transformatori su zadržani za niskonaponske mreže te su napajani preko izmjenjivača na zajedničkoj istosmjernoj sabirnici[6].

Slika 2 prikazuje tipični prikaz izmjenične mreže na brodovima.



Slika 3 – Konfiguracija izmjenične mreže

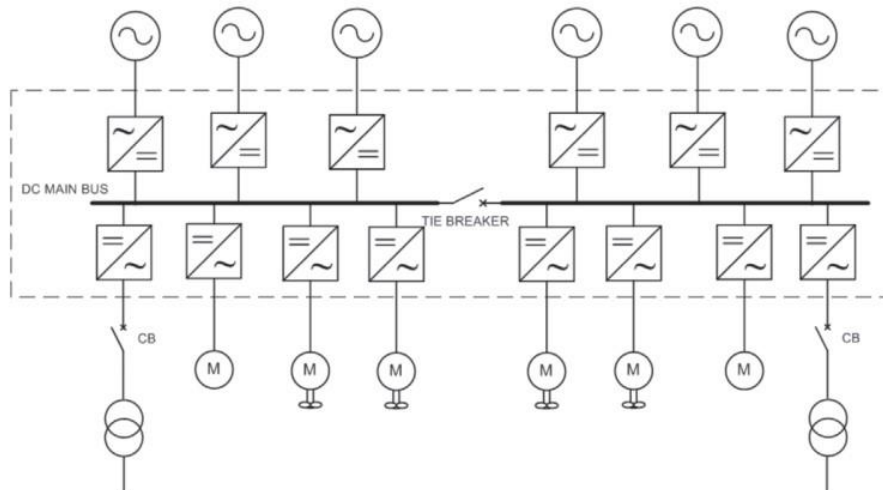
Izvor: F.D. Kanellos et al. / Electric Power Systems Research 150 (2017) 63–75

Generatori su spojeni na MV (eng. *Medium Voltage* – Srednji napon) sabirnicu, te se energija prenosi preko MV/LV (eng. *Medium Voltage/Low Voltage* – Srednji napon/Niski napon) transformatora na niskonaponske potrošače. Električni motori korišteni za propulziju su napajani preko propulzijskih transformatora i pretvarača frekvencije. Bitno je napomenuti da se u pomorskoj industriji napon iznad 1000 V smatra visokim naponom, dok se na kopnenim sustavima napon iznad 1000 V smatra srednjim naponom[7].

2.3.2. Istosmjerna brodska mreža

Sam koncept istosmjernog razvoda ima dvije moguće konfiguracije: prvi je „multidrive“ konfiguracija, dok je drugi potpuno distribuirana konfiguracija [8]. Obje konfiguracije objašnjene su Slikom 3 i Slikom 4.

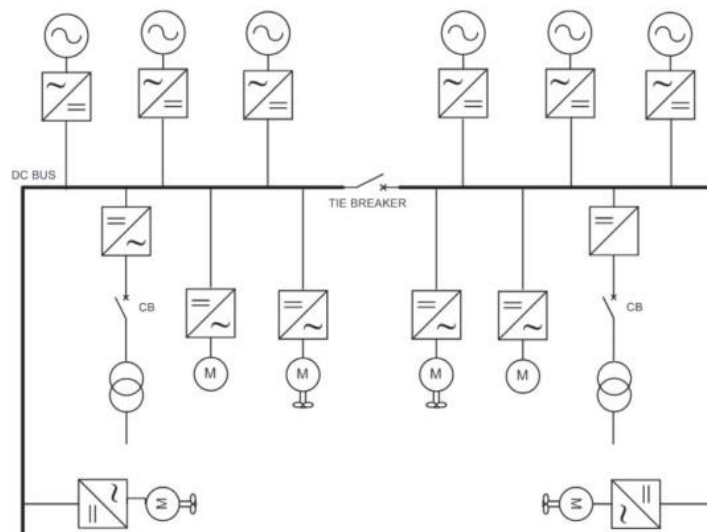
Kod „multidrive“ konfiguracije, svi moduli konverzije energije se nalaze u prostoru gdje se nekad nalazila glavna izmjenična razvodna ploča. Ovo znači da napajajući kabeli koji idu od generatora do istosmjerne sabirnice prenose izmjeničnu struju. Isto se odnosi na kabele koji prenose energiju od istosmjerne sabirnice do izmjeničnih potrošača, što se vidi na slici 3.



Slika 4 – "Multidrive" konfiguracija

Izvor: R. Prenc, A. Cuculić, I. Baumgartner, „Advantages of using a DC power system on board ship“, Pomorski zbornik 2016.

Kod potpuno distribuirane konfiguracije svaki modul konverzije energije se nalazi što bliže teretu ili izvoru napajanja. Svaka jedinica ima integrirani sustav ispravljača montiran direktno na samoj jedinici ili na nekom vrlo blizom susjednom mjestu. Posljedično, napajački kabeli prenose istosmjernu struju od generatorskih ispravljača na istosmjernu sabirnicu. Također, izmjenjivači koji se nalaze blizu izmjeničnih tereta i napajačkih kabela prenose istosmjernu struju s istosmjerne sabirnice na izmjenjivače izmjeničnih potrošača, što se vidi na slici 4.



Slika 5 - Potpuno distribuirana konfiguracija

Izvor: R. Prenc, A. Cuculić, I. Baumgartner, „Advantages of using a DC power system on board ship“, Pomorski zbornik 2016.

3. MIKROMREŽE

Mikromreža je lokalizirana grupacija izvora električne energije i opterećenja koja obično djeluju povezana i sinkronizirana s tradicionalnom centraliziranom električnom mrežom (također poznatom kao makromreža), ali bitna činjenica je da se mikromreža može odvojiti i funkcionirati samostalno [11]. Mikromreže su nisko ili srednjenaponske mreže koje se nalaze na mjestima potrošnje energije ili negdje vrlo blizu njih. One mogu uz tradicionalni prijenos energije, također proizvoditi energiju iz obnovljivih izvora energije. Kad se na mikromreže gleda sa stajališta iskoristivosti, primjena mikromreže može smanjiti potrebu za distribucijskim odnosno prijenosnim jedinicama; Primjerice, distribuirana proizvodnja električne energije u neposrednoj blizini potrošača može imati vrlo korisne učinke za sustav jer se smanjuju gubici nastali pri prijenosu energije [12]. Sve ove karakteristike mikromreže su dokaz kako ih je potrebno razvijati još više.

Istosmjerne mikromreže su napravile povratak u pomorsku industriju upravo zbog nedostataka izmjeničnih mreža. Potreba sinkronizacije generatora, neželjeni problemi s reaktivnom snagom i harmonicima su samo neki od problema koji se vežu uz izmjenične mreže. Najveći od ovih problema je problem sinkronizacije generatora koji je pomoću istosmjernih mikromreža eliminiran, jer u istosmjernim sustavima ne postoji frekvencija, pa se svaki generator s varijabilnom brzinom može nezavisno kontrolirati [13]. Ova promjena također smanjuje potrošnju goriva. Uz navedeno, relativno jednostavno spajanje i odspajanje vodi do PnP (eng. *Plug and play* – Ukopčaj i igrāj) mogućnosti kao i visokog stupnja rekonfiguracije same mreže, što uvelike poboljšava pouzdanost cjelokupnog sustava [14].

3.1. PROBLEMATIKA MIKROMREŽA

Uz sve nabrojane pozitivne strane, ostaje izazov regulacije napona pri vrlo dinamičkim uvjetima, kao što su plovila sa dinamičkim pozicioniranjem. Kontroliranje istosmjernih mikromreža i dalje se temelji na kontroli uzbude kao i kod izmjeničnih mreža. Međutim, novija istraživanja su pokazala da je najčešća metoda kontrole preko tzv „droop control“ (hrv. kontrola pada brzine) arhitekture, gdje su istosmjerne mikromreže upravljane i navođene sa više upravljačkih levela [15].



Slika 7 - Prstenasta sabirnica

Izvor: Zheming Jin, Mehdi Savaghebi, Juan C. Vasquez, Lexuan Meng, Josep M. Guerrero, „Maritime DC Microgrids - A Combination of Microgrid Technologies and Maritime Onboard Power System for Future Ships“, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 2016.

U hijerarhijskoj shemi upravljanja, osnovni „droop control“ može biti izveden preko lokalnih operatera, međutim ostali upravljački leveli koji su nadređeni operaterima, moraju biti upravljani koordinacijom svih generatora.

3.2. MIKROMREŽE - ARHITEKTURA PRSTENASTE SABIRNICE

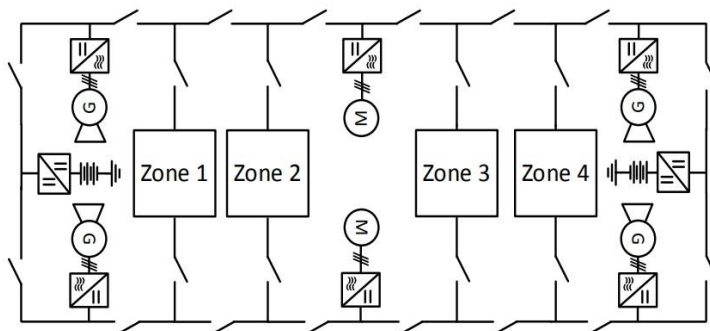
Arhitektura prstenaste sabirnice je objašnjena pomoću Slike 5. Za primjer tereta se koristio *datacenter* (hrv. podatkovni centar) koji ima veću potrebu za sigurnošću, te je u ovoj arhitekturi puno sigurniji nego u nekim drugim, o kojima će biti riječ.

Ovakva arhitektura se koristi kada istosmjerne mikromreže napajaju neki teret koji je vrlo osjetljiv na fluktuacije, ili je bitan za sigurnost. Ovakav sustav dopušta protok energije više puteva čime postoji redundancija. Gdje god se dogodi neki kvar unutar sustava, moguće je zatvoriti sklopku najbližeg prekidača, te je ostatak sustava u mogućnosti nastaviti normalni rad. Ovim načinom rada se omogućava opstanak sustava. Slična se arhitektura može primijeniti na cjelokupnu električnu centralu broda, ali će unutarnji dio biti podijeljen na tzv. električne zone [16]. Takav se sustav naziva DC ZED [17] (eng. *Direct Current Zonal Electrical System* – Istosmjerni zonski električni sustav).

3.3. ISTOSMJERNI ZONSKI ELEKTRIČNI SUSTAV

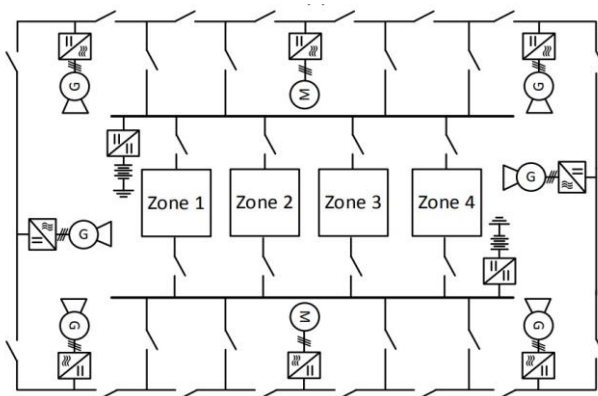
Kod DC ZED sustava, generatori su raspodijeljeni između sabirnica. Ovakva arhitektura ima mogućnost rada sa snažnom unutarnjom sabirnicom, kojoj je zadatak napajati niskonaponske sustave unutar zona pod normalnim okolnostima [18].

DC ZED sustav također ima sabirnicu niže kvalitete s vanjske strane koja je zadužena za vrlo snažne terete. Ove dvije sabirnice mogu funkcionirati nezavisno jedna o drugoj. Ovaj tip arhitekture nudi mogućnost poboljšanja efikasnosti broda tako što dopušta vanjskoj sabirnici rad na nižem naponu nego unutarnja sabirnica, kada nije potrebna plovidba u punoj brzini. Princip ove arhitekture je prikazan na slikama 6, 7, i 8. Slika 6 prikazuje klasičnu izvedbu DC ZEDova, Slika 7 prikazuje DC ZEDove sa centralnim teretom, dok slika 8 prikazuje arhitekturu dvostruke prstenaste sabirnice.



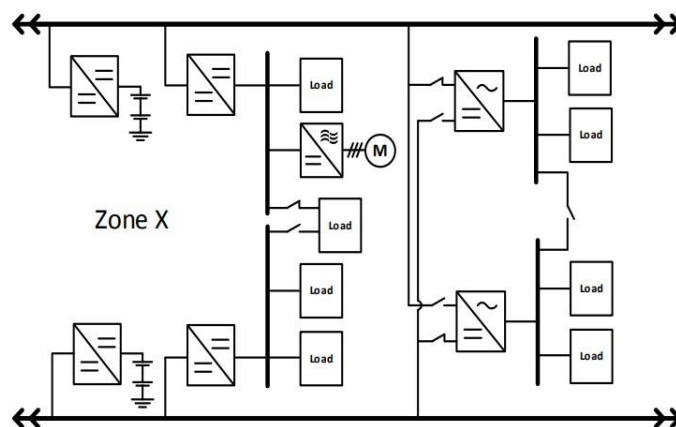
Slika 9 - Klasična izvedba DC ZEDova

Izvor: Zheming Jin, Mehdi Savaghebi, Juan C. Vasquez, Lexuan Meng, Josep M. Guerrero, „Maritime DC Microgrids - A Combination of Microgrid Technologies and Maritime Onboard Power System for Future Ships“, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 2016.



Slika 7 - DC ZEDovi sa centralnim teretom

Izvor: Zheming Jin, Mehdi Savaghebi, Juan C. Vasquez, Lexuan Meng, Josep M. Guerrero, „Maritime DC Microgrids - A Combination of Microgrid Technologies and Maritime Onboard Power System for Future Ships“, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 2016.



Slika 8 - Dvostruka prstenasta sabirnica

Izvor: Zheming Jin, Mehdi Savaghebi, Juan C. Vasquez, Lexuan Meng, Josep M. Guerrero, „Maritime DC Microgrids - A Combination of Microgrid Technologies and Maritime Onboard Power System for Future Ships“, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 2016.

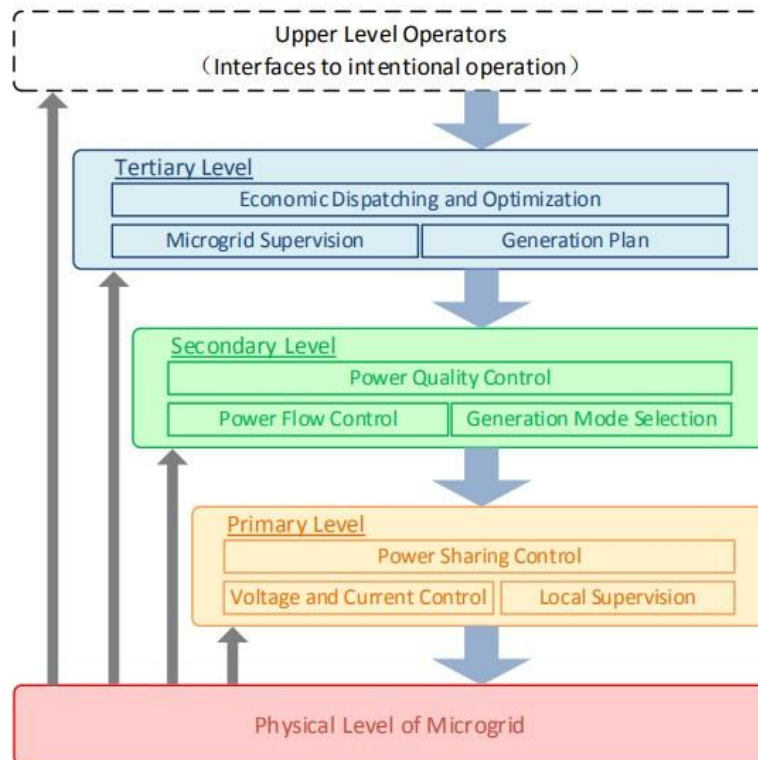
3. 4. UPRAVLJANJE MIKROMREŽAMA

Mikromrežama se može upravljati na četiri načina: hijerarhijski, centralizirano, decentralizirano, i distribuirano [19]. Svaki od ovih načina ima svoje prednosti i mane, te će u sljedećim potpoglavljima biti opisani.

3.3.1. Hijerarhijsko upravljanje

Nakon brzog razvoja u prošlim nekoliko godina, postoji niz upravljačkih metoda za istosmjerne mikromreže. Jedna od tih metoda je i hijerarhijska metoda, gdje se cjelokupnim sustavom mikromreže upravlja na sljedećim nivoima:

- a) Nivo 0 – Unutarnje kontrolne petlje: Ovo su fundamentalne kontrolne petlje koje reguliraju napon i/ili struju unutar svakog elektroenergetskog pretvarača spojenog na mikromrežu.
- b) Nivo 1 – Primarno upravljanje: Kontrolne metode koje omogućavaju veću stabilnost sustava i prigušivanje smetnji.
- c) Nivo 2 – Sekundarno upravljanje: Kontrolne metode koje osiguravaju da su bitne varijable unutar zacrtanih vrijednosti.
- d) Nivo 3 – Početno tercijarno upravljanje – Kontrolne metode koje paze i osiguravaju ispravan tok energije između same mikromreže i gornjih nivoa.
- e) Gornji nivoi – Prošireno tercijarno upravljanje – Kontrola i sustavi za podršku odlučivanju kako bi se izvršili neki dodatni ciljevi (npr. ekonomska isplativost).



