

Sustav pohrane energije zamašnjakom

Gavranović, Edi

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:187:753229>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-19**



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](#)



uniri DIGITALNA
KNJIŽNICA



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

EDI GAVRANOVIĆ

SUSTAV POHRANE ENERGIJE ZAMAŠNJAKOM

DIPLOMSKI RAD

Rijeka, 2024.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

**SUSTAV POHRANE ENERGIJE ZAMAŠNJAKOM
FLYWHEEL ENERGY STORAGE SYSTEM**

**DIPLOMSKI RAD
MASTER THESIS**

Kolegij: Brodske elektroenergetske mreže

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

Student: Edi Gavranović

Studijski smjer: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112081029

Rijeka, lipanj 2024.

Student: Edi Gavranović

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112081029

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI DIPLOMSKOG RADA

Kojom izjavljujem da sam diplomski rad s naslovom

SUSTAV POHRANE ENERGIJE ZAMAŠNJAKOM

izradio samostalno pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Aleksandra Cuculića

U radu sam primijenio/la 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/la u diplomskom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezo/la s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student

Gavranović Edi

Gavranović Edi

Student: Edi Gavranović

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112081029

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

Gavranović Edi

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu opisan je pojam sustava pohrane energije zamašnjakom. Razrađen je osnovni koncept skladišta energije, što uključuje i njihovu podjelu s obzirom na tehnologiju pohrane energije, te su grafički uspoređeni u kontekstu njihovih prednosti i nedostataka. Nadalje, govoreći o sustavu pohrane energije zamašnjakom, opisan je princip rada, građa sustava, te su navedene i opisane komponente koje čine sustav: kućište, rotor, motor/generator, ležajevi, energetska elektronika, a isto tako su navedeni gubici, kvarovi i sigurnosni standardi koji se primjenjuju uz ovaj sustav. U završnom dijelu, navedene su neke primjene sustava: unutar brodskog elektroenergetskog sustava, uz obnovljive izvore energije i u transportnoj industriji. Diplomski rad sažima se u zaključku, gdje se sintetizira obrađena tematika i daje generalna slika sustava pohrane energije zamašnjakom.

Ključne riječi: skladišta energije, zamašnjak, brod, obnovljivi izvori energije, transport.

SUMMARY

In this thesis, the concept of flywheel energy storage system is described. First, the basic concept of energy storage, including its subgroups, are elaborated based on energy storing technology and graphically compared in the context of their advantages and disadvantages. Furthermore, speaking about the flywheel energy storage system, this thesis describes the working principle, structure of the system and its components: housing, rotor, motor/generator, bearings, and power electronics. Losses, common failures, and safety regulations, that are applied with such system, are also listed. In the final part of the thesis, some applications of the system are mentioned: within the ship power system, with renewable energy sources and in the transport industry. The thesis is summarized in the conclusion section, where the discussed topics are synthesized, and a general picture of the flywheel energy storage is given.

Keywords: energy storage, flywheel, ship, renewable energy sources, transport.

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. SKLADIŠTE ENERGIJE	3
2.1. PODJELA SKLADIŠTA ENERGIJE	4
2.1.1. Mehanička skladišta energije.....	5
2.1.2. Elektrokemijska skladišta energije.....	6
2.1.3. Toplinska skladišta energije	8
2.1.4. Električna skladišta energije.....	9
2.2. USPOREDBA SKLADIŠTA ENERGIJE.....	10
2.3. POVIJESNI RAZVOJ ZAMAŠNJAKA	14
3. GRAĐA SUSTAVA POHRANE ENERGIJE ZAMAŠNJAKOM.....	15
3.1. PRINCIP RADA.....	16
3.1.1. Parametri FESS-a.....	17
3.1.2. Klasifikacija FESS-a.....	19
3.2. KUĆIŠTE	21
3.2.1. Vakuumska komora i sustav vakuumskih pumpi	22
3.2.2. Brtve.....	22
3.3. ROTOR.....	23
3.3.1. Dimenzioniranje rotora	24
3.3.2. Materijali za izradu rotora	26
3.4. MOTOR/GENERATOR	27

3.4.1. Sinkroni motor sa permanentnim magnetima	29
3.4.2. Asinkroni/indukcijski motor	30
3.4.3. Istosmjerni motor	31
3.4.4. Reluktantni motor.....	32
3.5. LEŽAJEVI.....	33
3.5.1. Mehanički ležajevi.....	33
3.5.2. Magnetski ležajevi.....	34
3.5.2.1. Ležajevi sa pasivnim magnetima	34
3.5.2.2. Ležajevi s aktivnim magnetima	35
3.5.2.3. Ležajevi sa supervodljivim magnetima.....	37
3.5.3. Kombinacija ležajeva.....	37
3.6. ENERGETSKA ELEKTRONIKA	37
3.6.1. Energetski pretvarači.....	38
3.6.2. Algoritmi upravljanja.....	40
3.7. GUBICI I SIGURNOST FESS SUSTAVA	42
3.7.1. Gubici FESS-a	42
3.7.2. Kvarovi FESS-a	44
3.7.3. Testiranje FESS-a i standardi.....	45
4. PRIMJENE SUSTAVA POHRANE ENERGIJE ZAMAŠNJAKOM	46
4.1. BRODSKI ELEKTROENERGETSKI SUSTAV	46
4.1.1. Poboljšanje i regulacija kvalitete električne energije.....	46
4.1.2. Hibridna rješenja	53
4.1.3. Besprekidno napajanje.....	54
4.2. OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE	55
4.2.1. Vjetroelektrane.....	56
4.2.2. Fotonaponske instalacije	58
4.3. TRANSPORT	59
4.3.1. Regenerativno kočenje.....	59
4.3.2. Zamašnjak kao glavni izvor napajanja	61
5. ZAKLJUČAK.....	63
LITERATURA	64
KAZALO KRATICA.....	70

POPIS SLIKA	72
POPIS TABLICA.....	73
POPIS FORMULA	73

1. UVOD

U svjetlu rastućih izazova energetskeg sektora i potrebe za stalnim i održivim izvorima energije, istraživanje i razvoj tehnologija pohrane električne energije postaju ključan element u ostvarivanju energetskeg ciljeva. Obnovljivi izvori energije važan su subjekt istraživanja zadnjih desetljeća, s obzirom na zahtjeve za očuvanjem okoliša. Promocija nisko-ugljične budućnosti rezultira postupnim povećanjem udjela obnovljivih izvora energije, kao što su: solarna energija, energija vjetrova, hidroenergija, itd. Solarna energija i vjetroenergija jedni su od glavnih ciljeva istraživanja, a procjenjuje se da će njihov udio i kapacitet, u narednih 10 godina, rasti i do 14% - 18% godišnje, s uvođenjem novih zakona i razvojem tehnologije.

Međutim, obnovljivi izvori energije predstavljaju izazove s obzirom na fluktuaciju u proizvodnji električne energije, pogotovo zbog nestabilnosti u proizvodnji, smanjene učinkovitosti i pouzdanosti. Jedno od rješenja koje se nametnulo su upravo skladišta energije, koji omogućuju pretvorbu i pohranu energije. Skladišta energije pružaju fleksibilnost i omogućuju skladištenje i oslobađanje energije u ovisnosti o opterećenju mreže, a ta karakteristika omogućuje njenu primjenu u različitim područjima industrije. Jedan od rješenja je sustav pohrane energije zamašnjakom koji, uz recentne tehnološke napretke i nove, sofisticirane tehnologije, nudi učinkovito rješenje za gore navedene izazove, a to se očituje pogotovo kod obnovljivih izvora energije.

1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA

Predmet ili objekt istraživanja ovog diplomskog rada je objasniti pojam „sustav pohrane energije zamašnjakom“, tehnologije koja ima potencijal za doprinos održivom energetskeg sektoru. Konačno, objekti istraživanja obuhvaćaju same sustave pohrane energije zamašnjakom, karakteristike, građu, princip rada, primjenu, te ekonomske i ekološke aspekte.

1.2. RADNA HIPOTEZA

Sukladno bitnim odrednicama problema, predmeta i objekta istraživanja, postavljena je hipoteza: „Sustavi pohrane energije zamašnjakom, koji se kontinuirano razvijaju, predstavljaju pouzdano rješenje za pohranu električne energije. S obzirom na kontinuirani razvoj tehnologije zamašnjaka kao skladišta energije i njegovu ekološku održivost, postoji potencijal da postane jedan od primarnih izbora za pohranu električne energije, proizvedene iz obnovljivih izvora. Nadalje, uz

obnovljive izvore, ovi sustavi također mogu naći primjenu na brodovima i u transportnoj industriji, pružajući alternativu tradicionalnim načinima skladištenja energije“.

1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Svrha i ciljevi istraživanja u ovom diplomskom radu očituju se u sljedećemu: Istražiti potencijal sustava pohrane energije zamašnjakom kao rješenja za pohranu električne energije. Specifični ciljevi uključuju:

1. Što su skladišta energije i koje su trenutno dostupne tehnologije?
2. Što je sustav pohrane energije zamašnjakom i koji je njegov princip rada?
3. Kako je građen sustav pohrane energije zamašnjakom i koji su ključni dijelovi?
4. Koji su faktori koji utječu na efikasnost sustava pohrane energije zamašnjakom?
5. Koje su moguće primjene sustava pohrane energije zamašnjakom?

1.4. ZNANSTVENE METODE

Prilikom istraživanja, formuliranja i predstavljanja rezultata istraživanja, korištene su u odgovarajućim kombinacijama sljedeće znanstvene metode: metoda deskripcije, metoda promatranja, deduktivna metoda, te metode analize i sinteze.