Slika 9 - Nivoi kontrole hijerarhijske strukture

Izvor: Zheming Jin, Mehdi Savaghebi, Juan C. Vasquez, Lexuan Meng, Josep M. Guerrero, „Maritime DC Microgrids - A Combination of Microgrid Technologies and Maritime Onboard Power System for Future Ships“, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 2016.

Slika 9 prikazuje opću shemu hijerarhijskog upravljanja gdje je prezentirana veza između nivoa. Kao što je rečeno, „droop control“ je najčešće instaliran kao primarna upravljačka metoda. U hijerarhijskoj metodi, što je viši nivo, on omogućava sporiju regulaciju.

3.3.2. Centralizirano upravljanje

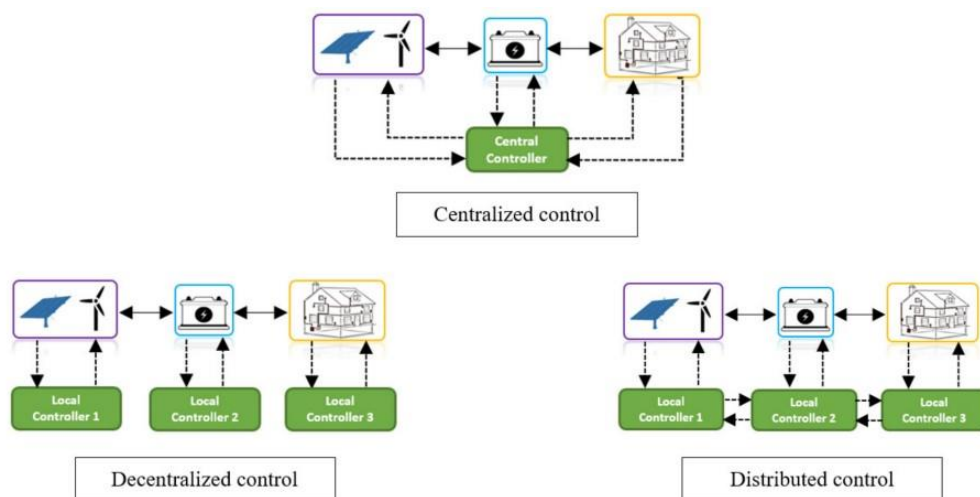
Centralizirano upravljanje može biti implementirano u istosmjerne mikromreže korištenjem centralnog kontrolera i komunikacijske mreže [20]. Svaki se uređaj može direktno upravljati upravo s centralnim kontrolerom koristeći Master/Slave (hrv. Gospodar/Rob, način upravljanja gdje je jedan uređaj nadređen drugom) metodu. Ovaj tip upravljanja pruža najbolju mogućnost upravljanja kao i optimizaciju na razini cijelog sustava, budući da se svi bitni podaci mogu skupiti i procesuirati unutar jednog kontrolera. Međutim, cijena i težina implementacije ovakvog tipa upravljanja bi se povećavao s brojem uređaja na koje se želi primijeniti ova metoda.

3.3.3. Decentralizirano upravljanje

Decentralizirano upravljanje se realizira isključivo koristeći lokalne kontrolere na sučeljima uređaja energetske elektronike. Prednost ovakvog tipa upravljanja je upravo ta što je svaki uređaj odvojen od komunikacijske mreže i centralnog kontrolera. Ova prednost sa stajališta pouzdanosti rezultira u limitiranju performansi, zbog manjka informacija o ostalim uređajima koji su možda spojeni na istu mrežu, ali su decentralizirani. Nedavne studije govore kako su DBS (eng. *DC Bus* – Istosmjerna sabirnica) metoda, metoda „droop“ kontrole i PLS (eng. *Power Line Signal* – Signal koristeći napajачke linije) jedne od najboljih metoda koordinacije za decentralizirano upravljanje [18]. Kad se govori o istosmjernim mikromrežama, najinteresantnija je upravo DBS metoda [19].

3.3.4. Distribuirano upravljanje

Kada se uspoređuje s centraliziranim upravljanjem i decentraliziranim upravljanjem, distribuirano upravljanje omogućava kompromis između ove dvije metode upravljanja. U distribuiranom upravljanju, centralni kontroler ne postoji, ali lokalni kontroleri imaju mogućnost komunikacije jedan s drugim. Najbitnija metoda kod distribuiranog upravljanja je MAS (eng. *Multi-Agent System* – Sustav više agenata), kod kojeg se svaki lokalni kontroler može gledati kao inteligentni agent, a svi agenti čine upravo MAS mrežu [20].



Slika 10 - Centralizirano, decentralizirano, i distribuirano upravljanje na primjeru kopnenog sustava

Izvor: Singh, P.; Paliwal, P.; Arya, A. A Review on Challenges and Techniques for Secondary Control of Microgrid. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2019, 561, 012075

Koristeći distribuirano upravljanje, dobiva se sustav komunikacije i informacije koji se može usporediti sa centraliziranim upravljanjem, dok zadržava visoku pouzdanost decentraliziranog upravljanja.

3.4. KONTROLA PADA BRZINE – DROOP CONTROL

Kontrola pada brzine, ili „droop control“ je metoda upravljanja korištena za izmjenične generatore i brodske istosmjerne mikromreže, gdje se izlazna snaga generatora smanjuje kako se frekvencija povećava [21]. Princip rada se zasniva na upravljanju izlazne snage, ovisno o frekvenciji mreže. Koristeći „droop control“, kada je mreža na najvećoj mogućoj frekvenciji, snaga generatora se smanjuje na nulu. Isti je slučaj kada je situacija obrnuta, kada je mreža na najnižoj frekvenciji, zadana snaga generatora je na 100%. Ovakav tip upravljanja omogućava sinkronim generatorima rad u paralelnom spoju. Kontrola pada brzine se također koristi kod skladišta energije, što uključuje istosmjerne mikromreže.

3.4.1. Računanje droopa

Droop se računa u postotku na sljedeći način [22]. Jedinica za brzinu je *Rounds per minute* čija je kratica RPM, što u prijevodu znači broj okretaja u minuti.

$$Droop[\%] = \frac{Brzina\ bez\ opterećenja - Brzina\ pod\ punim\ opterećenjem}{Brzina\ bez\ opterećenja} \quad (1)$$

Primjerice, ako neki pogonski stroj ima brzinu od 3000 RPM bez opterećenja, a pod punim opterećenjem mu brzina padne na 2880 RPM-a, konačni Droop iznosi 4% jer

$$Droop[\%] = \frac{3000 - 2880}{3000}$$

$$Droop[\%] = 4\%$$

Normalni preporučeni postotak za droop iznosi od 3% do 5% [23]. U sustavu bez kontrole pada brzine, kako se povećava opterećenje brzina motora se smanjuje. Kontroler (eng. *Governor*) će na to odgovoriti tako da poveća protok goriva (ako se radi o brodu sa dizelskim motorima) dok se brzina motora ne vrati na početnu brzinu. Zbog tromosti dizel motora, brzina će mu se povećavati preko početne brzine, uzrokujući prekoračenje brzine. Kontroler će opet pokušati smanjiti brzinu da se ispravi zbog prekoračenja, te će previše ispraviti brzinu u drugom smjeru, uzrokujući podbačaj u brzini. Pretjerana korekcija brzine u oba smjera vodi do

nestabilnosti, te će kontroler neuspješno regulirati brzinu sve dok se na motoru ne aktivira alarm za prekoračenje brzine [24].

3.5. RAZLIKE IZMEĐU AC I DC MIKROMREŽA

Kao što im samo ime govori, AC mikromreže koriste izmjeničnu struju, dok DC mikromreže koriste istosmjernu struju. Ovo podpoglavlje opisuje razliku između ove dvije vrste mikromreža, te objašnjava prednosti i nedostatke istosmjernih mikromreža naspram izmjeničnih mikromreža.

3.5.1. Prednosti DC mikromreža

Prva prednost je lakša integracija obnovljivih izvora energije i baterijskih skladišta energije u cjelokupnu električnu centralu. Ovo uključuje solarnu fotonaponsku energiju, kao i tehnologiju vodikovih gorivih ćelija. Zbog ovoga, nisu potrebni izmjenjivači, već se trebaju implementirati DC/DC (eng. *Direct Current/Direct Current* – tip pretvarača iz istosmjerne u istosmjernu energiju) pretvarači koji su efikasniji i manji, što rezultira u smanjenju potrošnje energije [25]. Distribuiranje DC izvora do DC potrošača, umjesto konverzije iz AC u DC, ide direktno, što vodi do smanjenja potrošnje energije a i cijene. Ova modifikacija može voditi do bitnih smanjenja u cijeni i energiji za DC potrošače kao što su LED (eng. *Light Emitting Diode* – tip diode koja svijetli) svjetla, podatkovni centri, elektronička oprema i drugi.

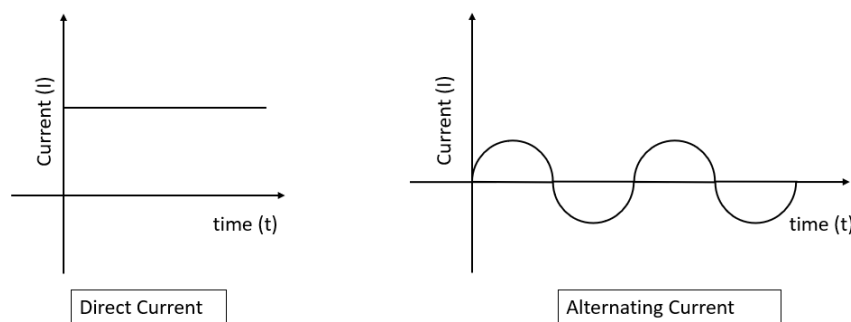
Druga prednost je puno bolja kvaliteta električne energije i kontrole istosmjernih mikromreža. Naime, u istosmjernim mikromrežama ne postoje harmoničke oscilacije ili dizbalansi među fazama, što su problemi koji se događaju u izmjeničnim mikromrežama i „ruše“ kvalitetu električne energije. Umjesto toga, istosmjerne mikromreže omogućuju „vatrozid“ koji onemogućava smetnje kod propagacije sa jedne na drugu mrežu [26,27]. Budući da istosmjerne mikromreže koriste samo djelatnu snagu, nema potrebe za kontrolom reaktivne snage, što je jedan od problema kod izmjeničnih mikromreža [28].

Nadalje, kod istosmjernih mikromreža ne postoje problemi sa sinkronizacijom generatora, iz razloga jer ih ne treba sinkronizirati. Ovo pojednostavljuje složenost cijelog sustava [29]. Kod izmjeničnih mikromreža potrebna je regulacija frekvencije koja mora uvijek biti ista.

Posljednja prednost je da ne postoji skin-efekt (Porast električnog otpora u unutrašnjosti vodiča s porastom frekvencije izmjenične električne struje [30]) što dopušta tok struje preko cijelog kabela umjesto samo vanjskih, površinskih dijelova. Shodno tome, istosmjerna distribucija električne energije omogućava korištenje manjih kabela za istu jakost struje [31].

3.5.2. Nedostaci DC mikromreža

Osnovni nedostatak je da istosmjerne brodske tehnologije još nisu toliko razrađene kao što su izmjenične. Bitno je napomenuti da je cijeli koncept proizvodnje, prijenosa, i distribucije električne energije na brodu započeo s tehnologijom izmjenične struje. Zbog ovoga, istosmjerna rješenja imaju neke druge nedostatke kao što je npr. manjak standarda. Da bi sustav kao što su istosmjerne mikromreže bio implementiran diljem pomorske industrije, definicija nekih parametara, kao što su naponski leveli, trebao bi biti više specificiran. Zbog toga što istosmjerne tehnologije još nisu toliko široko implementirane kao što su izmjenične, postoji manjak standardiziranih vrijednosti [32]. Nadalje, postoji problematika oko prekidanja istosmjernih krugova, zato što se istosmjerna struja ponaša tako da nikad ne prelazi „nulu“, odnosno uvijek teče u istom smjeru, pa se ne može, kao kod izmjeničnih mreža, prekinuti kada je „u nuli“.



Slika 11 – Razlika između istosmjerne struje (lijevo) i izmjenične struje(desno)

Izvor: <https://www.vedantu.com/question-answer/graph-of-direct-current-and-alternating-current-class-12-physics-cbse-60b05daca2fe95426c8d5033>

Prekidanje istosmjernih mreža može voditi do stvaranja električnog luka, što je opasno i za uređaje i za ljude. Rade se istraživanja za razvoj prekidača koji mogu sigurno prekinuti istosmjerni krug, u veličini kV (Volt [V] označava jedinicu za električni napon, 1 kV iznosi tisuću Volti) [33]. Također, cijena konstrukcije izmjeničnih mikromreža je puno jeftinija nego za istosmjerne mikromreže. Razlog tome je nedavni početak razvoja korištenja istosmjernog razvoda na brodu, kao i sama integracija u cjelokupni sustav električne centrale. U Tablici 1 su sažete sve razlike između istosmjernih mikromreža i izmjeničnih mikromreža.

Tablica 1 – Razlike između istosmjernih mikromreža i izmjeničnih mikromreža

Izvor: Pripremio student prema State of the Art of Low and Medium Voltage Direct Current (DC) Microgrids, Fotopoulou, M.; Rakopoulos, D.; Trigkas, D.; Stergiopoulos, F.; Blanas, O.; Voutetakis, S., Energies 2021

	Istosmjerne mikromreže	Izmjenične mikromreže
Smanjenje potrošnje energije	Da	Ne
Integracija istosmjernih potrošača	Efektivna	Nije efektivna
Upravljanje mikromrežom	Jednostavno	Komplicirano
Sinkronizacija	Nije potrebna	Potrebna
Regulacija frekvencije	Nije potrebna	Potrebna
Skin-efekt	Ne događa se	Događa se
Standardi	Nedovoljno razvijeni	Razvijeni
Zaštite i sklopni uređaji	Nedovoljno razvijeni i skupi	Razvijeni i ne toliko skupi
Cijena ugradnje	Visoka	Niska

3.6. PRIMJENE DC MIKROMREŽA U INDUSTRIJI

Istosmjerne mikromreže se sve više počinju koristiti u raznim granama industrije. Ovakav način distribucije energije postaje sve više popularan u raznim granama industrije kao što su pomorska industrija, prometna (željeznička) industrija, kao i puno ostalih. Glavni razlog korištenja istosmjernih mikromreža je smanjenje troškova i prijenosnih gubitaka energetske pretvarača kao što su AC/DC ili DC/AC pretvarači. Korištenje istosmjernih mikromreža također povećava redundanciju (uvijek postoji „back-up“) i pouzdanost. Istosmjerne mikromreže omogućuju lokalno skladištenje i distribuciju električne energije.

3.6.1. Primjene u pomorstvu

Istosmjerna mikromreža na brodu se sastoji od sustava propulzije i električne centrale broda. Stvaranje energije na brodu omogućava električnu energiju za propulziju broda (ako se radi o električnom brodu) koristeći elektroenergetsku mrežu [134]. IFEP sustav ima puno prednosti glede efikasnosti i dizajna samog broda naspram tradicionalnim sustavima propulzije.

Prva prednost je efikasnost pogonskog elektromotora, naime upravljanje elektromotorom koristeći istosmjernu mikromrežu u optimalnom modusu potrošnje omogućuje smanjenje potrošnje goriva što rezultira u smanjenju štetnih plinova. Nadalje, omogućava se veći hidrodinamički stupanj korisnosti. Jedna od većih prednosti je također smanjenje strojarne, pogotovo ako se koriste zakretni podtrupni porivnici, oni eliminiraju osovinski vod te su smješteni daleko na krmu i u potpunosti oslobađaju centralni dio trupa čime se može prevesti više tereta nego u izvedbi sa dizel-mehaničkom propulzijom (u direktnoj izvedbi ili sa reduktorima) [135].

Neke od prednosti podtrupnih porivnika su manje zamašne mase, nepotrebnost krmnih bočnih porivnika, veliki krmni bočni poriv, znatno manji radijus okretanja pri punoj brzini, kao i kraći zaustavni put broda [136]. Ovo najviše dolazi do izražaja kod upravljanja plovilom pri malim brzinama što je slučaj kod brodova koji koriste dinamičko pozicioniranje kao što su odobalne naftne platforme, ili brodovi koji polažu kabele. Ostale prednosti korištenja mikromreža su smanjenje buke i vibracija, što je postignuto eliminacijom mehaničkih dijelova kao što su mehanički prijenosnici [137]. Još jedna prednost istosmjernih mikromreža je smanjenje same mase svih kabela, budući da su umjesto klasična tri kabela u trofaznim izmjeničnim (mikro) mrežama potrebna samo dva kabela. Korištenje istosmjerne mikromreže omogućava usmjeravanje energije tamo gdje je potrebna, skladišta energije kao što su

zamašnjaci ili superkondenzatori su veliki dio istosmjernih mikromreža, i integracija ove tehnologije u već postojeći istosmjerni razvod rezultira u smanjenju gubitaka, kao i jednostavnosti cjelokupne brodske električne centrale.

Osim pomorske industrije, istosmjerne mikromreže se počinju koristiti i u ostalim aspektima ljudskog života, kao na primjer u prometu, u podatkovnim centrima, u zgradama, u osvjetljenju javnih površina, u električnim vozilima itd. O svim nabrojanim industrijama će biti riječi u sljedećim potpoglavljima, koja će na kraju biti sažeta s Tablicom 2 u kojoj je objašnjeno na kojim naponima rade navedene industrije.

3.6.2. Primjene u prometu

Visoka dostupnost istosmjernih motora te laka mogućnost upravljanja njima je jedan od razloga zašto se i dalje koriste u željezničkom prometu. Čak se i autobusi kreću prema korištenju istosmjerne električne energije zbog manjeg onečišćenja okoliša [34]. Ovo rezultira da se cjelokupni gradski javni prijevoz odvija koristeći istosmjernu električnu energiju, koju crpi iz gradske mreže. Jedini nedostatak ovoga je što većina gradova i dalje koristi izmjeničnu električnu energiju, pa se trebaju koristiti AC/DC ispravljači. Autori Verdicchio, A.; Ladoux, P.; Caron, H. i Courtois, C. su u svojem radu “New Medium-Voltage DC Railway Electrification System” demonstrirali da je MVDC (eng. *Medium Voltage Direct Current* – Srednjenaponska istosmjerna) željeznički sustav između Pariza i Strasbourga na nivou izmjeničnog sustava ako se govori o efikasnosti [35]. Također dopušta manju snagu po trafostanici bez pomaka u fazama, te je također smanjena potreba za sklopovima energetske elektronike, i nije potrebna nabava autotransformatora. Bitno je napomenuti da naponski nivoi variraju kad se govori o primjeni u prometu, ali neke najčešće korištene vrijednosti su 750 V, 1500 V, i 3000 V [36].

3.7.3. Podatkovni centri

Podatkovni centri su vrlo bitne ustanove čija se važnost rapidno povećava kako raste potreba za visokim kapacitetom pohrane podataka. Neki budući podatkovni centri bi mogli zahtijevati do nekoliko MW (eng. *MegaWatt* – Watt je jedinica za snagu, a Mega je prefiks koji označava red veličine 10^6). Većina potrošača u podatkovnim centrima su električni i rade upravo na istosmjernoj električnoj energiji, što znači da bi izmjenični sustav vodio do gubitaka zbog potrebe za korištenjem već navedenih AC/DC ispravljača.

Korištenje izmjenične električne energije, kao i sami trendovi korištenja obnovljivih izvora energije kao što su solarni paneli ili baterijska skladišta energije vode do prijelaza na istosmjernu električnu energiju za podatkovne centre. Podatkovni centri koji su napajani s 380 V zauzimaju 33% manje prostora, efikasniji su i imaju 36% manju cijenu ako se gleda kroz cijeli period očekivanog rada, što uključuje održavanje [37].

3.7.4. Primjene u zgradama

Zbog ekonomskih i ekoloških razloga, PV (eng. *Photovoltaic* – Fotonaponski) sustavi se sve više koriste u komercijalnim zgradama kao što su uredi i veliki kupovni centri, stambenim zgradama, bolnicama, pa čak i školama. Višak proizvedene energije se može vratiti natrag u mrežu ako je to potrebno. Budući da su fotonaponski sustavi instalirani unutar zgrada, dopuštaju minimalne gubitke pri prijenosu energije [38]. Ovakvi izvori energije omogućuju istosmjernu električnu energiju i pomažu napajati veliki dio potrošača unutar same zgrade. Naprimjer, LED lampe korištene za osvjetljavanje prostorija rade koristeći istosmjernu električnu energiju. Nadalje, punjači, razni istosmjerni elektromotori, sklopovi energetske elektronike također rade koristeći istosmjernu električnu energiju. Budući da je cjelokupna mreža i dalje na izmjeničnoj električnoj energiji, ovi uređaji trebaju imati AC/DC pretvarače. Prebacivanjem cjelokupne mreže na istosmjernu, pretvarači i gubici vezani uz njih se mogu zaobići. Važno je napomenuti da se sustav napajanja zgrade može napraviti i kombinirano, koristeći i izmjenične i istosmjerne mikromreže. Prema istraživanjima, komercijalne zgrade koje koriste fotonaponske sustave u kombinaciji sa istosmjernim mikromrežama su 6 do 8 posto efikasnije nego tradicionalne izmjenične mreže [39].

3.7.5. Osvjetljenje javnih površina i cesta

Kad se govori o javnim radovima i servisima, zastarjela tehnologija osvjetljivanja se pomalo zamjenjuje efikasnijom LED tehnologijom, koja većinski osvjetljava javne površine, ceste, i autoceste [40]. Istosmjerne mikromreže napajaju LED sustave, smanjujući troškove osvjetljenja, budući da je javna rasvjeta jedan od skupljih javnih troškova. Problematika javne rasvjete je već dotaknuta od strane više istraživačkih timova; Jedan tim je predložio kombinaciju vakuumskih prekidača u niskonaponskim istosmjernim mikromrežama koji napajaju javnu rasvjetu koristeći LED tehnologiju [41], dok je drugi tim predložio model koji koristi više „clustera“ istosmjernih mikromreža, od kojih svaki ima LED svjetla, koristeći fotonaponsku tehnologiju [42].

3.7.6. Električna vozila i stanice za punjenje

Prodaja električnih vozila u cijelom svijetu raste iz dana u dan zbog potrebe zaštite okoliša od lošeg utjecaja emisije fosilnih goriva, kao i regulacija raznih organizacija. Zbog ovoga, proizvođači automobila su fokusiraniji više nego ikad na proizvodnju električnih vozila, koja će u bliskoj budućnosti djelomično zamijeniti tradicionalna vozila na fosilna goriva. Budući da električna vozila trebaju punjenje u određenim intervalima, a njihove baterije koriste istosmjernu tehnologiju, bilo bi isplativije imati istosmjerne stanice za punjenje umjesto klasičnih izmjeničnih. Istosmjerne stanice za punjenje bi mogle puniti električna vozila brže nego izmjenične, a postoji i mogućnost implementacije fotonaponske tehnologije, čime bi ova već zelena tehnologija postala još zelenija [43].

3.7.7. Primjene u industriji

Srednjenaponske istosmjerne mikromreže već imaju primjenu u nekim industrijama, kao što su čeličane, kemijske industrije, pa čak i automobilske industrije. Naprimjer, inovativna rješenja u okviru istosmjerne električne energije su razmatrana u polju bakrenih ili cinkovih *electrowinning* (hrv. ekstrakcija elektrolizom) instalacija, ili npr. u vidu elektrolučnih peći [44]. Također postoji slučaj u kojem su niskonaponske istosmjerne mikromreže razmatrane kao rješenje, pogotovo ako ta industrija uključuje automatizirane lance produkcije i/ili napajanje korištenjem obnovljivih izvora energije [45].

3.7.8. Tablica usporedbe

Sljedeća tablica prikazuje sve navedene primjene te im uspoređuje primjenu, napon, i naponski nivo.

Tablica 2 – Usporedba napona i naponskih nivoa ovisno o primjeni

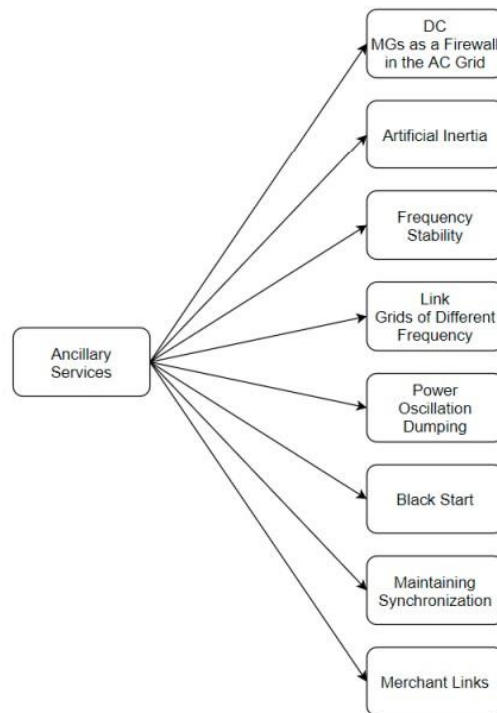
Izvor: Pripremio student prema State of the Art of Low and Medium Voltage Direct Current (DC) Microgrids, Fotopoulou, M.; Rakopoulos, D.; Trigkas, D.; Stergiopoulos, F.; Blanas, O.; Voutetakis, S., Energies 2021.

Primjena	Napon [V]	Naponski nivo
Brodovi	>1000	Nisko i srednjenaponski
Promet	Većinski 750, 1000, 3000 [46]	Nisko i srednjenaponski
Podatkovni centri	380-400	Samo niskonaponski
Zgrade	48-400, ovisno o primjeni	Samo niskonaponski
Javna rasvjeta	24 [47]	Samo niskonaponski
Punionice za električna vozila	<600	Samo niskonaponski
Industrija	>600	Nisko i srednjenaponski

3.7. POMOĆNE USLUGE

Pomoćne usluge (eng. *Ancillary Services*) su posebni servisi i funkcionalnosti koje omogućuju konstantan tok električne energije, pazeći pritom da sustav napajanja uvijek ima dovoljnu količinu energije za napajati trošila. Omogućuje ih DSO (eng. *Distribution System Operator* – operater za sustav distribucije) i iznimno su bitne za održavanje kvalitete električne energije, kao i stabilnosti same mikromreže [47]. Međutim, ne postoji točno definiran opis ovih usluga jer svako područje gdje su potrebne ove usluge ima svoja pravila i definirana su drugačije. Najčešće pomoćne usluge su kompenzacija gubitaka, kontrola napona, frekvencije,

ili reaktivne snage, slabljenje oscilacija, i *congestion management* (eng. upravljanje gužvom – tehnika/alat kojom se koristi sva moguća snaga u sustavu bez narušavanja ograničenja sustava) [48,49,50]. Implementacija istosmjernje infrastrukture u trenutnim izmjeničnim mrežama omogućuje niz mogućih funkcija koje mogu poboljšati rad mreže. Slika 12 prikazuje



najkorištenije pomoćne usluge istosmjernih mikromreža, dok će u tekstu biti objašnjene najbitnije pomoćne usluge.

Slika 12 - Pomoćne usluge istosmjernih mikromreža

Izvor: Fotopoulou, M.; Rakopoulos, D.; Trigkas, D.; Stergiopoulos, F.; Blanas, O.; Voutetakis, S. State of the Art of Low and Medium Voltage Direct Current (DC) Microgrids. *Energies* 2021, 14, 5595.

Primjerice, istosmjerna mikromreža može služiti kao vatrozid (eng. *firewall*) u izmjeničnoj mreži. Kada se na izmjeničnoj mreži nešto poremeti, istosmjerna mikromreža može omogućiti da se taj poremećaj ne širi dalje na ostatak mreže [51]. Slabi izmjenični sustavi mogu patiti od varijacije frekvencije što se događa zbog niskog omjera mase (tromosti) prema sinkronim motorima/generatorima. Istosmjerne mikromreže mogu pružati pomoćne usluge tako da pruže dodatnu „tromost“ kako bi se pojačala stabilnost [52]. Nadalje, stabilnost frekvencije u izmjeničnim mrežama se događa zbog neravnoteže između proizvede i potrošene snage. Istosmjerne mikromreže, budući da nemaju frekvenciju, mogu ublažiti devijaciju u frekvenciji koristeći pretvarače, što omogućuje ponovni normalni rad i stabilnost [53].

Jedna od najbitnijih pomoćnih usluga je *black start* (hrv. pokretanje električne centrale nakon što dođe do blackouta). Zbog međusobno povezanih sustava napajanja i skladištenja energije u istosmjernoj mikromreži, može se dogoditi proces ponovnog pokretanja izmjenične mreže (zbog blackouta) [54]. Ukratko, moderne istosmjerne mikromreže mogu poboljšati rad izmjeničnih mreža. Kod sinkronizacije generatora, koja može biti problematična kod izmjeničnih mreža, istosmjerne mikromreže mogu održati tu sinkronizaciju držeći tok snage na istim (ili približno istim) nivoima, čime se smanjuje mogućnost ispadanje iz faze ili gubljenja cjelokupne sinkronizacije [55]. Fleksibilnost koju istosmjerne mikromreže nude je evidentna u svim područjima razmatranja. Integracija obnovljivih izvora energije kao i mogućnost skladištenja energije su kamen temeljac na kojima istosmjerne mikromreže počivaju. Kad se govori o kopnenim istosmjernim mikromrežama, električna vozila također imaju mogućnost pružanja pomoćnih usluga.

Električna vozila se mogu ponašati kao distribuirana skladišta energije, i imaju mogućnost vraćati energiju natrag u mrežu koristeći V2G (eng. *Vehicle to grid* – Vozilo prema mreži). Veliki problem kod svih ovih pomoćnih sustava je integracija u tradicionalne izmjenične mreže zbog manjka standarda za istosmjerne mikromreže, kao i sama cijena instalacije istosmjernih mikromreža, prvenstveno zbog prekidačkih sustava o kojima će biti riječ u idućim poglavljima.

4. SKLOPNA TEHNIKA I ZAŠTITE NA DC RAZVODU

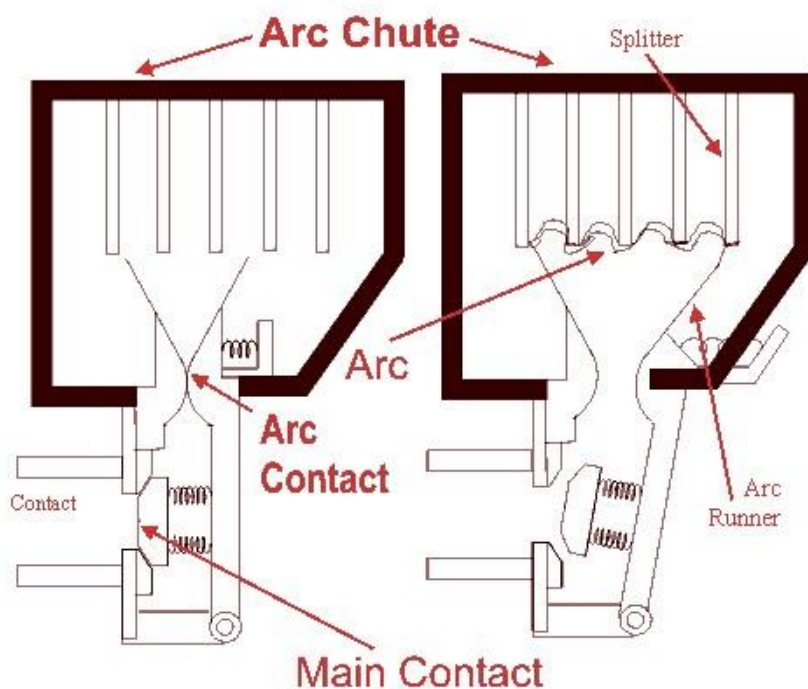
Sklopna tehnika kod istosmjernih razvoda je jedan od težih izazova kod korištenja istosmjernog razvoda na brodu. Tradicionalne izmjenične mreže je puno jednostavnije prekinuti jer struja prelazi preko „nule“ svakih pola periode, dok kod istosmjernih mreža struja ima stalnu vrijednost veću od nule, te se električni luk teže gasi. Istosmjerni prekidači postoje ali su puno kompliciraniji, veći i skuplji od prekidača izmjenične električne energije. Glavna ideja je osigurati selektivnost i zaštitu opreme dok se istovremeno minimizira korištenje skupih i ogromnih istosmjernih prekidača [56]. Zaštita istosmjerne mreže se može ostvariti kombinacijom osigurača i poluvodičkih sklopova energetske elektronike, kao i zračnih prekidača za niskonaponske sustave. Prilikom prekidanja strujnog kruga stvara se električni luk koji se mora zadržati i ohladiti u kontroliranim uvjetima. Ovisno o izvedbi postoji više prekidača koji koriste vakuum, zrak, inertni SF₆ plin, ili ulje za gašenje električnog luka. Koristeći prvotnu kombinaciju (osigurač i poluvodički sklopovi), svaka greška kao što je npr. kratki spoj se može riješiti unutar 40 ms [57]. Ovo relativno brzo vrijeme reakcije rezultira u puno manjem vremenu rada u kvaru za istosmjerne mreže, dok kod izmjeničnih mreža taj isti kvar traje do 1 sekunde [58]. Ovi podaci omogućuju istosmjernom sustavu korištenje na brodovima s ukupnom instaliranom snagom od 20 MW. Ono što je bitno za prekidač i njegove pomoćne krugove je detekcija kada je sustav u stanju kvara, te posljedično iskapčanje dijela sustava koji je u kvaru. U niskonaponskim prekidačima detektor kvara je smješten u samom kućištu, dok je kod visokonaponskih prekidača smješten van samog prekidača [59].