1.5. STRUKTURA RADA

U prvom dijelu, „Uvod“, navedeni su problem, predmet i objekt istraživanja, radna hipoteza i pomoćne hipoteze, svrha i ciljevi istraživanja, znanstvene metode i obrazložena je struktura rada. Naslov drugog dijela rada je „Skladište energije“. U tom dijelu rada analizirane su različite vrste skladišta energije, uspoređene njihove karakteristike te je prikazan povijesni razvoj zamašnjaka kao jednog od tih vrsta skladišta. Naslov trećeg dijela rada je „Građa sustava pohrane energije zamašnjakom“, gdje se analizira predmet istraživanja, odnosno opisuje građu, glavne komponente, način izvedbe i princip rada sustava pohrane energije zamašnjakom. U četvrtom dijelu rada, pod naslovom "Primjene sustava pohrane energije zamašnjakom", elaborirano je kako se sustav pohrane energije zamašnjakom može primijeniti u različitim područjima, s posebnim naglaskom na brodske elektroenergetske sustave, obnovljive izvore energije i transport. U posljednjem dijelu, „Zaključak“, dana je sinteza rezultata istraživanja kojima je dokazivana postavljena radna hipoteza.

2. SKLADIŠTE ENERGIJE

Skladište energije (eng. *Energy Storage* ili SE), kao što i sama riječ kaže, omogućuje pohranu električne energije u elektroenergetskom sustavu. Sastavljeno je od jedinice za pohranu energije, jedinice za pretvaranje energije i upravljačke jedinice. Skladištenje energije olakšava fleksibilniju konfiguraciju mreže, odnosno kvalitetniju prilagodbu proizvodnje i potrošnje električne energije (koja je promjenjiva). Električna se energija pohranjuje kada postoji višak energije u mreži (kada proizvodnja nadilazi potrošnju), a troši iz SE kada je potrebna dodatna energija u mreži (kada potrošnja nadilazi proizvodnju). SE pruža lakše projektiranje izvora energije, kako bi odgovarao prosječnim umjesto vršnim potrebama mreže, čime se uvelike smanjuju troškovi proizvodnje električne energije [1].

Nadalje, korištenje skladišta energije posebno se ističe kod intermitentnih izvora energije. Intermitentni izvori energije nisu kontinuirano dostupni zbog vanjskih čimbenika koji se ne mogu predvidjeti i kontrolirati, a utječu na trenutnu proizvodnju energije. Neki od intermitentnih izvora energije, koji su ujedno i najzastupljeniji, su solarna energija i energija vjetra. Vanjski čimbenik solarne energije je npr. oblak, koji predstavlja prepreku između solarnih zraka i fotonaponskih ploča. Vanjski čimbenici energije vjetra su vremenski utjecaji, odnosno faze sa promjenjivom jakosti strujanja vjetra. To znači da se količina proizvedene energije u nekom vremenskom razdoblju mijenja i ovisi uvelike o tim istim vremenskim čimbenicima [2].

U kontekstu broskog elektroenergetskog sustava, skladište energije igra ključnu ulogu u poboljšanju stabilnosti i pouzdanosti distribucijskih mreža, posebno sa sve većom integracijom obnovljivih izvora energije. Integracija skladišta energije unutar elektroenergetskog sustava omogućuje [3], [4]:

- Povećanje udjela obnovljivih izvora energije - povećanje postotka obnovljivih izvora energije donosi prednosti za okoliš, ali uvodi nestabilnosti unutar mreže zbog intermitencije. U slučaju nepostojanja skladišta energije, kako bi se uklonile nestabilnosti, za svakih 10% instalirane snage iz obnovljivih izvora, trebalo bi dodatnih 2-4% od energije vjetra iz konvencionalnih izvora (fosilna goriva).
- Raspodjela opterećenja i peglanje vršnih opterećenja („*peak shaving*“) – raspodjela opterećenja uključuje pohranu energije prilikom niske potrošnje i viška energije u mreži i korištenje iste pohranjene električne energije kako bi se zadovoljila razdoblja

visoke potrošnje. Peglanje vršnih opterećenja je, s druge strane, strategija izbjegavanja vršnih opterećenja u električnoj mreži, brzim smanjenjem potrošnje tijekom određenog intervala vremena.

- Regulacija napona i frekvencije – skladišta energije, oslobađanjem aktivne snage unutar kratkog vremena, omogućuju održavanje napona i frekvencije prilikom tranzijentnih pojava, koje bi dovele do propada napona i frekvencije (npr. prilikom uključanja potrošača velike snage), što je ključno za stabilnost elektroenergetskog sustava.
- Rezerva snage – rezerva snage odnosi se na raspoloživi kapacitet energije koji se može predati u sustav u slučaju gubitka napajanja ili drugih razloga.
- Regulacija kvalitete električne energije – kvaliteta električne energije predstavlja problem u brodskim elektroenergetskim sustavima, stoga skladišta energije ovdje igraju značajnu ulogu. Na kvalitetu utječu nelinearni potrošači, padovi napona, fluktuacije frekvencije, harmonička izobličenja, itd.

Integracija SE unutar elektroenergetskih sustava, posebno u brodskim mikromrežama, nudi brojne prednosti. „*Mikromreža*“ je skupina međusobno povezanih izvora i potrošača energije, koji djeluju kao jedinstveni sustav. Mikromreža je karakteristični koncept za brodske sustave. One mogu, a i ne moraju biti dio glavne mreže. Stabilizacijom napajanja, povećanjem otpornosti sustava na smetnje i optimiziranjem upravljanja energijom u mikromreži, skladišta energije osiguravaju pouzdan i učinkovit rad u dinamičkim uvjetima, koji su karakteristični za brodske sustave [4], [5].

2.1. PODJELA SKLADIŠTA ENERGIJE

Tehnologije skladišta energije dijeli se u ovisnosti o metodi konverzije energije. Međusobno se razlikuju u pogledu brzine punjenja i pražnjenja, životnog ciklusa, gustoće energije i snage, učinkovitosti, itd. Klasificiraju se najčešće u 4 glavne skupine, koje su [1], [4]:

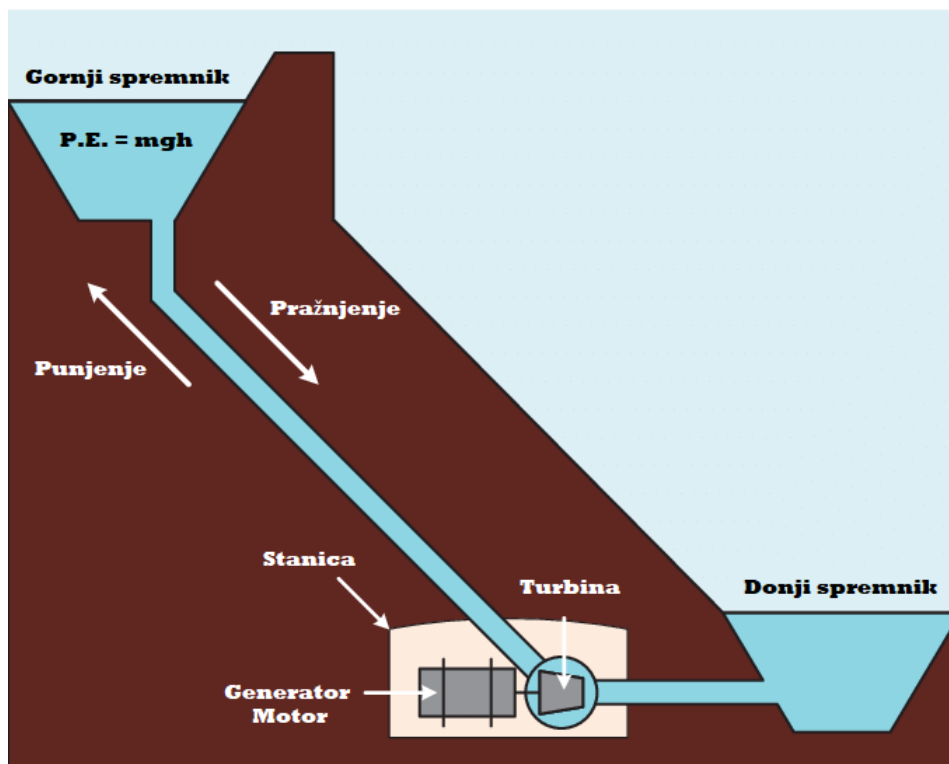
1. Mehanička skladišta energije,
2. Elektrokemijska/kemijska skladišta energije,
3. Toplinska skladišta energije,
4. Električna skladišta energije.

2.1.1. Mehanička skladišta energije

Unutar mehaničkog skladišta energije pohranjuje se kinetička ili potencijalna energija. Tipična mehanička SE su [1]:

- SE s komprimiranim zrakom (eng. CAES ili *Compressed Air Energy Storage*),
- Reverzibilne hidroelektrane (eng. *PHES ili Pumped Hydro Energy Storage*),
- Sustav pohrane energije zamašnjakom (FESS ili *Flywheel Energy Storage System*).

Reverzibilne hidroelektrane skladište energiju u obliku potencijalne energije vode (PE (eng. *Potential Energy*) = $m \cdot g \cdot h$) – potencijalna energija proporcionalna je umnošku mase (kg), gravitacijske sile ($g = 9.82 \text{ m/s}^2$) i razlike visine gornjeg i donjeg spremnika vode (Δh). Voda se crpi iz nižeg spremnika u viši spremnik, dok je cijena električne energije niska (noć ili izvan vršnih potreba). U razdobljima velike potražnje za ee, pohranjena se voda ispušta i pogoni turbinu, koja generira električnu energiju [6].