4.1. NISKONAPONSKI PREKIDAČI

Ovaj tip prekidača koristi samo zrak za gašenje luka. Sastoji se od dvije međusobno izolirane ploče koje dijele i hlade električni luk. Dijeljenjem glavnog luka na više manjih lukova povećava se napon, čime se postiže limitiranje struje koja ide kroz prekidač. Kod većih izvedbi ovakvih prekidača mogu se koristiti zavojnice i permanentni magneti [60]. Broj ploča ovisi o struji kratkog spoja i nominalnoj vrijednosti napona. S obzirom na način mehaničke izvedbe, mogu se podijeliti na male, kompaktne, i zračne prekidače. Električni se luk tipično gasi između 30 i 150 ms nakon startanja mehanizma iskapčanja. Vrijeme iskapčanja također ovisi o starosti i konstrukciji samog prekidača [61].

4.1.1. Zračni prekidači

Zračni prekidač, također poznati i kao ACB (eng. *Air Circuit Breaker*) je električni uređaj kojemu je funkcija pružiti prekostrujnu zaštitu i zaštitu od kratkog spoja za električne krugove između 800 A i 10 kA [62]. Većinski se koriste u niskonaponskim aplikacijama do 450 V. Zračni prekidač funkcionira sa zrakom kao medijem koji će gasiti električni luk, na danom atmosferskom tlaku. Zračni prekidači većinom imaju dva para kontakata. Glavni par kontakata prenosi struju pri normalnom opterećenju, i ovi su kontakti napravljeni od bakra. Drugi par je tzv. *arcing contact* (hrv. lučni kontakt) i on je napravljen od ugljika [63]. Kada se glavni par otvori, lučni kontakti su i dalje u doticaju jedan s drugim. Prilikom otvaranja glavnog para, ne dolazi do stvaranja električnog luka. Do stvaranja električnog luka dolazi tek kada se lučni kontakti otvore. Sam luk se „kreće“ prema gore kao što se vidi na slici 13. Luk ulazi u *arc chute* (hrv. lučna komora) koji se sastoji od *splittera* (dio mehanizma za gašenje luka koji razdvaja lučnu komoru na više manjih komora).



Slika 13 - Princip rada zračnog prekidača i prikaz luka

Izvor: <https://www.electrical4u.com/air-circuit-breaker-air-blast-circuit-breaker/>

Električni luk u komori postaje sve hladniji, dulji, te se počne dijeliti, budući da je napon luka veći od napona sustava u tom trenutku. Elektromagnetske sile unutar svakog dijela lučne komore „tjeraju“ luk u svakom dijelu komore da uzme oblik spirale. Sve te spirale su u seriji čime se totalna duljina električnog luka uvelike povećava, čime raste otpor luka, čime pada jakost struje luka, čime se električni luk gasi.

Kad se govori o održavanju, bitno je napomenuti da se čak 20% svih kvarova događa zbog lošeg (ili nikakvog) održavanja [64]. Neki od razloga kvarova tako mogu biti masnoća, korozija, prašina, ili smrznuti dijelovi.

Glavne prednosti zračnog prekidača su brzina, potreba za manjim (ne i nikakvim) održavanjem, smanjen rizik od požara što se ne može reći za već zastarjele uljne prekidače, te malo vrijeme lučenja. Nedostaci bi bili loša efikasnost pri niskim strujama kada su elektromagnetske sile slabe. Bitno je napomenuti da sama lučna komora nije nužno lošija kod produljivanja luka pri niskim strujama naspram visokih struja, već je kretanje samog električnog luka prema komori usporeno, pa brzo prekidanje nije uvijek realizirano [65].

Za primjer istosmjernog zračnog prekidača je uzet SACE Emax DC zračni prekidač, od tvrtke ABB, kao što je vidljivo na slici 14. Prema tvrdnjama proizvođača, može zaštititi cijelo istosmjerno postrojenje do 5000 A pri 1000 V DC sa integriranim elektroničkim *trip* jedinicama [136]. Ovisno o potrebi, dostupan je u trolejnoj ili četveropolnoj verziji. Tablica 3 prikazuje opće podatke o ovom prekidaču.

Tablica 3 - Opći podaci SACE Emax DC zračnog prekidača

Nazivni radni napon U_e [V]	1000
Nazivni napon izolacije U_i [V]	1000
Nazivni impulsni otporni napon U_{imp} [kV]	12
Radna temperatura [°C]	-25...+70
Preporučena temperatura skladištenja [°C]	-40...+70

Izvor: izradio student prema **Technical catalogue, SACE Emax DC, Low voltage air circuit-breakers for direct current application, ABB**

Ovi prekidači se najčešće koriste kao spojnice dvaju ili više sabirnica ili glavni rastavljači u postrojenjima istosmjerne električne energije u područjima kao što je električna vuča (eng. *electric traction*) [137].



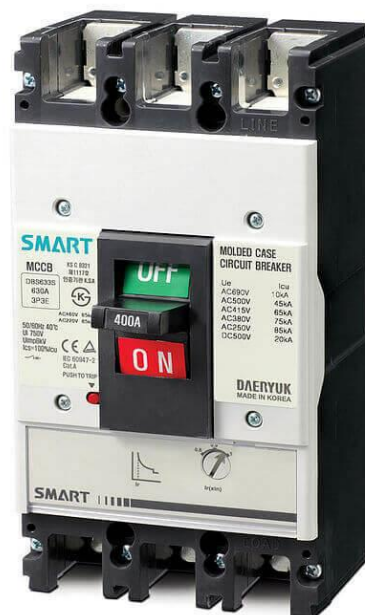
Slika 14 - SACE Emax DC zračni prekidač

Izvor: <https://new.abb.com/low-voltage/products/circuit-breakers/legacy-products/sace-new-emax/emax-dc/>

Ovisno o odabranom modelu, SACE Emax omogućava praćenje i čitanje bitnih podataka kao što su jakost struje, jakost struje kroz određeni period vremena (eng. *data logger*), podaci o održavanju kao što je postotak istrošenosti kontakta, pamćenje kada je sam prekidač bio otvaran, trenutnu snagu i još puno opcija [138]. Odabir modela prekidača ovisi o zahtjevima postrojenja, prema ABB-u to su tip postrojenja, nazivna jakost struje, nazivni napon, jakost struje kratkog spoja, fizička izvedba prekidača (fiksirana ili nefiksirana), broj polova, i mjesto napajanja [139]. Ovisno o fizičkoj izvedbi prekidača mijenjaju se i dimenzije samog kućišta. Na YouTube kanalu tvrtke ABB postoji niz videozapisa koji objašnjavaju korisniku kako raditi sa SACE Emax DC zračnim prekidačem, počevši od samog montiranja pa do početka rada, odnosno spajanja u mrežu.

4.1.2. Kompaktni prekidači

Kompaktni prekidači, u literaturi često nazivani MCCB (eng. *Moulded Case Circuit Breaker*) su tip niskonaponskih prekidača koji štite istosmjerni krug od prevelike struje. Naspram zračnih prekidača, prekidaju struje do 3200 A [66]. Puno su jednostavniji i manji, ali time i točniji od već spomenutih zračnih prekidača. Također su brži čime kompaktni prekidači mogu detektirati kvar kao što je npr. kratak spoj unutar 9 ms [67]. Kompaktni prekidači se također više koriste na strani tereta. Funkcioniraju isto kao i zračni prekidači. Ovakav tip prekidača koristi termomagnetske mehanizme za otkrivanje kvarova, dok veći kompaktni prekidači koriste tzv. *Solid state* mehanizme. Zbog svoje kompaktne strukture, ovakvom tipu prekidača skoro pa ne trebaju održavanja i inspekcije. Kompaktni prekidači se zbog svoje lakše mase mogu montirati na primjerice zid, dok zračni prekidači to ne mogu jer su teži i imaju veći volumen. Kad se govori o klasifikaciji, prema IEC 60947-2 [68] kompaktni prekidači većinski spadaju u kategoriju A, što je kategorija prekidača koji su bez namjerne kratkotrajne odgode u uvjetima kratkog spoja i stoga bez kratkotrajne nazivne podnosive struje, dok zračni prekidači spadaju u kategoriju B, što je kategorija prekidača sa namjernom kratkotrajnom odgodom u uvjetima kratkog spoja. Ovakvi tipovi prekidača imaju kratkotrajnu nazivnu podnosivu struju.



Slika 15 -Kompaktni prekidač

Izvor: <https://www.gses.com.au/molded-case-circuit-breakers/>

4.1.3. Mali prekidači

Mali prekidači, također znani kao MCB (eng. *Miniature Circuit Breakers*) su tip niskonaponskih prekidača koji za zadaću imaju prekinuti strujni krug u slučaju prevelike struje koja se dogodi zbog nekog kvara kao što je npr. kratki spoj. Glavna razlika između ostala dva tipa niskonaponskih prekidača je da je napravljen za male struje do 100 A [69]. Mali prekidači se koriste za slabije električne terete i manje uređaje. Ovaj tip prekidača se automatski gasi tijekom abnormalnih uvjeta, kao što je visoki napon ili električni udar [70]. Što se tiče održavanja, za ovakav tip prekidača održavanje i servis ne postoje, što ga čini idealnim za manje zahtjevne električne terete. Mali prekidači se često koriste u kućanstvima zbog svojih sitnih dimenzija i jednostavnosti.

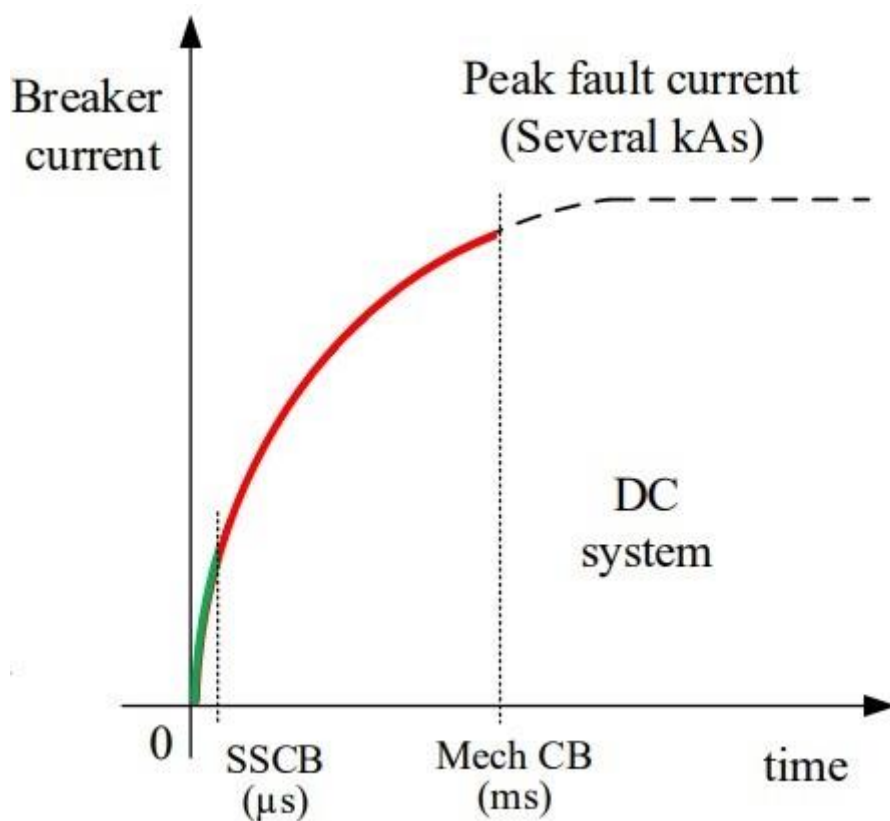


Slika 16 - Mali prekidač

Izvor: <https://www.schrack.hr/trgovina/miniature-circuit-breaker-mcb-c25-3-40-c-10ka-bm017325me.html>

4.2. SOLID STATE PREKIDAČI

Ovakav tip prekidača funkcionira na principu već spomenutog *Solid State*-a, što znači da se ovakvi prekidači mogu ponašati kao prekidači bez ikakvog mehaničkog kretanja komponenti. U literaturi se često nazivaju kao SSCB (eng. *Solid State Circuit Breakers*). Solid state uređaji su napravljeni od popunjenog materijala, što znači da sav tok energije ide preko tog istog materijala. Solid state prekidači imaju jako brz odaziv naspram klasičnih elektromehaničkih prekidača zahvaljujući jako brzom vremenu reagiranja poluvodičkih elemenata. Budući da je isključivanje poluvodičkih elemenata upravljano električnim signalom, ovo se događa skoro instantno, u mikrosekundama [71]. Slika 17 prikazuje razliku u brzini odziva između solid state prekidača i klasičnih elektromehaničkih prekidača u istosmjernim sustavima.



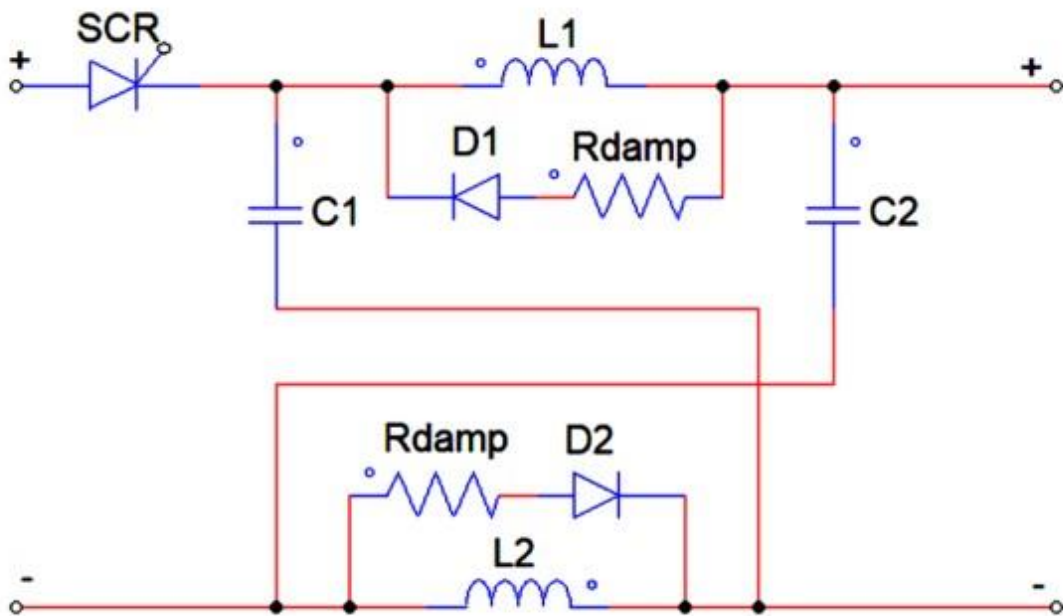
Slika 110 - Razlika u brzini odziva na istosmjernim sustavima

Izvor: Rodrigues, R., Du, Y., Antoniazzi, A., & Cairoli, P. (2020). A Review of Solid-State Circuit Breakers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1–1. doi:10.1109/tpe1.2020.3003358

Brzina prekidanja SSCB-a je nekoliko puta brža nego kod elektromehaničkih prekidača. Brzina prekidanja je određena brzinom i preciznošću mehanizama za detekciju kvara kao i brzinom isključivanja poluvodičkih elemenata [72]. Postoji više topologija ove tehnologije, od kojih su najbitniji Z-source SSCB [73] i SiC JFET (eng. *Silicon Carbide Junction Field Effect Transistor*).

4.2.1. Z-source SSCB

Ovaj tip prekidača prekida čim osjeti da je struja koja teče kroz njega viša od zadane, također se naziva automatskim [74]. Problem je što nema zajedničko uzemljenje kao što je vidljivo na slici 18 i prilikom ponovnog ukapčanja dolazi do neželjenih strujnih špicova [75].