Slika 1 - PHES skladište energije

Izvor: Prilagodio student iz https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-the-PHES_fig2_331769859

Iako su kapitalni troškovi veliki, ovakva tehnika pohrane energije trenutno je vrlo isplativa za skladištenje velikih količina energije. Dizajn PHES elektrane ovisan je o

geografiji, topografiji i geologiji područja u kojem bi se nalazila. Niska gustoća energije zahtijeva vrlo veliki spremnik ili velike razlike u visini istih (veća visina = veća potencijalna energija). Na slici 1, prikazan je PHES sustav. Energetska učinkovitost varira između 70% i 80%, do čak 87%. Prema nazivnoj snazi, PHES se dijele na velike elektrane (>10 MW), male elektrane (<10MW), mikro elektrane za male/izolirane mreže (<100kW) i piko elektrane koje se koriste za pohranu energije od vjetroelektrana ili solarnih elektrana (<5kW). PHES je trenutno najšire korištena tehnologija pohrane energije u elektroenergetskim mrežama na kopnu, a primjenu nalazi u upravljanju energijom, stabilizaciju napona i frekvencije i kao rezerva snage [6], [7].

Skladište energije s komprimiranim zrakom skladišti zrak pod tlakom koji se pohranjuje u spremnicima (najčešće u podzemnim bunkerima) i koristi za proizvodnju električne energije. Kao i kod PHES, zrak se komprimira dok je cijena energija niska, a ispušta tokom veće potražnje. Kada je potrebna energija u mreži, komprimirani zrak miješa se s gorivom i sagorijeva u turbini, koja pogoni generator. CAES je ekonomično rješenje za pohranu energije u velikim količinama, a pokazalo se kao idealno rješenje za stabilizaciju izlazne snage obnovljivih izvora energije [7].

Sustav pohrane energije zamašnjakom još jedna je topologija mehaničkih skladišta energije, a biti će obrađen u sljedećim poglavljima kroz diplomski rad.

2.1.2. Elektrokemijska skladišta energije

Elektrokemijska ili kemijska skladišta energije trenutno su jedna od najzastupljenijih vrsta SE u današnjici. Tipična elektrokemijska SE su:

- Baterijska skladišta energije (eng. BESS ili *Battery Energy Storage System*),
- Gorive ćelije (eng. *Fuel Cells*).

Baterije pretvaraju pohranjenu energiju u obliku kemijske energije u električnu energiju i obrnuto. Baterije se dijele na one sa sposobnošću punjenja i one bez te sposobnosti, jednom kad se kemijsko svojstvo unutar iste potroši. Baterije su sastavljene od dvije elektrode koje se nalaze u elektrolitskom materijalu (tekućini), a kućište održava integritet baterije. Pozitivni terminal baterije nazvan je katoda, a negativni anoda. Tijekom pražnjenja, stvara se protok elektrona kroz krug, gdje je anoda izvor elektrona a katoda prihvaća iste. Baterije se mogu spajati u seriju, paralelu ili serijsko-paralelnu kombinaciju, kako bi se ostvario željeni kapacitet (u Ah – *Ampere/sati*) ili željeni napon (u V - *Volt*). Baterijski

sustavi kategoriziraju se u ovisnosti o snazi i energiji koju mogu predati, efikasnosti, ciklusima punjenja i pražnjenja, razine do koje se mogu isprazniti (eng. *Depth of Discharge*), itd. Baterije su danas skoro pa i najrašireniji sustav pohrane energije, a primjenu nalaze skoro svugdje: automobilska industrija, alati (akumulatorske baterije), elektronika, rezervno napajanje, itd. Baterijska skladišta energije su sustavi koji se koriste u elektroenergetskim mrežama. Komponente sustava su: baterijski moduli, koji su međusobno povezani; energetska pretvarača; baterijski sustav upravljanja, koji nadzire i upravlja performansama baterijskih modula; komunikacijski protokoli i, na posljetku, sigurnosni sustavi. Najčešće korištene vrste baterija su olovne baterije, nikal-kadmij (NiCd), natrij-sumpor (NaS) i litij-ionske (LiIon) [3], [6], [7], [8]. Baterijski sustav za elektroenergetske primjene, koji se nalazi u posebnoj ventiliranoj prostoriji, prikazan je na sljedećoj slici:



Slika 2 - BESS tehnologija

Izvor: <https://www.energy-storage.news/leclanche-begins-construction-of-visionary-solar-plus-storage-project-in-caribbean/>

Tehnologija gorivih ćelija predstavlja alternativu konvencionalnim dizel-motorima, s obzirom da predstavljaju čišću opciju, a karakterizira ih i visoka učinkovitost. Za razliku od baterija, gorive ćelije funkcioniraju više kao sustavi za proizvodnju, umjesto skladištenja energije. U gorive ćelije se iz vanjskih izvora dovodi gorivo i, preko kemijske reakcije, generira električna energija. Proces kemijske reakcije uključuje oksidaciju, gdje se u anodi oksidira gorivo (gubi elektrone) i redukciju, gdje se u katodi nakupljaju elektroni iz anode.

Rezultat te kemijske reakcije je strujanje elektrona iz anode u katodu, odnosno struja. Gorive ćelije funkcioniraju sa više vrsta goriva. U neke ćelije se gorivo direktno ubrizgava (metanol i vodik), dok se kod drugih zahtijeva obrada koja pretvara gorivo, poput prirodnog plina, u etanol ili plin bogat vodikom, koji se poslije može koristiti u gorivoj ćeliji. Najznačajnija prednost gorivih ćelija je, kao što je već navedeno, niska emisija stakleničkih plinova i velika gustoća snage. Gustoća energije je $>200\text{Wh/l}$, deset puta više od baterija [1], [3], [4], [9].

2.1.3. Toplinska skladišta energije

Tehnologija toplinskog skladišta energije pohranjuje energiju u obliku topline, zagrijavanjem medija, koji se poslije koristi za grijanje ili hlađenje. Kao i kod ostalih tehnologija skladišta energije, medij se zagrijava/hladi kada ima viška energije u mreži (periodi jeftine električne energije), a oslobađa toplinsku energiju u periodu visoke potražnje. Toplinsko skladištenje može se postići zagrijavanjem ili hlađenjem medija, taljenjem materijala i korištenjem kemijskih reakcija, gdje se posljedično oslobađa toplina [9], [10], [11], [12]. TSE dijele se na:

1. TSE zagrijavanjem materijala (eng. *Sensible Heat Storage System*),
2. TSE korištenjem latentne topline (eng. *Latent Heat Storage System*),
3. TSE korištenjem kemijskih reakcija (eng. *Chemical Heat Storage System*).

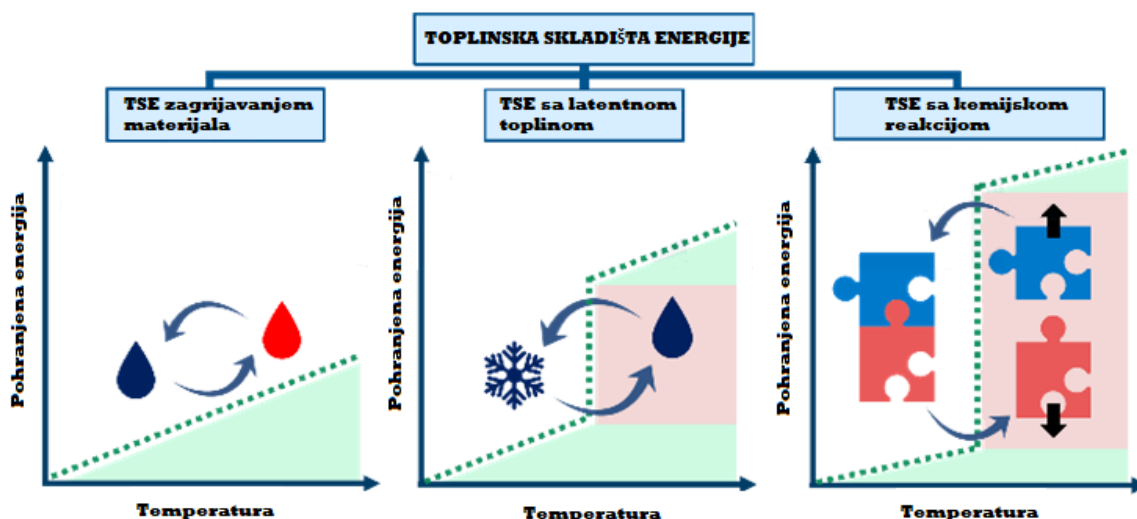
TSE zagrijavanjem materijala, koriste medij za skladištenje i oslobađanje toplinske energije. Medij pritom ne mijenja agregatno stanje, nego se dovođenjem topline povećava njegova temperatura. Medij za ovakvu vrstu TSE mora imati što veći toplinski koeficijent, kako bi se temperatura materijala što brže i ravnomjernije rasporedila. Mediji koji se najčešće koriste su: voda i kamen (ili šljunak). TSE zagrijavanjem materijala su vrlo jeftini, pouzdani i koriste se tipično za primjene većih razmjera [9], [10], [11], [12].

TSE korištenjem latentne topline, pohranjuju energiju promjenom agregatnog stanja medija. Latentna toplina je ona toplina koja je potrebna za pretvorbu medija iz jednog u drugo agregatno stanje. Promjena agregatnog stanja u ovakvoj vrsti skladišta može biti: čvrsto-čvrsto (toplina se pohranjuje između različitih vrsta kristalizacije), tekuće-plinovito i kruto-tekuće. Gustoća pohranjene energije je ovdje veća, stoga se smanjuje volumen skladišta. Medij koji se koristi može pohraniti toplinsku energiju unutar svoje mase kao latentnu toplinu. Ovakvi materijali se koriste u solarnim-toplinskim elektranama i

građevinskim materijalima (apsorbiraju i pohranjuju višak topline zgrade) [9], [10], [11], [12].

TSE sa kemijskom reakcijom, najefikasnije rješenje i s najvećom gustoćom energije od ostalih TSE, oslobađaju toplinsku energiju pomoću termo-kemijske reakcije medija. U fazi zagrijavanja, toplina se primjenjuje na materijal A, što uzrokuje njegovo odvajanje na dvije komponente, B i C. Rezultantni proizvodi kemijskog odvajanja mogu se pohraniti neovisno jedan o drugom. Prilikom potrebe za energijom, materijal B i materijal C se kombiniraju, što rezultira oslobađanjem energije [9], [10], [11], [12].

TSE sa zagrijavanjem materijala idealni su za kratkotrajne primjene. Za dugotrajnije primjene koriste se ostala dva, s obzirom na gušće skladištenje energije. Treća vrsta je najperspektivnija, ali i najmanje istražena vrsta TSE. TSE skladištenje ima potencijal za primjenu u postojećim elektranama i solarnim toplinskim instalacijama, jer mogu povećati energetska efikasnost i smanjiti gubitke postojećih sustava [1]. Na sljedećoj slici prikazana su TSE:



Slika 3 - Vrste toplinskih skladišta energije

Izvor: Prilagodio student iz <https://blog.sintef.com/sintefenergy/thermochemical-energy-storage-the-next-generation-thermal-batteries/>

2.1.4. Električna skladišta energije

Električna ili elektromagnetska skladišta energije temelje se na zavojnicama i kondenzatorima, odnosno pohranjivanje električne energije na temelju magnetskih i elektrostatičkih polja. Ovakvi sustavi najčešće se koriste u elektroničkim sklopovima, kao

filtri, za regulaciju energije i za korekciju faktora snage. S razvojem tehnologije izrade materijala, danas se unutar skladišta energije koriste zavojnice i kondenzatori izrađeni od supervodljivih materijala: supervodljive zavojnice (eng. SMES - *Superconducting Magnetic Energy Storage*) i superkondenzatore (eng. SES - *Supercapacitor Energy Storage*).

Supervodljive zavojnice pohranjuju električnu energiju u obliku magnetskog toka, koji se stvara protokom struje kroz njene namotaje. Energija pohranjena u magnetskom toku zavojnice proporcionalna je induktivitetu zavojnice i kvadratu struje kroz zavojnicu. Zavojnica kriogenim hlađenjem postiže svojstvo supervodljivosti. Koncept supervodljivosti znači da će struja teći kroz zavojnicu nakon što se ukloni napon, zbog nultog otpora. Kako bi se pohranjena energija vratila u mrežu, zavojnica se prazni. Glavne komponente su: supervodič, kriogeno hlađenje, kućište i energetski pretvarač. SMES sustave karakteriziraju minimalni gubici tijekom procesa skladištenja, gdje učinkovitost prelazi 95%. Osim toga, imaju dug životni vijek (cikluse punjenja/praznjenja), visoku učinkovitost, brz odziv i brzinu praznjenja. SMES se trenutno koristi prvenstveno za kratkoročno skladištenje energije, najčešće u podizanju kvalitete električne energije [1], [4].

Superkondenzator pohranjuju električnu energiju u obliku elektrostatičkog polja, koje nastaje interakcijom električnih naboja suprotnih polariteta u blizini. Energija pohranjena na kondenzatoru proporcionalna je kapacitetu kondenzatora i kvadratu napona na njegovim stezaljkama. Superkondenzatori su sastavljeni od dva sloja, a umjesto dielektrika sadrže elektrolit. SES rade pri niskom naponu, ali s velikim kapacitetom. Pogodni su za primjene gdje je potrebna velika snaga i nude brz odziv i visoku učinkovitost. Karakteriziraju ih dug životni vijek, velik raspon radnih temperatura i velike brzine praznjenja, ali nedostatak je vrlo visok parazitski gubitak [1], [4].

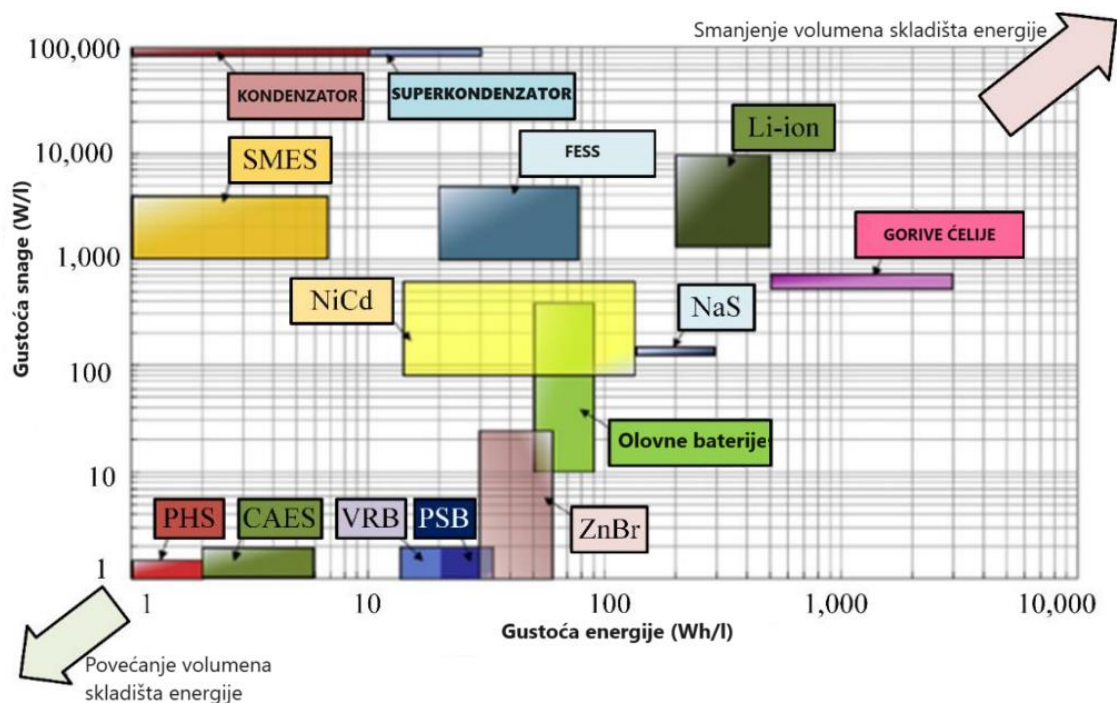
2.2. USPOREDBA SKLADIŠTA ENERGIJE

Kao što je objašnjeno u prethodnim poglavljima, postoji niz tehnologija skladištenja električne energije. Trenutno najveći udio pohrane energije imaju mehanička SE, gdje hidroelektrane (PHES) zauzimaju oko 99% ukupne instalirane snage. Skladišta energije, kako bi bila što efikasnija, trebaju biti prilagođena vrsti i opsegu primjene. Na primjer, SE kao što su FESS i SES imaju značajne parazitske gubitke, pa su najkorisniji za kratkotrajne primjene, kao npr. regulacija kvalitete električne energije. SE s malim parazitskim gubicima, kao PHES, korisni su za dugoročnu pohranu energije.

Skladišta energije mogu se usporediti brojačno i kvalitativno na temelju sljedećih karakteristika [10]:

- Kapacitet pohrane energije – energija pohranjena u sustavu, ovisna o veličini sustava,
- Snaga – koliko se brzo energija može isprazniti,
- Efikasnost – omjer isporučene energije i energije potrebne za punjenje SE,
- Vrijeme skladištenja – koliko se dugo skladišti energija,
- Vrijeme punjenja i pražnjenja SE,
- Trošak – broj novčanih jedinica u ovisnosti o kapacitetu ili snazi,
- Životni vijek – broj ciklusa punjenja/pražnjenja,
- itd.