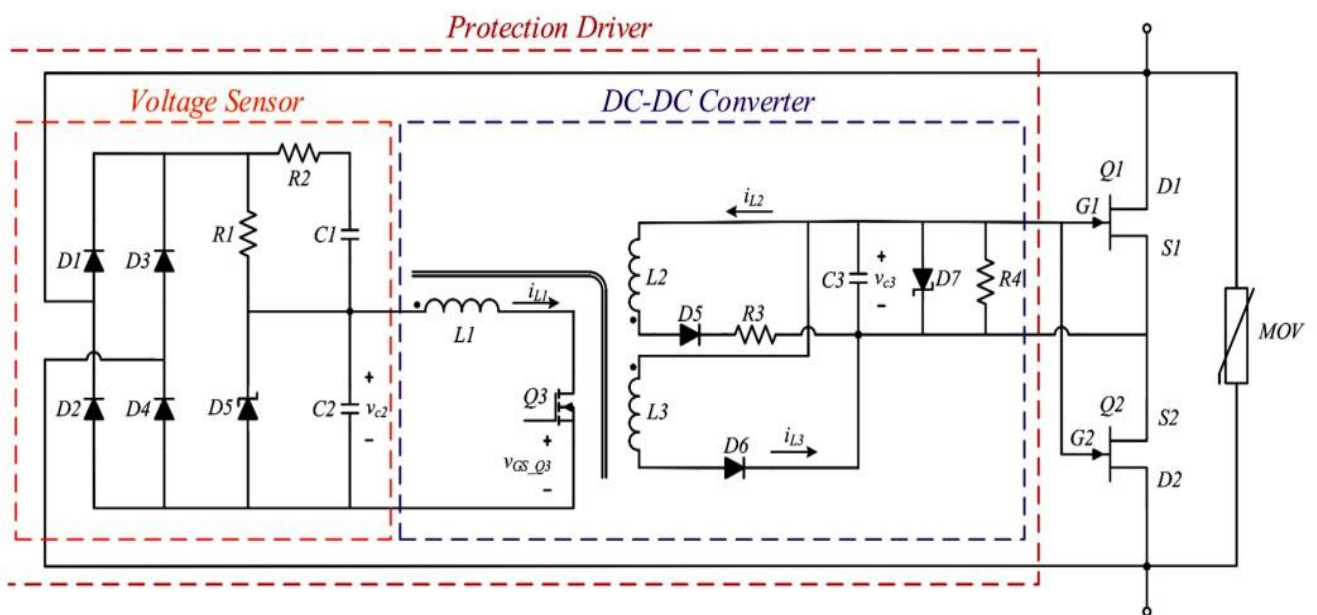


Slika 111 - Z-source SSCB

Izvor: Sanzad Lumen, S. M., Kannan, R., & Yahaya, N. Z. (2020). DC Circuit Breaker: A Comprehensive Review of Solid State Topologies. 2020 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon). doi:10.1109/pecon48942.2020.9314300

4.2.2. SiC JFET

Ovaj prekidač koristi poluvodički element silicij i ugljik u kombinaciji sa spojnim tranzistorom s efektom polja (eng. *Junction Field Effect Transistor*) [76]. Ovakav tip prekidača je modeliran tako da se može implementirati za jednostrani ili obostrani tok energije, i može još više ubrzati vrijeme odziva [77]. Ovaj prekidač ima dva terminala, i može se direktno postaviti na neko grananje kruga bez ikakvog vanjskog napajanja ili dodatnih kabela. Nedostatak je gubitak vođenja i mogući kvar oko osjetljivosti [78]. SiC JFET s obostranim tokom energije je prikazan na slici 19.



Slika 112 - SiC JFET

Izvor: Sanzad Lumen, S. M., Kannan, R., & Yahaya, N. Z. (2020). DC Circuit Breaker: A Comprehensive Review of Solid State Topologies. 2020 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon). doi:10.1109/pecon48942.2020.9314300

Također postoje i hibridni prekidači, često nazivani HCB, (eng. *Hybrid Circuit Breakers*) koji su kombinacija mehaničkih prekidača i solid state prekidača. Zbog unaprjeđivanja i poboljšanja sklopova energetske elektronike, solid state prekidači za istosmjerne sustave su u sve većem optjecaju, i može se očekivati rast korištenja istih.

5. SKLADIŠTA ENERGIJE

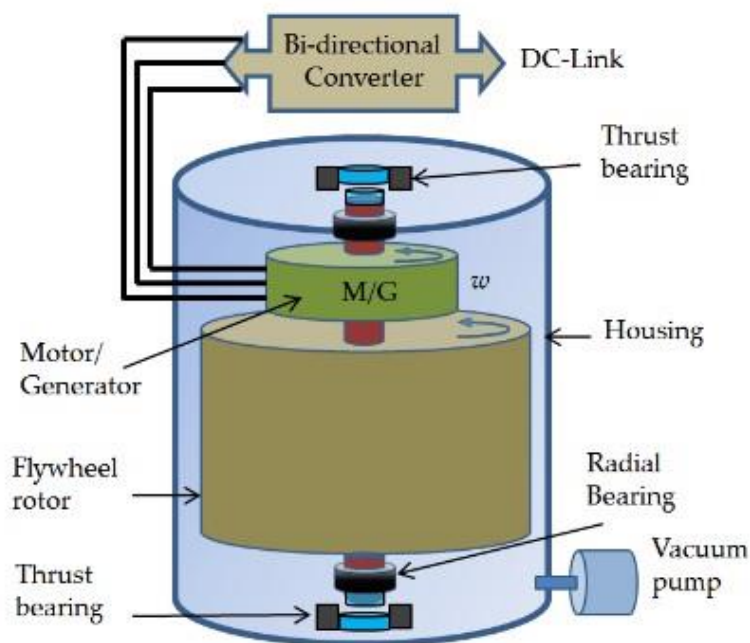
Električna energija kao takva se ne može pohraniti odnosno skladištiti već ju prvo treba pretvoriti u neki drugi oblik energije koji se može skladištiti. Neki od najčešće korištenih vrsta skladišta energije su mehanička i kemijska, a također postoje skladišta na bazi električnog i magnetskog polja. Skladišta energije se već koriste u kopnenim sustavima kao što su reverzibilne hidroelektrane [79]. Ovaj rad će razmatrati tri skladišta energije, to su zamašnjaci, superkondenzatori, i elektrokemijske baterije.

Skladišta energije su bitna za istosmjerne mikromreže upravo zato jer omogućavaju konstantnu dostupnost električne energije. Mikromreža sa skladištima energije može ponuditi upravljiv i predvidiv izvor napajanja. Zbog toga što je potražnja za električnom energijom u mikromreži vrlo promjenjiva, korištenje skladišta energije može omogućiti ravnotežu unutar same mikromreže, kao i cjelokupne električne centrale broda. Kada su skladišta energije instalirana u sklopu mikromreže, ona mogu pomoći toj nestabilnosti, i sama mikromreža može upravljati izlaznom snagom na npr. pogonski elektromotor. Bitno je spomenuti da mikromreža uz pomoć skladišta energije također ima mogućnost *peak shavinga*, odnosno rezanja vršnih razdoblja potrošnje, čime se povećava kvaliteta električne energije, čime se sustav „olakšava“ i poboljšava stopu opterećenja (eng. *load rate*) prema teretu [133]. Sa skladištima energije, određeni sustavi na brodu mogu i dalje nastaviti raditi iako su npr. neki drugi sustavi izvan funkcije. Ovakav koncept mikromreže gdje ona funkcionira nezavisno o ostalim sustavima se zove otočni modus rada. Ukoliko postoji višak proizvedene energije, ona se lako može skladištiti u neke od gorenavedenih skladišta energije, čime se ta energija „čuva“ za neku daljnju uporabu. Najčešće se koriste kada trenutni raspoloživi proizvodni kapaciteti ne mogu zadovoljiti potrošnju, čime se povećava sigurnost, žilavost i raspoloživost elektroenergetske mreže [134].

5.1. ZAMAŠNJACI

Zamašnjaci (eng. *flywheels*) su rotirajući mehanički uređaji koji skladištenje energije temelje na kinetičkoj energiji koja nastaje vrtnjom rotora [80]. Svi dijelovi zamašnjaka su zbog sigurnosti smješteni u metalno kućište. Kada je vrijeme punjenja zamašnjak se ubrzava pomoću elektromotora, a kod pražnjenja taj isti elektromotor u generatorskom radu kinetičku energiju

pretvara natrag u električnu [81]. Ukupna energija koju zamašnjak može skladištiti ovisi o njegovoj veličini i broju okretaja rotora. Idealno, rotor od zamašnjaka bi trebao imati čim manju gustoću, tj. biti čim lakši, a opet biti jako čvrst. Ovo su odlike kompozitnih materijala kao što su karbonska i polimerna vlakna [82]. Osim same čvrstoće, ukoliko dođe do raspadanja rotora, ako je rotor metalan njegovi dijelovi će se razletjeti na puno komada, dok ako je napravljen od već spomenutih kompozitnih materijala on se raspada na mekana vlakna. Zamašnjaci se dijele na spore i brze [83]. Spori zamašnjaci koriste čelik i ostale metalne legure i omogućavaju brzinu okretaja do 10000 RPM, čime ukupni gubici iznose ~0.5%-1% [84]. S druge strane, brzi zamašnjaci dostižu brzine do 100000 RPM, čime ukupni gubici iznose ~0.1% ukupne snage [85]. Ovaj tip zamašnjaka koristi već spomenute kompozitne materijale. Cjenovno, brzi zamašnjaci koštaju oko pet puta više od sporih zamašnjaka. Iako su spori zamašnjaci jeftiniji i zahtijevaju manje održavanja, brzi zamašnjaci mogu skladištiti više energije, te imaju manju masu i gubitke [86]. Slika 20 prikazuje konstrukciju zamašnjaka.



Slika 13 - Dijelovi zamašnjaka

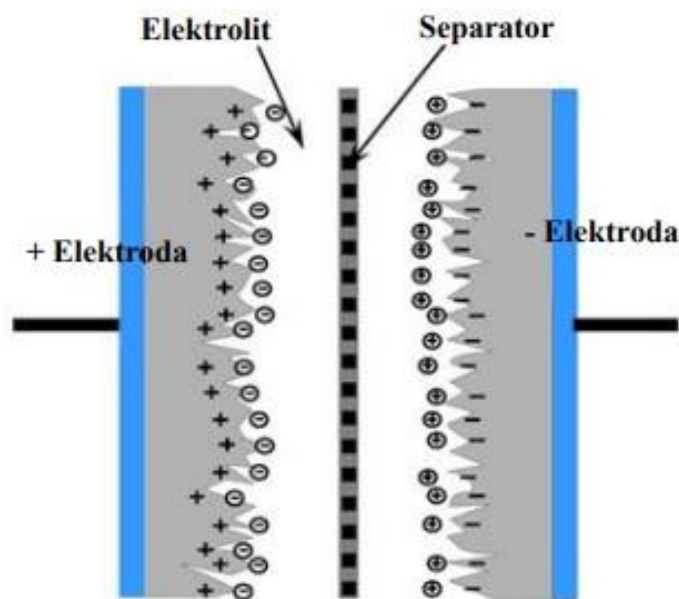
Izvor: <https://www.edn.com/is-it-again-time-for-the-flywheel-based-energy-storage-systems/>

5.2. SUPERKONDENZATORI

Superkondenzatori su tip skladišta energije koji se sastoje od dvije metalne elektrode na koje je nanoseno više slojeva ugljičnih nanovlakana, koja formiraju strukturu nalik na spužvu s

porama nano metarskih dimenzija [88]. Između tih elektroda se nalazi elektrolit i separator, kao što je vidljivo na slici 21. Zbog velike površine elektroda, superkondenzatori su u mogućnosti pohranjivati puno više energije nego klasični kondenzatori. Nazivni napon superkondenzatora ovisi o vrsti elektrolita. Ukoliko se koristi organski elektrolit (najčešće acetonitril CH_3CN) moguće je postići nazivne napone do 3 V, a ukoliko se koristi tekući elektrolit (najčešće otopine sumporne kiseline H_2SO_4) nazivni napon je limitiran na 1 V [89].

Iako je gustoća energije superkondenzatora veća od one konvencionalnih kondenzatora, znatno je niža od galvanskih članaka ili gorivih ćelija [90].



Slika 14 - Građa superkondenzatora

Izvor: Pehar I., "Superkondenzatori pripremljeni od aktivnog ugljika dobivenog iz kokosove ljuske", Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, diplomski rad, 2023.

5.3. ELEKTROKEMIJSKE BATERIJE

Ovaj tip tehnologije za skladištenje energije je najstariji, a i dalje svakodnevno prisutan u ljudskom životu. Mobitele, laptope, tablete, općenito razne prijenosne elektroničke uređaji napaja neka vrsta ovih baterija. U suštini, ovaj tip baterije se sastoji od ćelija u kojima se električna energija pretvara u kemijsku i obrnuto. Svaka od tih ćelija ima elektrolit koji je u čvrstoj ili tekućoj formi te pozitivne i negativne elektrode [91]. Bitno je napomenuti da je ova elektrokemijska reakcija reverzibilna, što omogućuje da se bateriju puni prilikom spajanja na neki vanjski izvor napona. Baterije o kojima će biti riječi u ovom radu su olovni akumulatori, nikal-kadmij (NiCd) baterije, litij-ionske baterije, i natrij-nikal-klorid (NaNiCl) baterije.

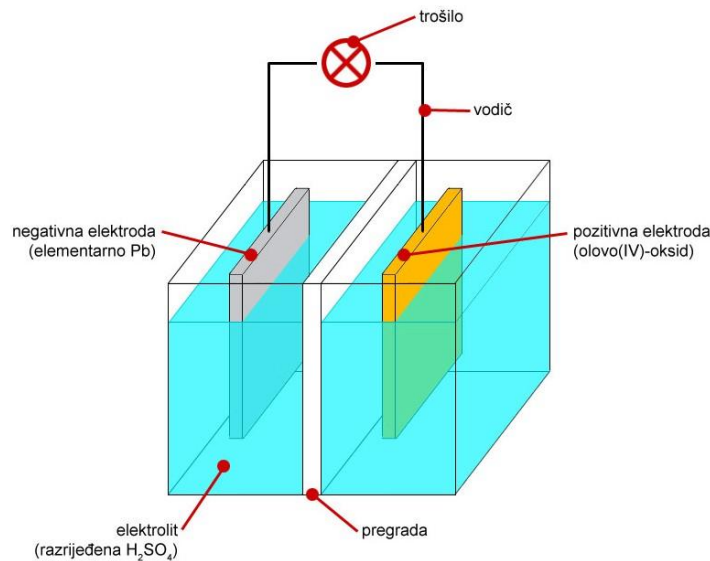
5.3.1. Olovni akumulatori

Olovni akumulator (često nazivan samo „akumulator“) je spremnik energije koji pretvorbu električne energije u kemijsku energiju (punjenje) akumulira određeni dio električne energije koja mu je dovedena. Ukoliko se priključi na neki vanjski teret/trošilo, kemijska energija se ponovno pretvara u električnu energiju (pražnjenje).

Olovni akumulator se sastoji od jednog ili više članaka koji sadrže dvije vrste elektroda koje su uronjene u elektrolit. U napunjenom stanju svaka ćelija se sastoji od negativne elektrode elementarnog olova (Pb) i pozitivne elektrode olovo (IV) oksida (PbO₂) u elektrolitu od približno 33.5% sumporne kiseline (H₂SO₄) [92]. U ispražnjenom stanju elektrolit gubi veliki dio razrijeđene sumporne kiseline. Pražnjenje se odvija tako da se obje ploče pretvaraju u olovni sulfat, čime se elektroni od pozitivne ploče kreću natrag u ćeliju na negativnu ploču. Punjenje se odvija prisilnim premještanjem elektrona s negativne ploče i njihovim dolaskom natrag na pozitivnu ploču.

Kapacitet olovnih akumulatora se izražava u Ah (ampersat). U pravilu, produkt vremena pražnjenja akumulatora s prosječnom jakosti struje pražnjenja trebao bi biti jednak kapacitetu akumulatora. Međutim olovni akumulatori su jako osjetljivi na cikluse pražnjenja i punjenja, pa postoje određena pravila koja govore kako najbolje iskoristiti olovni akumulator. Neka od tih pravila su da olovni akumulator ne smije ostati bez elektrolita i da se olovni akumulator ne smije prazniti ispod 1.8 V/ćeliji [93]. Olovni akumulatori danas se koriste u nekoliko

komercijalnih postrojenja za povećanje kvalitete električne energije, od kojih je najveće ono u Sjedinjenim Američkim Državama, kapaciteta 40 MWh [94].



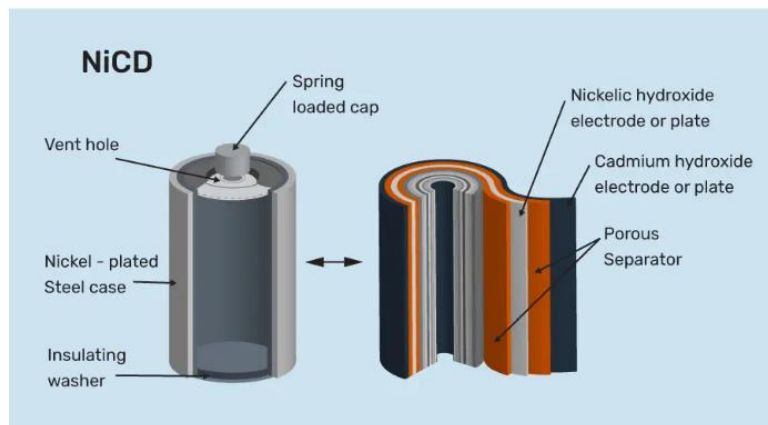
Slika 15 - Shematski prikaz olovnog akumulatora

Izvor: <https://www.autonet.hr/arhiva-clanaka/olovni-akumulator>

5.3.2. Nikal-kadmij (NiCd) baterije

Ovaj tip baterije funkcionira na principu kombiniranja dvije ili više NiCd baterijskih ćelija, koje se kombiniraju u obliku baterije. NiCd baterije rade na principu elektrolize. Nazivni napon ove baterije iznosi 1.2V. Specifična energija ove baterije iznosi oko 50-75 Wh/kg [95]. Ovaj tip baterije je puno manje osjetljiv na temperaturu, što ih čini korisnijim za ekstremnije uvjete. Također imaju veću gustoću snage od već spomenutih olovnih akumulatora [96] NiCd baterije se mogu više puta puniti i prazniti od olovnih akumulatora. Kad se govori o nedostacima, prvi nedostatak je cijena, koja može biti i do deset puta veća od cijene olovnih akumulatora. Osim toga, NiCd baterije imaju nižu efikasnost i veće gubitke zbog samopražnjenja koje mogu iznositi i više od 10% nazivnog kapaciteta u mjesec dana [97]. Također postoji memorijski efekt zbog kojeg se baterija ne može napuniti do kraja ako nije prošla nekoliko potpunih pražnjenja, zbog čega se preporuča da se NiCd bateriju nikad ne pušta napunjenu do kraja. Ciklus punjenja/pražnjenja bi se zbog održavanja trebao izvršavati svakih mjesec do tri mjeseca [98]. Ako se ciklus punjenja/pražnjenja redovno ne izvršava, i baterija se niti puni niti prazni šest mjeseci ili više, dolazi do „ukorjenjivanja“ kristala čime se gubi potpuni

kapacitet baterije [99]. Često se koriste u avijaciji, željezničkom prometu, ili u pomoćnim motorima za startanje turbina [100].