Na sljedećoj slici prikazana je usporedba skladišta energije, gdje je na x osi prikazana gustoća energije (izražena u Wh po volumenu - l), dok je na y osi prikazana gustoća snage (W po volumenu - l):

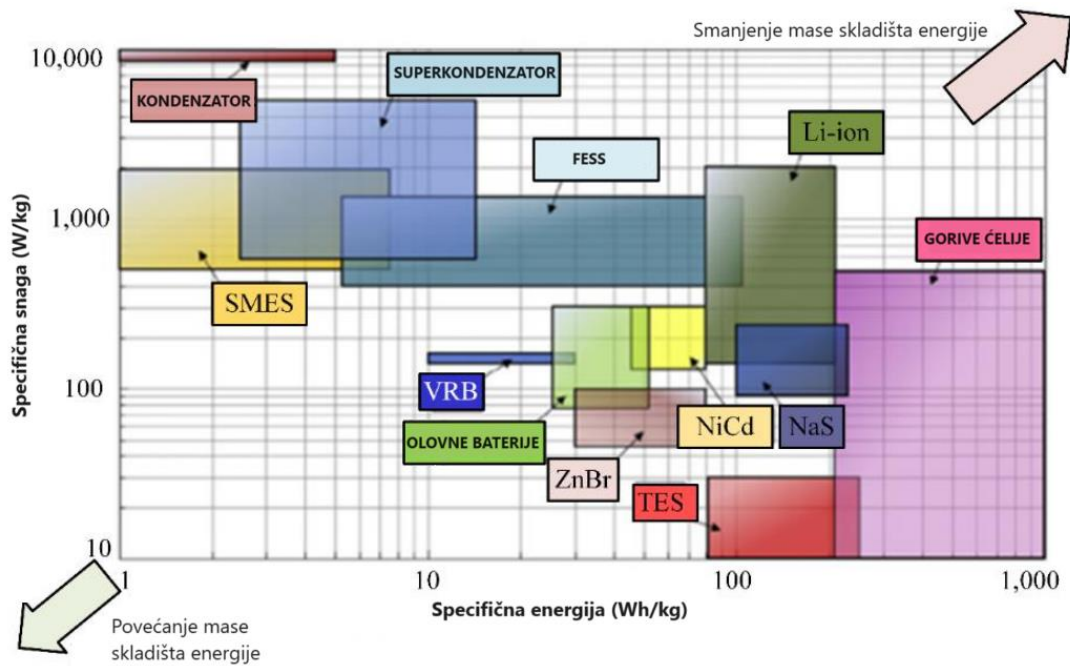


Slika 4 - Usporedba skladišta energije (gustoća energije i snage)

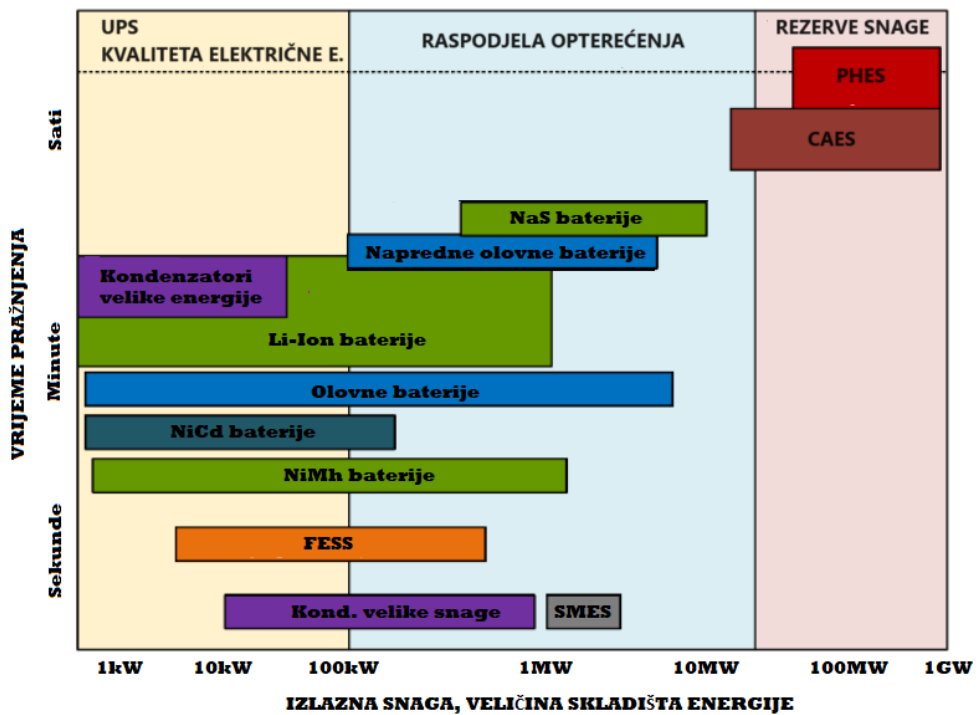
Izvor: Prilagodio student iz E. Hossain, H. M. R. Faruque, M. S. H. Sunny, N. Mohammad, and N. Nawar, 'A comprehensive review on energy storage systems: Types, comparison, current scenario, applications, barriers, and potential solutions, policies, and future prospects', *Energies*, vol. 13. MDPI AG, Jul. 01, 2020.

Na sljedećim slikama prikazana je usporedba skladišta energije, gdje je za prvu sliku na

x osi prikazana specifična energija (izražena u Wh po masi - kg), dok je na y osi prikazana specifična snaga (W po masi - kg), a za drugu izlazna snaga (W) i vrijeme pražnjenja.



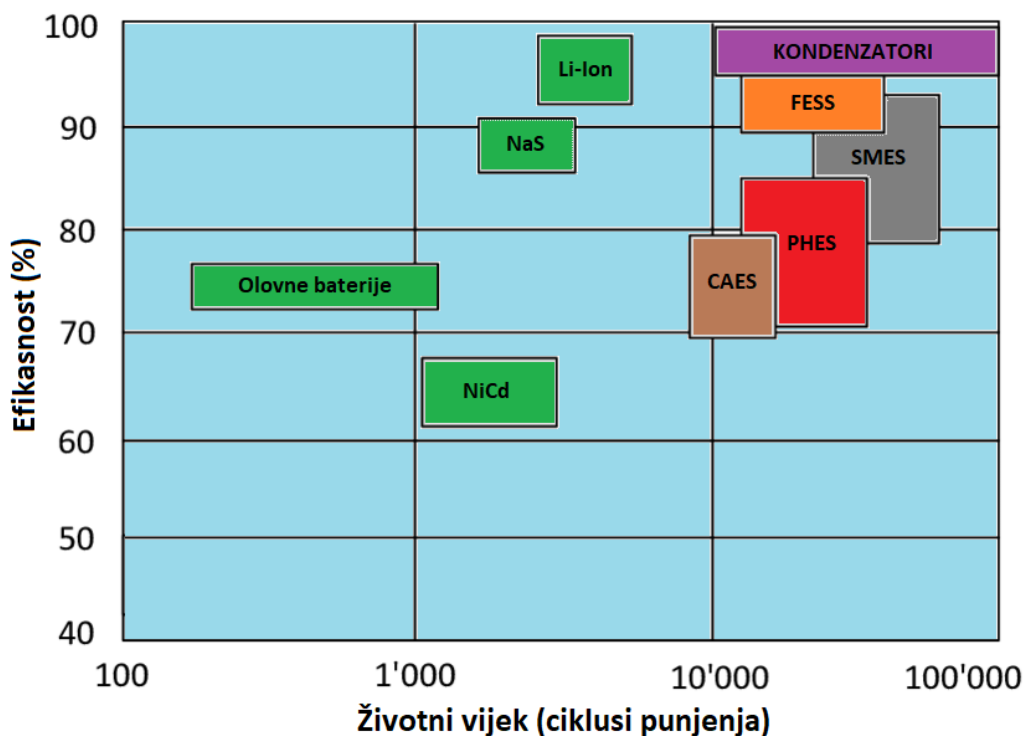
Slika 5 - Usporedba skladišta energije (specifična energija i snaga)



Slika 6 - Usporedba skladišta energije (izlazna snaga i vrijeme pražnjenja)

Izvor: Prilagodio student iz E. Hossain, H. M. R. Faruque, M. S. H. Sunny, N. Mohammad, and N. Nawar, 'A comprehensive review on energy storage systems: Types, comparison, current scenario, applications, barriers, and potential solutions, policies, and future prospects', *Energies*, no. 14. MDPI AG, Jul. 01, 2020.

Na sljedećoj slici prikazana je usporedba skladišta energije, gdje je na x osi prikazan životni vijek (broj radnih ciklusa – punjenje/pražnjenje), dok je na y osi prikazana efikasnost (u postocima):



Slika 7 - Usporedba skladišta energije (efikasnost i životni vijek)

Izvor: Prilagodio student iz https://www.researchgate.net/figure/Efficiency-and-lifetime-of-energy-storage-solutions_fig3_351840594