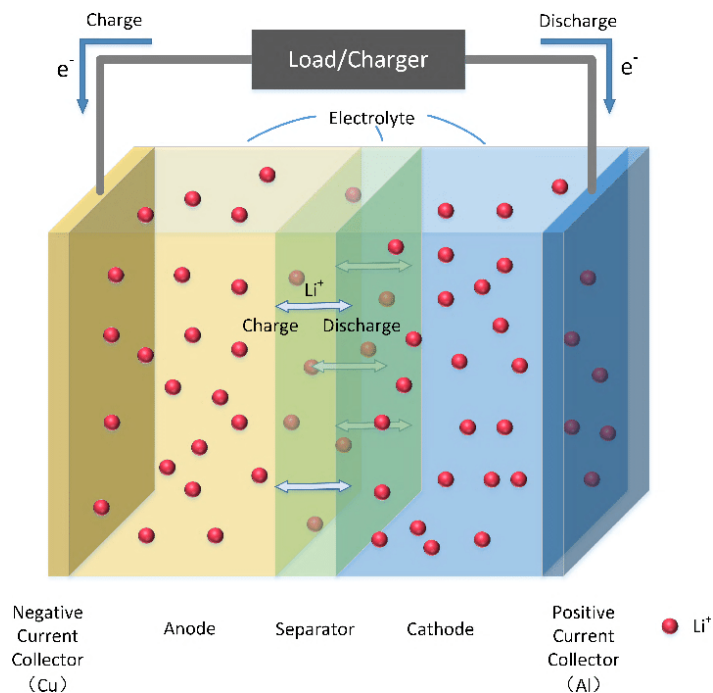


Slika 16 - Dijelovi NiCd baterije

Izvor: <https://www.solarreviews.com/blog/best-uses-for-nickel-cadmium-batteries>

5.3.3. Litij-ionske baterije

Litij ionske baterije su tip baterije koja koristi reverzibilnu redukciju litijevih iona da bi skladištila energiju.



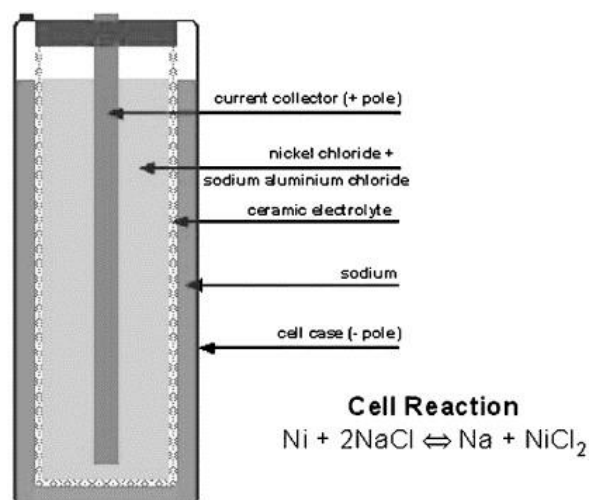
Slika 17 - Princip rada litij-ionske baterije

Izvor: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-Lithium-ion-battery_fig2_324929541

Anoda je najčešće grafit dok je katoda metalni oksid. Elektrolit je najčešće litijeva sol u organskom otapalu [101]. Nazivni napon ove baterije iznosi 3.7V, a specifična energija 100-265 Wh/kg [102]. Litij-ionske baterije nemaju memorijski efekt, što je prednost nad spomenutim nikal-kadmijevim baterijama. Ne sadrže kadmij, što ih čini puno lakšim za baciti. Zbog ovih prednosti, litij-ionske baterije su zamijenile nikal-kadmij baterije kad se govori o prijenosnim električnim uređajima kao što su mobiteli i/ili laptopi. Također se koriste u avionskom prometu, kao što je Boeing 787 (napajanje elektroničkih sustava) [103]. Trenutno se još uvijek ne upotrebljavaju za besprekidno napajanje i skladištenje energije velikih snaga, no bitno je napomenuti da električni automobili kao što su Nissan Leaf i Tesla Model S koriste litij-ionske baterije. Najveći minus ovih baterija je taj da se povećanjem radne temperature i predubokim pražnjenjem baterija smanjuje radni vijek, koji inače iznosi oko 1500 ciklusa punjenja i pražnjenja [104].

5.3.4. Natrij-nikal-klorid (NaNiCl) baterije

Ovaj tip baterije koristi nikal-klorid kao pozitivnu elektrodu, a natrij kao negativnu elektrodu. Radna temperatura ovih baterija je oko 300 °C i mogu raditi na ekstremnim uvjetima između -40 do +70 °C bez potrebe za dodatnim hlađenjem [105]. Nazivni napon iznosi oko 2.58 V, a specifična energija oko 120 Wh/kg. NaNiCl baterije nemaju memorijski efekt i podnose najmanje 1000 ciklusa punjenja i pražnjenja [106]. Koriste se na NSRS (NATO Submarine Rescue System) podmornicama (također poznate kao SRV – Submarine Rescue Vehicle), te im omogućava da ostanu ispod površine mora do 96 sati [107].



Slika 18 - Dijelovi NaNiCl baterije

Izvor: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775301008916>

6. ENERGETSKI PRETVARAČI

Energetski pretvarači su uređaji koji električnu energiju transformiraju iz jednog tipa u drugi tip i povezuju dva ili više različita električna sustava. Osim električnih veličina, energetske pretvarači mogu upravljati i neelektričnim veličinama kao što su: brzina vrtnje motora, jakost svjetlosti, temperatura itd. [108]. Prema valnom obliku na ulazu naspram valnog oblika na izlazu mogu se podijeliti u četiri osnovne kategorije:

-izmjenično-istosmjerni pretvarači (AC/DC)

-istosmjerno-izmjenični pretvarači (DC/AC)

-istosmjerno-istosmjerni pretvarači (DC/DC)

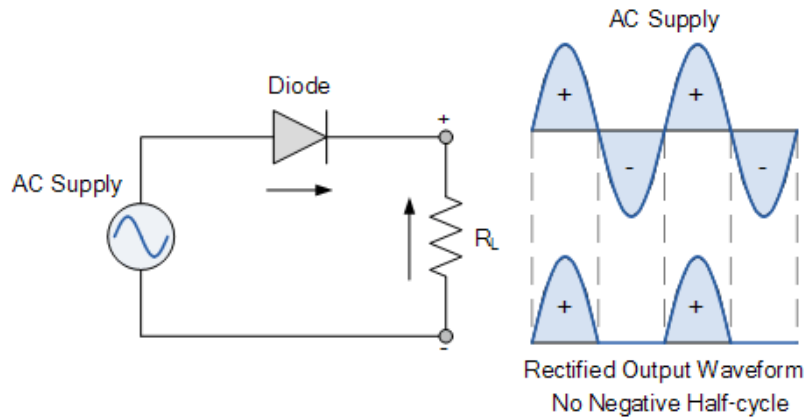
-izmjenično-izmjenični pretvarači (AC/AC)

6.1. IZMJENIČNO-ISTOSMJERNI PRETVARAČI

Izmjenično-istosmjerni pretvarači, također znani kao ispravljači, pretvaraju ulazni izmjenični napon u istosmjerni napon na izlazu. U matematičkom smislu istosmjerna struja je ona čiji se spektar sastoji samo od komponente čija je frekvencija jednaka nuli, odnosno istosmjerne komponente, dok u inženjerskom smislu svaka ona koja mijenja smjer. Ispravljač na izlazu daje istosmjernu struju u inženjerskom smislu koja uz istosmjernu komponentu ima i određenu izmjeničnu komponentu također znanu kao valovitost [109].

Ispravljač ima nekoliko podjela. Prva podjela je prema tome koriste li ispravljači pozitivnu ili obje poluperiode ulaznog izmjeničnog napona, prema čemu se dijele na poluvalne i punovalne. Druga podjela je prema vrsti ventila, čime se dijele na neupravljive, poluupravljive i punoupravljive. Neupravljivi se sastoje od dioda, poluupravljivi od jednakog broja dioda i tiristora, a punoupravljivi se sastoje od tiristora. Treća podjela je prema načinu rada, čime ispravljači mogu biti aktivni ili pasivni. Kod pasivnih ispravljača ventili se gase pojavom reverznog napona na ventilu, odnosno mrežno su komutirani, dok se kod aktivnih koristi prisilna komutacija punoupravljivih ventila [110].

Prema mogućnosti protoka energije ispravljači se dijele na jednosmjerne koji uzimaju energiju iz izmjenične mreže i predaju je istosmjernom trošilu ili dvosmjerne koji mogu i vraćati energiju natrag u izmjeničnu mrežu. Za primjer ispravljača je uzet jednofazni poluvalni diodni (neupravljivi) ispravljač opterećen djelatnim teretom.



Slika 19 - Jednofazni poluvalni diodni ispravljač

Izvor: <https://www.electronics-tutorials.ws/power/single-phase-rectification.html>

Kao što je vidljivo na slici 26, dioda propušta struju samo u jednom smjeru. Kod ovog tipa opterećenja (djelatno) struja tereta odgovara naponu. Budući da dioda vodi tijekom pozitivne poluperiode, na teretu se javlja poluvalno ispravljeni napon i struja istog oblika. Srednja komponenta, odnosno srednja vrijednost ispravljenog sinusnog napona iznosi [111]:

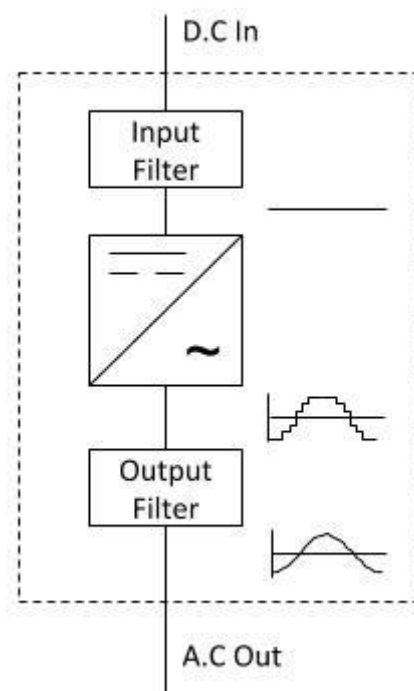
$$U_{DC} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} U_{max} \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{U_0}{\pi} = 0.318U_0 \quad (2)$$

Gdje U_{DC} označava srednju vrijednost ispravljenog sinusnog napona, U_{MAX} maksimalni napon, a U_0 početni napon.

6.2. ISTOSMJERNO-IZMJENIČNI PRETVARAČI

Istosmjerno-izmjenični pretvarači, također znani kao izmjenjivači, pretvaraju ulazni istosmjerni napon u izmjenični napon na izlazu. U idealnom slučaju, tako dobiveni izmjenični napon bio bi čisto sinusnog oblika promjenjive amplitude i frekvencije. Kako je izmjenjivač izveden pomoću poluvodičkih sklopki, za očekivati je kako će valni oblik izlaznog izmjeničnog napona biti sastavljen od niza diskretnih vrijednosti s brzim prijelazima između dvaju ili više naponskih nivoa [112]. Razlikuju se dvije vrste izmjenjivača, a to su izmjenjivači s utisnutom

strujom i izmjenjivači s utisnutim naponom. Glavna razlika između ova dva tipa je taj da se izmjenjivači s utisnutom strujom napajaju iz istosmjernog strujnog izvora (koji se dobiva serijskim spojem velikog induktiviteta koji omogućava konstantnu struju), dok se izmjenjivači s utisnutim naponom napajaju iz naponskog izvora (koji se dobiva paralelnim spojem velikog kondenzatora koji omogućavaju konstantni napon). Na slici 27 je prikazana osnovni blok dijagram izmjenjivača, čiji se izlazni valni oblik ponaša sinusno. Za primjer izmjenjivača je uzet jednofazni izmjenjivač s utisnutim naponom u mosnom spoju, također poznat kao H-bridge.



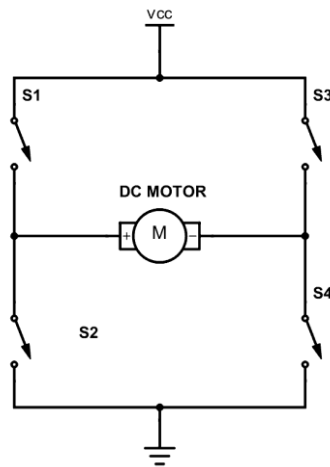
Slika 20 – Blok dijagram izmjenjivača

Izvor: <https://myelectrical.com/notes/entryid/250/how-d-c-to-a-c-inverters-work>

Istosmjerni napon na ulazu H-bridgea je konstantan. Izmjenični napon na izlazu izmjenjivača ostvaruje se programiranim radom poluvodičkih sklopki T1, T2, T3, i T4 [113]. Ovisno koja poluvodička sklopka vodi, napon na izlazu može iznositi $+U_{dc}$, $-U_{dc}$, ili 0 V . Na slici 28 je prikazan jednofazni izmjenjivač s utisnutim naponom u mosnom spoju, odnosno H-bridge. Efektivna vrijednost osnovnog harmonika izlaznog napona za mosni spoj može se izračunati kao [114] :

$$U_{izl1} = m_a U_{dc} (3)$$

Gdje U_{izl1} označava izlazni napon izmjenjivača, m_a indeks amplitudne modulacije, a U_{dc} istosmjerni napon na ulazu u izmjenjivač.



Slika 21 - Jednofazni izmjenjivač s utisnutim naponom u mosnom spoju

Izvor: <https://www.build-electronic-circuits.com/h-bridge/>

6.3. ISTOSMJERNO-ISTOSMJERNI PRETVARAČI

Istosmjerno-istosmjerni prekidači su prekidački regulatori istosmjernog napona (struje). Oni uključivanjem i isključivanjem elektroničkih ventila sjeckaju ulazni napon i tako na izlazu daju regulirani istosmjerni napon (ili struju) koji je obično niži, ali može biti i viši od ulaznog [115]. U literaturi su često nazivani chopperima upravo zato jer sjeckaju napon. Visina izlaznog napona odnosno jakos struje ovisi o faktoru intermitencije D (eng. *Duty Cycle*), odnosno omjeru trajanja kad je ventil uključen i perioda T nakon kojeg se ciklus ponavlja [116]. Većinski rade na višim frekvencijama kako bi se izlazni napon lakše filtrirao, i kako bi valovitost izlaznog napona (struje) bila što manja. Ovo poglavlje će obuhvatiti DC-DC pretvarač za sniženje napona (Buck converter), DC-DC pretvarač za povećanje napona (Boost converter), DC-DC pretvarač za povećanje i sniženje napona (Buck-Boost converter).

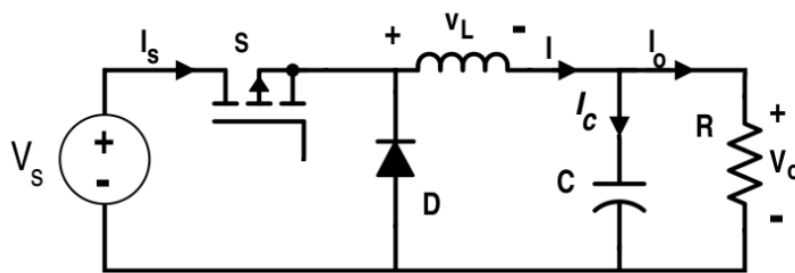
6.3.1. Pretvarač za sniženje napona (Buck converter)

DC-DC pretvarač za sniženje napona, često nazivan buck converter, uzima ulazni istosmjerni napon i pretvara ga u manji izlazni istosmjerni napon. Ovaj tip pretvarača se sastoji od izvora napona, poluvodičke sklopke S , diode, prigušnice L , kondenzatora C , i tereta R [117] kao što je vidljivo na slici 29

Kod ovog pretvarača izlazni napon na teretu je uvijek manji od ulaznog napona i računa se kao [118]:

$$U_{OUT} = D * U_{IN}(4)$$

Gdje je U_{OUT} napon na teretu, D faktor intermitencije, a U_{IN} napon izvora. Kada poluvodička sklopka vodi, izvor predaje energiju teretu. Istovremeno se na zavojnici L i kondenzatoru C pohranjuje energija u obliku magnetskog i električnog polja. Kada poluvodička sklopka S ne vodi, energija pohranjena u zavojnici i kondenzatoru se prazni u teret, čime on ima manji napon od napona izvora [119].