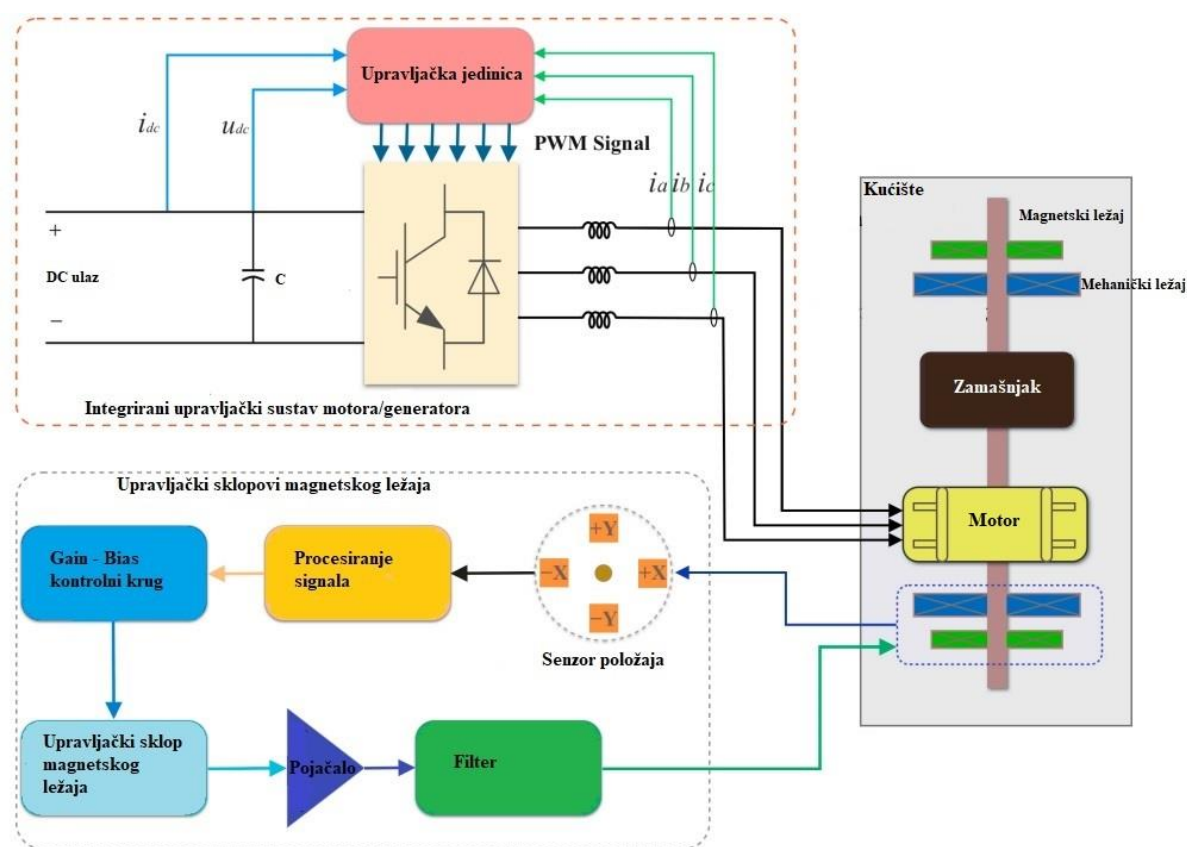
Na temelju podataka iz prethodnih ilustracija, može se zaključiti da su SES i FESS tehnologija najbolji kandidati za brodske elektroenergetske sustave, u smislu kratkoročnih skladišta energije. FESS je generalno skuplji od kondenzatora zbog većeg kapaciteta energije i veće snage (sekunde do minute). Što se tiče dugoročne pohrane energije, baterije su najprikladnija vrsta SE za brodske sustave. Za glađenje dugotrajnih fluktuacija u energiji, visokoenergetske baterije mogu biti idealno rješenje. Druge tehnologije poput PHEs i SMES nisu najbolje primjenjive za pomorsku industriju. PHEs je više usmjeren za kopnene gigawatt-ske instalacije za velike rezerve snage (10 sati do nekoliko dana). SMES je prikladan za potrebe apsorpcije ili davanja energije tokom nekoliko milisekundi, što nije idealno za glađenje fluktuacija snage u pomorskim sustavima. CAES SE imaju nižu cijenu u odnosu na baterije, ali još nisu komercijalno dostupni. Izlazna snaga je do nekoliko megawatt-a, ali trenutno se ne primjenjuju u pomorskom okruženju [7].

2.3. POVIJESNI RAZVOJ ZAMAŠNJAKA

U drevnim civilizacijama, koncept inercije igrao je ključnu ulogu u razvoju tehnologije. Primjena rotirajućih masa za pohranu energije datira iz davnih vremena, koji sežu do civilizacija poput Mezopotamije i Egipta. Filozofi i matematičari pokušavali su objasniti koncept gibanja, iako su se isti već u to vrijeme praktično primjenjivali uz razne alate, poput prvih bušilica i vretena. Lončarski kotač, rani primjer zamašnjaka, poboljšavao je učinkovitost u proizvodnji keramike. Kroz vrijeme, primjena zamašnjaka se širi. U Rimskom carstvu, a poslije i u srednjem vijeku, razni alati koristili su rotacijsku inerciju za stabilnost i kontinuirani rad alata. Bili su generalno u obliku diska, razvijajući se kako je tehnologija napredovala. Tijekom srednjeg vijeka i renesanse, razvoj u mehanici doveo je do daljnjih poboljšanja u dizajnu zamašnjaka, što se očitovalo u učinkovitosti i preciznosti u proizvodnim procesima. Tako su se isti primjenjivali od pokretanja tkalačkih i tokarskih strojeva, do pokretanja dizalica. Isto tako se pojavio koncept zamašnjaka sa promjenjivom inercijom, odnosno rani pokušaj reguliranja rotacijske brzine. Zamašnjak je postao ključna komponenta u obrtničkim i industrijskim okruženjima, gdje je doprinijelo tehnološkom napretku i ekonomskom rastu. Industrijska revolucija označila je značajan period za razvoj zamašnjaka, zbog početka primijene lijevanog željeza koji je, s pristupačnom cijenom i većom gustoćom materijala, olakšao izgradnju robusnih zamašnjaka za parne strojeve. Konkretni pojam „zamašnjak“ pojavljuje se tek 1784. godine, s razvitkom parnih strojeva i motora s unutarnjim izgaranjem. S obzirom na velike gabarite motora, zamašnjaci od lijevanog željeza ili čelika bili su nužni za održavanje kontinuiranog gibanja motora. Krajem 19. stoljeća nastavio se razvoj zamašnjaka, pogotovo u promjeni dizajna i primjene uz turbine, rudarske lokomotive i u urbanom prijevozu. Parne turbine radile su pri velikim brzinama vrtnje, što je postavilo temelje za sustave pohrane kinetičke energije pri velikim brzinama vrtnje. Prijelaz na motore s unutarnjim izgaranjem krajem 19. i početkom 20. stoljeća, zahtijevao je prilagodbe u dizajnu kako bi se udovoljilo specifičnim zahtjevima motornih vozila i omogućilo brže motore i njihov ugladeni rad. Krajem 60-tih godina 20. stoljeća, pojavio se pojam superzamašnjak izgrađen od kompozitnih materijala. Rast ekološke osviještenosti i obnovljivih izvora energije potaknulo je interes za sustave pohrane energije, gdje zamašnjak nalazi svoju primjenu. Unatoč dugoj povijesti, tehnologija zamašnjaka suočava se s izazovima u postizanju široke primjene i komercijalne održivosti. Međutim, trajni napori u istraživanju i razvoju, uz rastuću ekološku svijest, pružaju prilike za inovacije i napredak u ovom području [13].

3. GRAĐA SUSTAVA POHRANE ENERGIJE ZAMAŠNJAKOM

Sustav pohrane energije zamašnjakom (eng. *Flywheel Energy Storage System* ili FESS) sastoji se od kućišta u kojem se nalazi rotorski sustav sa motorom, poduprt najčešće magnetskim ležajevima. Kućište ima svrhu održavanja integriteta sustava, zaštite osoblja u slučaju kvara tijekom rotacije zamašnjaka, osiguravanja sigurnosnih protokola i održavanja vakuuma. Rotor je bitna i kritična komponenta koji, zbog mase i velike brzine vrtnje, zahtijeva pouzdanu potporu od strane ležajeva, čime se smanjuje trenje unutar sustava i time eliminiraju gubici. Na sljedećoj slici prikazan je blok dijagram FESS-a i njegove glavne komponente:



Slika 8 - Blok dijagram FESS-a

Izvor: Prilagodio student iz Amiryar, Mustafa E., and Keith R. Pullen. 2017. "A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications" *Applied Sciences* 7, no. 3: 286.

Integrirani upravljački sustav dio je energetske elektronike koji mora imati tri režima rada: generatorski režim rada, motorski režim rada i režim održavanja. Funkcionalnost dvosmjernog rada nužna je zbog prebacivanja između proizvodnje električne energije, gdje FESS daje električnu energiju u mrežu i pohrane energije, gdje FESS pohranjuje višak

električne energije iz mreže. Pomoću sustava energetske elektronike upravlja se parametrima kao što su napon i frekvencija, režim punjenja ili pražnjenja, itd. Zadnja bitna komponenta sustava, u slučaju da se FESS sastoji od magnetskih ležajeva, je upravljački krug magnetskih ležajeva, koji održava rotor u nominalnoj/centralnoj poziciji pomoću senzora položaja i kontrolnih krugova, ublažuje vibracije i podupire cijeli sustav rotora.

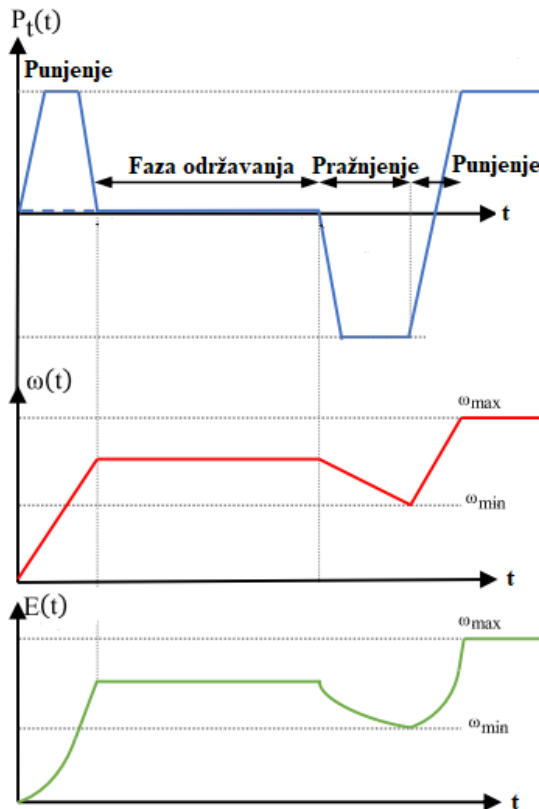
Projektiranje zamašnjaka zahtijeva balans različitih faktora ovisno o određenoj primjeni. Brzina okretaja zamašnjaka povećava kapacitet pohrane energije, ali stvara veće naprezanje na zamašnjaku, što dovodi do potrebe za skupljim i kvalitetnijim materijalima za rotor. Odabir kotača sa većim kapacitetom pohrane isto tako povećava kapacitet, ali isto tako i gabarite sustava, troškove proizvodnje, transporta i instalacije.