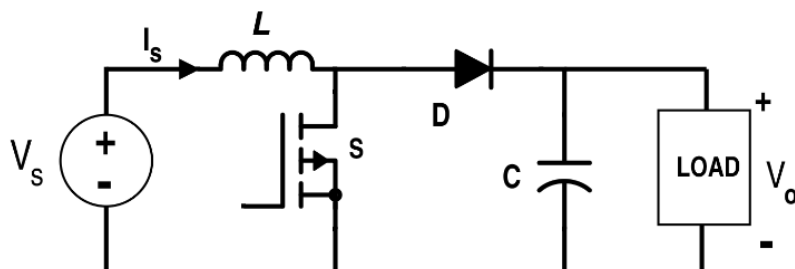


Slika 22 - Buck converter

Izvor: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/analysis-of-four-dc-dc-converters-in-equilibrium/>

6.3.2. Pretvarač za povećanje napona (Boost converter)

DC-DC pretvarač za povećanje napona, često nazivan boost converter, uzima ulazni istosmjerni napon i pretvara ga u veći izlazni istosmjerni napon. Ovaj tip pretvarača se također sastoji od izvora napona, poluvodičke sklopke S , diode, induktiviteta L , kondenzatora C , i tereta R kao što je vidljivo na slici 30.



Slika 23 - Boost converter

Izvor: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/analysis-of-four-dc-dc-converters-in-equilibrium/>

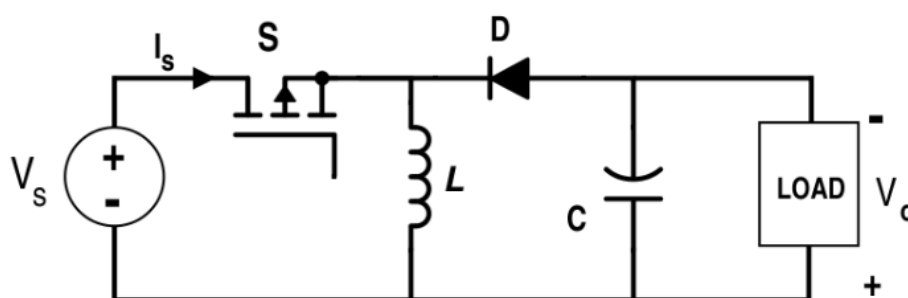
Kod ovog tipa pretvarača, napon na teretu je uvijek veći od napona izvora i računa se kao [120]:

$$U_{OUT} = \frac{U_{IN}}{1 - D} \quad (5)$$

Gdje je U_{OUT} napon na teretu, D faktor intermitencije, a U_{IN} napon izvora. Kada poluvodička sklopka vodi, ona spoji induktivitet L paralelno izvoru pri čemu započinje punjenje induktiviteta. Prije završetka prijelazne pojave kada je induktivitet preuzeo dovoljno energije za željeni režim rada, poluvodička sklopka prestane voditi. Energija sadržana u magnetskom polju induktiviteta nastoji zadržati isti magnetski tok, pa nastavlja tjerati istu struju u krugu U_{IN} - L - D - C - U_{IN} pri čemu se kondenzator puni na napon viši od napona izvora U_{IN} [121] čime je napon na teretu veći od napona izvora. Napon na kondenzatoru ovisi o faktoru intermitencije, odnosno vremenu uključenosti poluvodičke sklopke.

6.3.3. Pretvarač za povećanje i snižavanje napona (Buck-boost converter)

DC-DC pretvarač za povećanje i sniženje napona, često nazivan buck-boost converter uzima ulazni istosmjerni napon i pretvara ga u veći, manji, ili jednaki izlazni istosmjerni napon suprotnog predznaka u odnosu na ulazni. Ovaj tip pretvarača se također sastoji od izvora napona, poluvodičke sklopke S , diode, induktiviteta L , kondenzatora C , i tereta R kao što je vidljivo na slici 31.



Slika 24 - Buck-boost converter

Izvor: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/analysis-of-four-dc-dc-converters-in-equilibrium/>

Kod ovog tipa pretvarača, napon na teretu je ili veći ili manji ili jednak od napona izvora i računa se kao [123]:

$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = \frac{-D}{(1-D)} \quad (6)$$

Gdje je U_{OUT} napon na teretu, D faktor intermitencije, a U_{IN} napon izvora. Kada poluvodička sklopka vodi, i ona spaja induktivitet L paralelno izvoru pri čemu započinje punjenje induktiviteta. Kao i kod boost convertera, kada je induktivitet preuzeo dovoljno energije za željeni režim rada, poluvodička sklopka prestane voditi. I kod ovog tipa pretvarača energija sadržana u magnetskom polju induktiviteta nastoji zadržati isti magnetski tok, pa nastavlja tjerati istu struju u krugu L-C-D-L [124].

Induktivitet predaje energiju kondenzatoru tokom samo jedne poluperiode, odnosno dok struja ne padne na 0 kada bi trebala promijeniti smjer, što ne dozvoljava dioda D . Napon na kondenzatoru ovisi o faktoru intermitencije, odnosno vremenu uključenosti poluvodičke sklopke, čime se na teretu (izlazu) dobiva viši, manji, ili jednaki napon.

Bitno je napomenuti da snaga koju predaje izvor mora biti ista kao i prosječna snaga koja se troši na teretu, što je prikazano sljedećom formulom [125]:

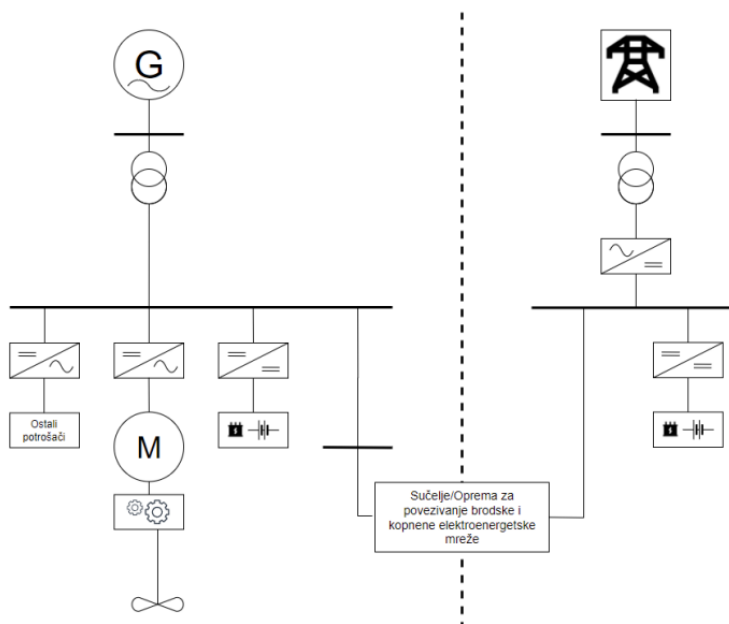
$$I_L = \frac{U_{OUT}^2}{U_{IN}RD} = \frac{P_{OUT}}{U_{IN}D} = \frac{U_{IN}D}{R(1-D)^2} \quad (7)$$

7. SPAJANJE BRODSKE DC MREŽE I KOPNENOG SUSTAVA

Kopneni priključak brodova se pokazuje bitnim elementom koji bi mogao smanjiti onečišćenje u lukama te iz tog razloga luke sve više ugrađuju uređaje koji omoguću brodovima povezivanje sa distribucijskom mrežom. Novi zakon EU, tzv. „Fit for 55“, govori da će svi kontejnerski i putnički brodovi do 2030. godine morati koristiti kopneni sustav za sve vlastite potrebe za napajanjem ukoliko ostaju na pristaništu većih luka unutar EU duže od dva sata [126]. Budući da brodovi u blizini luke moraju koristiti skuplja, ekološki prihvatljivija goriva, za njih je često ekonomski povoljnije spojiti se na distribucijsku mrežu luke [127]. Budući da se rad temelji na brodskim istosmjernim mikromrežama, pozornost će biti na dva tipa priključaka: istosmjerni priključak za punjenje brodova s istosmjernom sabirnicom, i izmjenični priključak za punjenje brodova s istosmjernom sabirnicom.

7.1. ISTOSMJERNI PRIKLJUČAK ZA PUNJENJE BRODOVA S ISTOSMJERNOM SABIRNICOM

Istosmjerni kopneni priključak za punjenje brodova s istosmjernom sabirnicom prikazan je na slici 34.



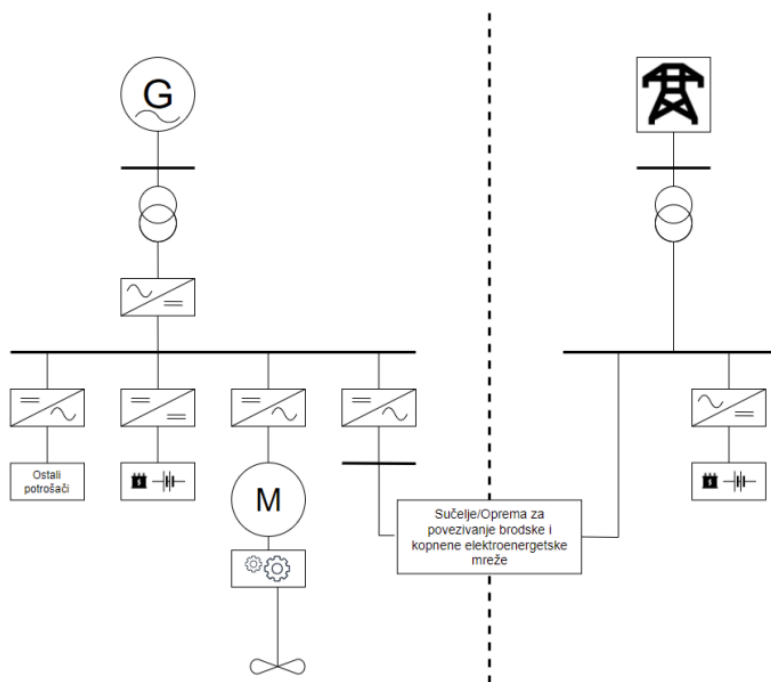
Slika 32 - Topologija DC kopnenog priključka za punjenje brodova sa DC sabirnicom

Izvor: I. Panić, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, "Optimizacija elektroenergetskog sustava kopnenih priključaka za hibridne i električne ro-ro putničke brodove

U ovoj konfiguraciji postoji samo jedan način prijenosa energije gdje istosmjerna kopnena sabirnica predaje energiju preko sučelja direktno na brodsku sabirnicu. Ova topologija uklanja potrebu za prilagodbom napona između sučelja i brodske sabirnice ili između sučelja i brodskih skladišta energije što iz topologije uklanja jedan do dva elektronička pretvarača napona [128]. Osim toga, nije potrebno vršiti dodatnu prilagodbu napona prema brodskim skladištima energije, što znači da se ta funkcionalnost može vršiti samo jednim istosmjerno-istosmjernim pretvaračem [129].

7.2. IZMJENIČNI PRIKLJUČAK ZA PUNJENJE BRODOVA SA ISTOSMJERNOM SABIRNICOM

Izmjenični kopneni priključak za punjenje brodova s istosmjernom sabirnicom prikazan je na slici 35.



Slika 33 – Topologija AC kopnenog priključka za punjenje brodova sa DC sabirnicom

Izvor: I. Panić, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet,
 “Optimizacija elektroenergetskog sustava kopnenih priključaka za
 hibridne i električne ro-ro putničke brodove

Kao i kod istosmjernog kopnenog priključka, istosmjerna brodska sabirnica eliminira potrebu za sinkronizacijom kopnenog i brodskog elektroenergetskog sustava te je jedino potrebno osigurati jednaku magnitudu napona sučelja i brodske mreže što se može ostvariti primjenom sklopova energetske elektronike za prilagodbu napona [130]. Skladišta energije kod hibridnih brodova mogu se puniti i zasebnim ispravljačem bez napajanja brodske sabirnice, što je manje poželjno rješenje jer u tom slučaju brodsku istosmjernu sabirnicu moraju napajati brodski izvori energije kao što je dizel generator [131], dok kod potpuno baterijskih brodova s istosmjernom sabirnicom ovaj pristup nije moguć ako se želi zadržati rad ostalih potrošača. Tokom energije između brodske sabirnice i brodskih skladišta energije upravlja se aktivnim pretvaračem energetske elektronike [132].

8. ZAKLJUČAK

Brodске istosmjernе mikromreže su postale sve zanimljiviji koncept u pomorskoj industriji zbog svoje učinkovitosti i pouzdanosti. Činjenica da brodovi mogu koristiti istosmjernе izvore energije im omogućuju da uz minimalan trud (primjerice nema potrebe za istosmjerno-izmjeničnim pretvaračima) koriste energiju iz istosmjernih izvora kao što su solarni paneli ili baterije. Ovakav pristup ima brojne prednosti u usporedbi s tradicionalnim izmjeničnim izvorima energije.

Trenutna situaciju u pomorstvu pokazuje sve veći interes glede brodskih istosmjernih mikromreža. S obzirom na sve veće zahtjeve Europske unije za energetsom učinkovitošću i smanjenjem emisija štetnih plinova, kao što je već spomenuti zakon „Fit for 55“, puno kompanija postaju sve svjesnije prednosti koji pruža istosmjerni razvod na brodu. Mnoge luke diljem svijeta su već implementirale infrastrukturu za punjenje električnih ili hibridnih brodova, što samo pomaže popularnosti i sve većem širenju ovog načina plovidbe.

Očekuje se da će sve više brodova koristiti obnovljive izvore energije, što uključuje korištenje nekih od spomenutih skladišta energije. Baterijske tehnologije pružaju sve veću gustoću energije i dulje trajanje, što omogućuje brodovima da duže vrijeme koriste obnovljive izvore energije. Brodske istosmjernе mikromreže omogućavaju brodovima da postanu (gotovo) energetski samodostatni i da smanje svoju ovisnost o fosilnim gorivima.

Brodске istosmjernе mikromreže postaju sve važniji čimbenik u pomorskoj industriji. Bitno je napomenuti da se brodske mikromreže mogu povezati s pametnim sustavima na brodu kao što su novije verzije ECDIS-a ili CCTV kamera, što omogućuje bolje upravljanje i optimizaciju potrošnje energije. Trenutno, jedan od većih problema kod korištenja istosmjernog razvoda na brodu su prekidači, no i ta tehnologija se svakim danom sve više optimizira i usavršava.

Što se tiče održivosti, brodske mikromreže su prema autorovom mišljenju ključ za postizanje istoga. Ova tehnologija predstavlja ključni korak prema više održivim i ekološki prihvatljivijim brodskim pogonima.

POPIS LITERATURE

- [1] E. Skjong, R. Volden, E. Rødskar, M. Molinas, T. A. Johansen, and J. Cunningham, "Past, Present and Future Challenges of the Marine Vessel's Electrical Power System", IEEE Transactions On Transportation Electrification, vol. PP, issue: 99, Apr 2016
- [2] O. Peake, "The History of High Voltage Direct Current Transmission," in 3rd Australasian Engineering Heritage Conference, Dunedin, New Zealand, 2009, p. 8.
- [3] C. Sulzberger, "Thomas Edison's 1882 Pearl Street Generating Station," IEEE Global History Network.
- [4] E. Skjong, R. Volden, E. Rodskar, M. Molinas, T. Johansen, and J. Cunningham, "Past, Present and Future Challenges of the Marine Vessel's Electrical Power System," IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2016.
- [5,6,10,56] R. Prenc, A. Cuculić, I. Baumgartner, „Advantages of using a DC power system on board ship“, Pomorski zbornik 2016.
- [7] B. Chandrasekhar, „High Voltage System On Ship|Safeties|Advantage|Disadvantage“, MarineSite.Info
- [8] J. F. Hansen, J. O. Lindtjørn, U.U. Ødegaard, T.A. Myklebust; Increased operational performance of OSVs by Onboard DC Grid; 4th International Conference on Technology and Operation of Offshore Support Vessels; Singapore August 2011
- [9] M. Patel, "Shipboard Electrical Power Systems", ser. Shipboard Electrical Power Systems. Taylor & Francis, 2011
- [11] K. Lucić, "Usporedba različitih topologija mikromreža", Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2021.
- [12] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Mikromre%C5%BEE>
- [13,16,18,19,20] Zheming Jin, Mehdi Savaghebi, Juan C. Vasquez, Lexuan Meng, Josep M. Guerrero, „Maritime DC Microgrids - A Combination of Microgrid Technologies and Maritime Onboard Power System for Future Ships“, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 2016.
- [14] IEEE Recommended Practice for 1 kV to 35 kV Medium-Voltage DC Power Systems on Ships," in IEEE Std 1709-2010, vol., no., pp.1-54, Nov 2010
- [15] Guerrero, J.M.; Vasquez, J.C.; Matas, J.; de Vicuña, L.G.; Castilla, M., "Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization," in Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol.58, no.1, pp.158-172, Jan 2011.
- [17] Cuzner, R.M.; Esmaili, D.A., "Fault tolerant shipboard MVDC architectures," in Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS), 2015 International Conference on, vol., no., pp.1-6, 3-5 March 2015

- [18,19,20] C. Dou; D. Yue; J. M. Guerrero; X. Xie; S. Hu, "Multiagent SystemBased Distributed Coordinated Control for Radial DC Microgrid Considering Transmission Time Delays," in IEEE Transactions on Smart Grid, Early Access, 2016
- [21,22] https://en.wikipedia.org/wiki/Droop_speed_control
- [23] <https://www.marinesite.info/2013/09/what-is-governor-droop-why-governor.html>
- [24] Woodward Reference Manual, „Governing Fundamentals and Power Management “, Manual 26260,p.13 2004.
- [25] Ploumpidou, E. Supporting the Transition to DC Micro Grids in the Built Environment 2017; Technische Universiteit Eindhoven: Eindhoven, The Netherlands, 2017.
- [26] General Electric Company. High Voltage Direct Current Systems; General Electric Company: New York, NY, USA, 2016.
- [27] RTE. PE Interface to AC Grid: Grid Forming Control for a More Resilient Transmission Grid, and a Flexible DC Connection of Grid Customers; RTE: Paris, France, 2020.
- [28,33] Ullah, S.; Haidar, A.M.A.; Hoole, P.; Zen, H.; Ahfock, T. The Current State of Distributed Renewable Generation, Challenges of Interconnection and Opportunities for Energy Conversion Based DC Microgrids. J. Clean. Prod. 2020, 273, 122777.
- [29,47] Kumar, D.; Zare, F.; Ghosh, A. DC Microgrid Technology: System Architectures, AC Grid Interfaces, Grounding Schemes, Power Quality, Communication Networks, Applications, and Standardizations Aspects. IEEE Access 2017, 5, 12230–12256.
- [30] <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=56429>
- [31,32] Chandra, A.; Singh, G.K.; Pant, V. Protection Techniques for DC Microgrid-A Review. Electr. Power Syst. Res. 2020, 187, 106439.
- [34,35,36,38] Fotopoulou, M.; Rakopoulos, D.; Trigkas, D.; Stergiopoulos, F.; Blanas, O.; Voutetakis, S. State of the Art of Low and Medium Voltage Direct Current (DC) Microgrids. Energies 2021, 14, 5595.
- [37] AlLee, G.; Tschudi, W. Edison Redux: 380 Vdc Brings Reliability and Efficiency to Sustainable Data Centers. IEEE Power Energy Mag. 2012, 10, 50–59.
- [39] Fregosi, D.; Ravula, S.; Brhlik, D.; Saussele, J.; Frank, S.; Bonnema, E.; Scheib, J.; Wilson, E. A Comparative Study of DC and AC Microgrids in Commercial Buildings across Different Climates and Operating Profiles. In Proceedings of the 2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM), Atlanta, GA, USA, 7–10 June 2015; pp. 159–164.
- [40,41] Liang, D.; Zou, J.; Wang, Z.; Yang, B. Research on DC Vacuum Switch of Micro-Grid in Road Lighting. In Proceedings of the 2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), Xi’an, China, 25–27 May 2018; pp. 242–246.
- [42] Quintana, P.J.; Huerta, N.; Rico-Secades, M.; Calleja, A.J.; Corominas, E.L. Control of Public Dc Street/Road Lighting Microgrids with Microgeneration and Storage Capability Based on a Power-Line Signaling Dependent Droop. In Proceedings of the 2016 13th International Conference on Power Electronics (CIEP), Guanajuato, Mexico, 20–23 June 2016; pp. 98–103.

- [43] Vaidya, M.; Stefanakos, E.K.; Krakow, B.; Lamb, H.C.; Arbogast, T.; Smith, T. Direct DC-DC Electric Vehicle Charging with a Grid Connected Photovoltaic System. In Proceedings of the Conference Record of the Twenty Fifth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-1996, Washington, DC, USA, 13–17 May 1996; pp. 1505–1508.
- [44,46] ABB. Medium Voltage Products, Technical Application Papers No. 24-Medium Voltage Direct Current Applications; ABB: Zurich, Switzerland, 2017.
- [45] Senfelds, A.; Apse-Apsitis, P.; Avotins, A.; Ribickis, L.; Hauf, D. Industrial DC Microgrid Analysis with Synchronous Multipoint Power Measurement Solution. In Proceedings of the 2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe), Warsaw, Poland, 11–14 September 2017; pp. P.1–P.6.
- [47] Feng, C.; Wang, S.; Mu, Q. Chapter 21 DC grid power flow control devices. In HVDC Grids: For Offshore and Supergrid of the Future; Wiley-IEEE Press: Hoboken, NJ, USA, 2016; p. 528. ISBN 978-1-118-85915-5.
- [48] Anusha Pillay, S. Prabhakar Karthikeyan, D.P. Kothari, Congestion management in power systems – A review, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 70, 2015, Pages 83-90, ISSN 0142-0615
- [49,54] Hodel, C.; Beck, M. Overview of Ancillary Services, Switzerland. 2010
- [50] Hirst, E.; Kirby, B. Electric-Power Ancillary Services. Oak Ridge Natl. Lab. 1996, 9, 26–30.
- [51] Corsi, S. Voltage Control and Protection in Electrical Power Systems; Springer: London, UK, 2015; pp. 163–190. ISBN 978-1-4471-6636-8
- [52] Tielens, P.; Van Hertem, D. The Relevance of Inertia in Power Systems. Renew. Sustain. Energy Rev. 2016, 55, 999–1009.
- [53,55] ENTSO-E. Need for Synthetic Inertia (SI) for Frequency Regulation.
- [57,58] J. F. Hansen, J. O. Lindtjørn, and K. Vanska, “Onboard DC grid for enhanced DP operations in ships,” in Proc. of MTS Dynamic Positioning Conf., 2011, pp. 1-8
- [59,60,61] Knežević Ivan, „Istosmjerni razvod na brodu“, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, 2016.
- [62,63,64] <https://www.elprocus.com/air-circuit-breaker-acb-working-principle-application/>
- [65] <https://electricalswitchboards.com.au/air-circuit-breaker-works/>
- [66,67] <https://www.tutorialspoint.com/difference-between-mccb-and-acb#>
- [68] <https://www.se.com/in/en/faqs/FA12108/>
- [69,70] <https://eshop.se.com/in/blog/post/5-differences-between-mcb-and-mccb.html>
- [71,72] Rodrigues, R., Du, Y., Antoniazzi, A., & Cairoli, P. (2020). A Review of Solid-State Circuit Breakers. IEEE Transactions on Power Electronics, 1–1. doi:10.1109/tpel.2020.3003358

- [73] K. A. Corzine and R. W. Ashton, "A New Z-Source DC Circuit Breaker," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 6,
- [74,75,77] Sanzad Lumen, S. M., Kannan, R., & Yahaya, N. Z. (2020). DC Circuit Breaker: A Comprehensive Review of Solid State Topologies. 2020 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon). doi:10.1109/pecon48942.2020.9314300
- [76,78] Z. Miao, G. Sabui, A. M. Roshandeh, and Z. J. Shen, "Design and Analysis of DC Solid-State Circuit Breakers Using SiC JFETs," IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron., vol. 4, no. 3, pp. 863–873, 2016.
- [79,81,82,88,89,95,97,105,134] Cuculić A., „Tehničko-ekonomska analiza primjene skladišta energije u elektroenergetskim sustavima plovnih objekata s dinamičkim pozicioniranjem“, disertacija, Sveučilište u Rijeci, Pomorski Fakultet, 2015.
- [80] Stanković V., „Spremници električne energije u mikromrežama“, diplomski rad, Sveučilište Josip Juraj Strossmayer Osijek, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2017.
- [83] R. Hebner, J. Beno, and A. Walls, "Flywheel batteries come around again," IEEE Spectr., vol. 39, no. 4, pp. 46–51, Apr. 2002
- [84] K. Veszpremi and I. Schmidt, "Flywheel energy storage drive for wind turbines," in Proc. 7th Int. Conf. Power Electron. Drive Syst., Bangkok, Thailand, Nov. 2007, pp. 916–923.
- [85,86] Awadallah, M. A., & Venkatesh, B. (2015). Energy Storage in Flywheels: An Overview. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 38(2), 183–193. doi:10.1109/cjece.2015.2420995
- [87] <https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor>
- [90] Pehar I., "Superkondenzatori pripravljeni od aktivnog ugljika dobivenog iz kokosove ljuske", Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, diplomski rad, 2023.
- [91,92,93] <https://www.munja.hr/proizvodi/olovno-kiselinski-akumulator/>
- [94] T. Moore and J. Douglas, EPRI J, no. Spring issue, pp. 16-23, 2006
- [96] <https://www.genserveinc.com/2022/06/17/what-is-the-difference-between-lead-acid-and-nicad-generator-batteries/>
- [98,99] <https://batteryuniversity.com/article/bu-807-how-to-restore-nickel-based-batteries>
- [100] https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel%E2%80%93cadmium_battery
- [101] https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery
- [102,103] <https://www.cei.washington.edu/education/science-of-solar/battery-technology/>
- [104] Adrian Soto, Alberto Berrueta, Miren Mateos, Pablo Sanchis, Alfredo Ursúa, „Impact of micro-cycles on the lifetime of lithium-ion batteries: An experimental study“, Institute of Smart Cities (ISC), Department of Electrical, Electronic and Communications Engineering, Public University of Navarre (UPNA)

- [106] Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A., Efthimiou, V., Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 6-7, pp. 1513-1522, 2009.
- [107] https://en.wikipedia.org/wiki/NATO_Submarine_Rescue_System
- [108,126] Petar Rajaković, *Energetska elektronika 1, udžbenik*, Element
- [109,110,111,112,113,114] A.Cuculić, *Predavanje iz kolegija Energetska elektronika, Ispravljajući 1.dio*, Merlin 20/21
- [115,116,117,118] A.Cuculić, *Predavanje iz kolegija Energetska elektronika, Linearni regulatorni napona i DC-DC pretvarači (1.dio)*, Merlin 20/21
- [119] Fossas, E., & Olivar, G. (1996). Study of chaos in the buck converter. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 43(1), 13–25. doi:10.1109/81.481457
- [120,121,122,123,124,125] A.Cuculić, *Predavanje iz kolegija Energetska elektronika, Linearni regulatorni napona i DC-DC pretvarači (2.dio)*, Merlin 20/21
- [126] <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20230320IPR77909/fit-for-55-deal-on-new-eu-rules-for-cleaner-maritime-fuels>
- [127] L. Repušić, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, „Postrojenja za kopneno priključenje brodova na elektroenergetsku mrežu“, diplomski rad
- [128,129,130,131,132] I. Panić, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, „Optimizacija elektroenergetskog sustava kopnenih priključaka za hibride i električne ro-ro putničke brodove“, disertacija, 2022.
- [133] Application of energy storage technology in the microgrid. (2019). *Grid-Scale Energy Storage Systems and Applications*, 243–293. doi:10.1016/b978-0-12-815292-8.00007-1
- [134,137] Huang Y, Wang L, Zhang Y, Wang L and Zhao Z (2022) An Overview of Multi-Energy Microgrid in All-Electric Ships. *Front. Energy Res.* 10:881548. doi: 10.3389/fenrg.2022.881548
- [135] A. Cuculić, predavanja iz kolegija Električni poriv broda, Eksploatacijske prednosti električne propulzije, Merlin 20/21
- [136] <https://new.abb.com/low-voltage/products/circuit-breakers/legacy-products/sace-new-emax/emax-dc>
- [137,138,139] Technical catalogue, SACE Emax DC, Low voltage air circuit-breakers for direct current application, ABB

KAZALO KRATICA

Kratika	Puni naziv na engleskom jeziku	Tumačenje na hrvatskom jeziku
HVDC	<i>engl. High Voltage Direct Current</i>	Visokonaponsko istosmjernan
AC	<i>engl. Alternating Current</i>	Izmjenična struja
DC	<i>engl. Direct Current</i>	Istosmjerna struja
IFEP	<i>engl. Integrated Full Electric Propulsion</i>	Kompletno integrirana električna propulzija
HV/LV	<i>engl. High Voltage/Low Voltage</i>	Visoki napon/niski napon
MV	<i>engl. Medium Voltage</i>	Srednji napon
MV/LV	<i>engl. Medium Voltage/Low Voltage</i>	Srednji napon/niski napon
PnP	<i>engl. Plug and Play</i>	Svojtvo uključi i pokreni
DC ZED	<i>engl. Direct Current Zonal Electric System</i>	Istosmjerni zonski električni sustav
DBS	<i>engl. DC Bus</i>	Istosmjerna sabirnica
PLS	<i>engl. Power Line Signal</i>	Signal koristeći napajajuće linije
MAS	<i>engl. Multi Agent System</i>	Sustav više agenata
RPM	<i>engl. Rounds Per Minute</i>	Broj okretaja u minuti
LED	<i>engl. Light Emitting Diode</i>	Tip diode koja svjetli
kV	<i>engl. kilo Volt</i>	jedinica napona, kilo znači 1000, čime je 1 kV=1000 V
AC/DC	<i>engl. Alternating Current/Direct Current</i>	Izmjenično istosmjerni
DC/AC	<i>engl. Direct Current/Alternating Current</i>	Istosmjerno izmjenični
DC/DC	<i>engl. Direct Current/Direct Current</i>	Istosmjerno istosmjerni

MVDC	<i>engl. Medium Voltage Direct Current</i>	Sredjenaponska istosmjerna
MW	<i>engl. Mega Watt</i>	jedinica snage, Mega znači 1000000, čime je 1 MW=1000000 W
PV	<i>engl. Photovoltaic</i>	Fotonaponski
DSO	<i>engl. Distributed System Operator</i>	Operater za sustav distribucije
V2G	<i>engl. Vehicle to Grid</i>	Vozilo prema mreži
ACB	<i>engl. Air Circuit Breaker</i>	Zračni prekidač
MCCB	<i>engl. Moulded Case Circuit Breaker</i>	Kompaktni prekidač
MCB	<i>engl. Miniature Circuit Breaker</i>	Mali prekidač
SSCB	<i>engl. Solid State Circuit Breaker</i>	Tip prekidača bez mehaničkog kretanja
SiC JFET	<i>engl. Silicon Carbide Junction Field Effect Transistor</i>	Tip tranzistora s efektom polja na bazi silikon karbida
HCB	<i>engl. Hybrid Circuit Breaker</i>	Hibridni prekidač
Ah	<i>engl. Ampere hour</i>	Amper sat
NSRS	<i>engl. NATO Submarine Rescue System</i>	Tip NATO-ove podmornice
SRV	<i>engl. Submarine Rescue Vehicle</i>	Tip podmornice za spašavanje
D	<i>engl. Duty Cycle</i>	Faktor intermitencije

POPIS ILUSTRACIJA

Slika 1 - Thomas Edison i istosmjerni generator.....	4
Slika 2 - Konfiguracija izmjenične mreže.....	6
Slika 3 - „Multidrive“ konfiguracija.....	7
Slika 4 - Potpuno distribuirana konfiguracija.....	7
Slika 5 - Prstenasta sabirnica.....	9
Slika 6 - Klasična izvedba DC ZEDova.....	10
Slika 7 - DC ZEDovi sa centralnim teretom.....	10
Slika 8 - Dvostruka prstenasta sabirnica.....	11
Slika 9 - Nivoi kontrole hijerarhijske strukture.....	12
Slika 10 - Centralizirano, decentralizirano, i distribuirano upravljanje na primjeru kopnenog sustava.....	13
Slika 11 - Razlika između istosmjerne struje (lijevo) i izmjenične struje (desno)	16
Slika 12 - Pomoćne usluge istosmjernih mikromreža.....	23
Slika 13 - Princip rada zračnog prekidača i prikaz luka.....	26
Slika 14 - SACE Emax DC zračni prekidač.....	28
Slika 15 - Kompaktni prekidač.....	29
Slika 16 - Mali prekidač.....	30
Slika 17 - Razlika u brzini odziva na istosmjernim sustavima.....	31
Slika 18 - Z-source SSCB.....	32
Slika 19 - SiC JFET.....	33
Slika 20 - Dijelovi zamašnjaka.....	35
Slika 21 - Građa superkondenzatora.....	36
Slika 22 - Shematski prikaz olovnog akumulatora.....	38
Slika 23 - Dijelovi NiCd baterije.....	39
Slika 24 - Princip rada litij-ionske baterije.....	39
Slika 25 - Dijelovi NaNiCl baterije.....	40
Slika 26 - Jednofazni poluvalni diodni ispravljač.....	42

Slika 27 - Blok dijagram izmjenjivača.....	43
Slika 28 - Jednofazni izmjenjivač s utisnutim naponom u mosnom spoju.....	44
Slika 29 - Buck converter.....	45
Slika 30 - Boost converter.....	45
Slika 31 - Buck-boost converter.....	46
Slika 32 - Topologija DC kopnenog priključka za punjenje brodova sa DC sabirnicom.....	48
Slika 33 - Topologija AC kopnenog priključka za punjenje brodova sa DC sabirnicom.....	49

POPIS TABLICA

Tablica 1 – Razlike između istosmjernih mikromreža i izmjeničnih mikromreža	17
Tablica 2 – Usporedba napona i naponskih nivoa ovisno o primjeni	22
Tablica 3 - Opći podaci SACE Emax DC zračnog prekidača	27

POPIS FORMULA

Računanje droopa (1).....	14
Srednja vrijednost ispravljenog napona (2).....	42
Efektivna vrijednost osnovnog harmonika izlaznog napona (3).....	43
Vrijednost izlaznog napona buck convertera (4).....	45
Vrijednost izlaznog napona boost convertera (5).....	46
Vrijednost izlaznog napona buck-boost convertera (6).....	47
Jakost struje zavojnice (7).....	47