U sljedećim potpoglavljima opisat će se pojedina komponenta FESS-a, njihova uloga u radu sustava i detaljnije opisan princip i zahtijevane karakteristike koje su nužne za ispravnu funkcionalnost FESS-a.

3.1. PRINCIP RADA

FESS funkcionira na principu pretvorbe pohranjene kinetičke energije, u obliku vrtnje rotora, u električnu energiju pomoću generatora. FESS pritom mora, kao prethodno navedeno, imati mogućnost rada u tri režima: generatorski režim rada, motorski režim rada i režim održavanja. Kinetička energija se prenosi unutar i van zamašnjaka pomoću električnog stroja koji ima mogućnost rada kao motor i generator [14].

Prilikom punjenja, FESS pretvara električnu energiju iz mreže u mehanički rad vrtnjom rotora. Pritom električni stroj je u režimu motorskog rada. Električnom se energijom preko energetskih pretvarača frekvencije napaja motor, gdje se stvara okretni moment i primjenjuje na rotorski sustav, što uzrokuje njegovo ubrzavanje sve do postizanja nominalne brzine vrtnje. Jednom kad dostigne nominalnu brzinu, FESS više ne prima niti ne daje energiju u mrežu, odnosno nalazi se u fazi održavanja (nema ni apsorpcije ni otpuštanja energije). U toj fazi, zanemarujući male gubitke u energiji, zamašnjak drži pohranjenu energiju konstantnom. U slučaju potrebe za dodatnom energijom unutar mreže, zamašnjak prelazi u stanje pražnjenja, gdje se kinetičkom energijom pogoni generator koji proizvodi električnu energiju i vraća je natrag u mrežu preko energetskih pretvarača koji osiguravaju stabilan napon i frekvenciju [14], [15]. Na sljedećoj slici grafički je prikazana promjena snage, kutne brzine i energije kroz vrijeme ovisno o punjenju i pražnjenju zamašnjaka:



Slika 9 - Dijagram snage, kutne brzine i energije u ovisnosti o vremenu

Izvor: prilagodio student iz R. Takarli et al., 'A Comprehensive Review on Flywheel Energy Storage Systems: Survey on Electrical Machines, Power Electronics Converters, and Control Systems', IEEE Access, vol. 11. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 81224–81255, 2023.

3.1.1. Parametri FESS-a

Zamašnjak pohranjuje električnu energiju u obliku rotacije tijela sa masom m . Energija E pohranjena rotacijom tog tijela proporcionalna je inerciji J tog tijela i kvadratu kutne brzine ω , a izražava se formulom [16]:

$$E = \frac{1}{2}J\omega^2 \quad (1)$$

gdje je:

E = energija pohranjena na rotoru zamašnjaka u obliku kinetičke energije [J],

J = inercija rotora [kg/m^2],

ω = kutna brzina rotora [rad/s].

Sukladno formuli (1), energija pohranjena na zamašnjaku može se povećati povećanjem brzine vrtnje rotora ili povećanjem momenta inercije rotora. Problematika pohrane energije u zamašnjaku, koja bi idealno trebala biti što veća, je balans između brzine vrtnje i mase rotora. Povećanje brzine ω efikasnije je nego ugraditi rotor velike mase, međutim javlja se problem naprezanja zamašnjaka zbog djelovanja centrifugalne sile. Zamašnjaci se zato dijele u zamašnjake sa malim brzinama, koje karakteriziraju male brzine vrtnje rotora i velika masa, i zamašnjaci sa velikim brzinama vrtnje rotora, koje karakteriziraju velike brzine vrtnje i manja masa rotora [17]. Frekvencija izlaznog napona proporcionalna je brzini, tj. opada tokom pražnjenja. Ovisno o pobudi generatora, varira i napon. Ključni su, zato, pretvarači frekvencije koji stvaraju konstantan izlazni napon sa stabilnom frekvencijom. Oblik, masa i veličina rotora znatno utječu na moment inercije rotora. Moment inercije J može se izraziti kao [18]:

$$J = \frac{1}{2}mr^2 \quad (2)$$

gdje je:

J = inercija rotora [kg/m²],

m = masa rotora [kg],

r = radijus rotora [m].

S obzirom na fluktuacije brzine vrtnja rotora, gdje je minimalna brzina ω_{\min} a maksimalna brzina ω_{\max} , potrebno je osigurati prihvatljivu razinu napona i frekvencije sa što manjom fluktuacijom, kako bi stabilnost napona i frekvencije bila što kvalitetnija, a time se poboljšao rad energetskih pretvarača. U tom slučaju kinetička energija izražava se pomoću sljedeće jednadžbe [19]:

$$E = \frac{1}{2}J(\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2) \quad (3)$$

gdje je:

E = energija pohranjena na rotoru zamašnjaka u obliku kinetičke energije [J],

J = inercija rotora [kg/m²],

ω_{\min} = minimalna kutna brzina rotora [rad/s],

ω_{\max} = maksimalna kutna brzina rotora [rad/s].

Energija pohranjena na zamašnjaku ovisi o kapacitetu FESS-a, dok je vršna snaga koju sustav može predati u mrežu ovisna o brzini kojom može tu energiju osloboditi. Parametri koji povezuju snagu i energiju su [20]:

- Odnos energije i snage (E/P) – omjer instaliranog kapaciteta energije i snage. Veći E/P omogućuje davanje male snage kroz dulje vrijeme, dok FESS sa manjim E/P mogu predati veliku snagu u kratkom periodu vremena,
- Gustoća energije ρ_e – odnos pohranjene energije i volumena zamašnjaka (kWh/m^3),
- Gustoća snage ρ_p – odnos dostupne snage i volumena zamašnjaka (kW/m^3),
- Specifična energija E_{spec} – odnos isporučene snage i mase zamašnjaka (kWh/kg),
- Specifična snaga P_{spec} – odnos isporučene snage i mase zamašnjaka (kW/kg),
- Kapacitet skladištenja C – količina energije koju zamašnjak može uskladištiti.

Neki konkretni parametri FESS prikazani su u sljedećoj tablici:

Tablica 1 - Parametri Fess-a

Specifična energija (Wh/kg)	Gustoća energije (kWh/m^3)	Specifična snaga (kW/kg)	Gustoća snage (kW/m^3),	Efikasnost (%)
5-200	0.25-424	40-2000	400-30000	70-96

Izvor: Prilagodio student iz Sabihuddin S, Kiprakis AE, Mueller M. A Numerical and Graphical Review of Energy Storage Technologies. *Energies*. 2015;

3.1.2. Klasifikacija FESS-a

Kao što je navedeno u prethodnim potpoglavljima, FESS se može klasificirati u 2 skupine s obzirom na brzinu vrtnje rotora i kapacitet energije koju zamašnjak može pohraniti [21]:

- male brzine, manje od 10.000 min^{-1} ,
- velike brzine, od 10.000 min^{-1} do 100.000 min^{-1} .

Sljedeća Tablica 1 prikazuje glavne karakteristike zamašnjaka velikih i malih brzina.

Tablica 2 - Karakteristike sporih i brzih zamašnjaka

	FESS – malih brzina	FESS – velikih brzina
Materijal	Čelik	Kompozitni materijali
Motor	Asinkroni motor, PMSM, reluktantni motor	PMSM, reluktantni motor
Kućište	Parcijalni vakuum ili laki plinovi	Vakuum
Gabariti kućišta	2 x težina zamašnjaka	½ x težina zamašnjaka
Ležajevi	Mehanički i kombinirani	Magnetski
Primjena	Upravljanje kvalitetom električne energije	Transport i industrija
Cijena	1x	5x

Izvor: Prilagodio student iz Peña-Alzola, Rafael & Sebastian, Rafael & Quesada, Jerónimo & Colmenar, A.. (2011). Review of flywheel based energy storage systems. International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives.

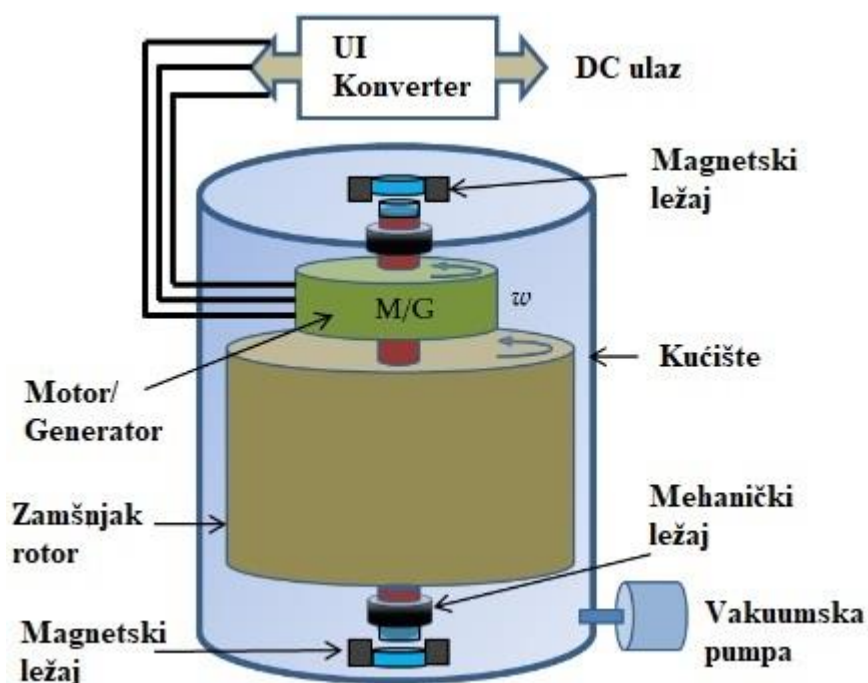
Zamašnjaci velike brzine su relativno skupi jer im je cijena generalno pet puta veća od onih sa malim brzinama vrtnje. Kako rade pri velikim brzinama vrtnje, u većini slučajeva, moraju imati rotorski sustav podržan magnetskim ležajevima unutar vakuumske komore kako bi se smanjili gubici zbog trenja. Kinetička energija, kao što je navedeno u prethodnom poglavlju, proporcionalna je masi zamašnjaka i kvadratu brzine vrtnje rotora. Veća masa rotora posljedično povećava i gabarite cijelog sustava, dok brzina vrtnje povećava centrifugalnu silu. Zamašnjaci velikih brzina, sa malom masom ali velikom brzinom vrtnje, dizajnirani su za primjene gdje je potrebna visoka specifična energija i specifična snaga a kapacitet energije je vrlo mali. Obično su takvi zahtjevi u transportu i zrakoplovstvu, gdje je omjer težine i volumena bitan. Rotorski sustav izgrađen je od kompozitnih materijala, koji su dizajnirani sa velikim pragom naprežanja. Glavni problem kompozitnih materijala, što će kasnije biti obrađeno, je činjenica da su izuzetno skupi, što opravdava i samu cijenu ovakvih zamašnjaka [22].

Zamašnjaci male brzine obično imaju veliki kapacitet energije i visoku nazivnu snagu. Tipična primjena im je u energetske mrežama gdje služe kao skladište energije za stabilizaciju napona i frekvencije. Rotor je izgrađen od čelika, koji je jeftiniji od kompozitnih

materijala, čime se smanjuju troškovi proizvodnje. S obzirom na malu brzinu vrtnje, rotorski sustav mora imati veliku masu kako bi se povećala inercija i time pohranjena kinetička energija. Velika masa rotora povećava gabarite sustava, a zahtjevi za težinu i prostor su otprilike dvostruko veći. Mala brzina vrtnje omogućuje korištenje jeftinijih mehaničkih ležajeva koji se najčešće uparuju sa magnetskim ležajevima, a takva kombinacija omogućuje produljeni vijek trajanja zamašnjaka. Unatoč niskoj specifičnoj energiji, zamašnjaci s malim brzinama vrtnje postižu nisku cijenu, robusnu i pouzdanu konstrukciju i potrebu za jednostavnijim komponentama izgrađenim od jeftinijih materijala [22].

3.2. KUĆIŠTE

Kućišta zamašnjaka obično su izrađeni od čelika ili kompozita izrazite čvrstoće. Glavne komponente unutar kućišta su: električni stroj (motor/generator), ležajevi i rotorski sustav koji povezuje električni stroj i zamašnjak istom osovinom. Na sljedećoj slici prikazano je kućište FESS-a:



Slika 10 - Kućište zamašnjaka

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

Cijeli sustav rotora mora biti smješten unutar komore pod vakuumom, kojeg održava vakuumska pumpa, što omogućava eliminaciju gubitaka zbog trenja u sustavu, čime se

poveća električna efikasnost. Kućište osigurava vakuumsko okruženje, potporu za ugradnju komponenti i osigurava zadržavanje rotorskih krhotina radi zaštite objekta i radnika u slučaju da isti zakaže. U slučaju pucanja rotora, način na kojem će se dijelovi raspršiti ovisi o tipu materijala od kojeg je izgrađen. Metal ima tendenciju raspršivanja u veće komade, zbog homogenosti materijala, dok se kompozitni materijali razbijaju u sitne fragmente [21]. Stoga je bitna podzemna ugradnja zamašnjačkog kućišta.

3.2.1. Vakuumska komora i sustav vakuumskih pumpi

Glavni gubici u sustavu su gubici aerodinamičkog otpora (otpor zraka). Gubitak aerodinamičkog otpora proporcionalan je brzini vrtnje rotora (odnosno raste sa gustoćom energije) i trenju medija koji okružuje zamašnjak. Otpor zraka sporih zamašnjaka je zanemariiv, obično višestruko manji od otpora kod trenja ležajeva, što je uobičajeno zbog težine same rotorske konstrukcije. Kako bi se gubici zbog aerodinamičkog otpora sveli na što manju mjeru, zamašnjak se postavlja u vakuumsku komoru ili komoru sa plinovima niske gustoće (npr. helij), što zahtjeva vanjske sustave vakuumskih pumpi. Vakuumska pumpa stvara nizak tlak i osigurava hlađenje koje je nužno za toplinu generiranu od strane električnog stroja. Ovisno o materijalu za izradu rotora, biraju se i posebne vakuumske pumpe koje mogu osigurati određeni tlak. Kompozitni rotori zahtijevaju niže vakuumske tlakove jer rade pri vrlo velikim brzinama vrtnje. Osim toga, njihovo ponašanje pri visokim temperaturama je loše, a niska toplinska vodljivost otežava hlađenje. Metalni rotori imaju nižu brzinu vrtnje i veću toplinsku vodljivost, što osigurava ravnomjerno zagrijavanje i lakše hlađenje. Poželjni tlak unutar komore je između 10^{-1} hPa do 10^{-3} hPa. Koriste se lopatične rotacijske pumpe, a za tlakove niže od 10^{-3} hPa, koriste se i turbo pumpe [13], [16], [19].

3.2.2. Brtve

Ako se prijenos snage sa motora na zamašnjak izvodi spajanjem osovina preko prijenosnog sustava, koji se nalazi izvan vakuumske komore, potrebna je rotacijska brtva. Zbog neizbježnog curenja rotacijski brtvi, potrebno je povećati tlak unutar komore. Kod zatvorene jedinice, gdje je direktna povezanost električnog stroja i rotora, kućište zamašnjaka nema rotacijskih brtvi, pa je curenje vakuuma unutar kućišta malo i nema potrebe za stalnim radom vakuumskih pumpi [13], [16]. Implementacija brtvi obuhvaća nekoliko vrsta koje zadovoljavaju različite operativne potrebe. U knjizi [13], navodi se mehanička brtva za kontakt dviju površina, gdje se koriste grafitni i čelični prstenovi koji mehaničkom kompresijom brtve sustav, sa opcijom dodavanja opruga i magneta za

održavanje sile. Drugi tip mehaničke brtve je brtva sa brtvenim rubom (eng. *lip seal*) koja je ekonomična po cijeni i omogućuje velike brzine vrtnje rotora. Magnetske tekućinske brtve sadrže magnetne čestice u tekućem mediju koje sprječavaju trenje. Permanentni magneti na rubovima otvora održavaju tekućinu u položaju. Centrifugalno-magnetne brtve, kombinacija su centrifugalnih i magnetskih brtvi, omogućuju visoku prikladnost za vakuum i niske stope propuštanja uz odgovarajuće hlađenje. Određena razina propuštanja je svejedno neizbježna.

3.3. ROTOR

Rotor zamašnjaka, kao glavna komponenta FESS-a, sastoji se od rotirajućeg diska na osovini koji služi kao mehaničko skladište energije. Kroz povijest, primarna je primjena zamašnjaka bila za ublažavanje rada strojeva uzrokovanih oscilacijama. Kao što je već spomenuto, zamašnjak pohranjuje električnu energiju pretvorbom u kinetičku energiju ili mehanički rad, odnosno u obliku vrtnje rotora. Jednadžba (1) opisuje taj fenomen, a on glasi: kinetička energija pohranjena na rotoru zamašnjaka proporcionalna je momentu inercije rotora (koji je proporcionalan masi i kvadratu radijusa rotora) i kvadratu kutne brzine vrtnje rotora. Generalno gledajući, rotor se najčešće predstavlja kao tijelo sa homogeno strukturom, odnosno kao puni cilindrični objekt. Kako bi pohranili više energije na objekt mase m , radijusa r , duljine l i gustoće ρ , jednadžba momenta inercije (2) može se proširiti kao [23]:

$$J = \frac{1}{2}mr^2 = \frac{1}{2}\rho l\pi r^4 \quad (4)$$

gdje je:

J = inercija rotora [kg/m²],

m = masa rotora [kg],

r = radijus rotora [m],

l = duljina rotora [m],

ρ = gustoća tijela rotora [kg/m³].

Jednadžba (4) pokazuje da se povećanjem radijusa diska i korištenjem materijala veće gustoće može povećati pohranjena energija na zamašnjaku. Naravno, proporcionalno će rasti i gabariti sustava. Rad zamašnjaka može se aproksimirati pomoću sljedeće jednadžbe [23]:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_{em} - f\omega \quad (5)$$

gdje je:

J = inercija rotora [kg/m^2],

ω = kutna brzina [rad/s],

T_{em} = elektromehanički moment [Nm],

f = koeficijent trenja.

3.3.1. Dimenzioniranje rotora

U poglavlju 3.1.1., u kojem se izlažu neke jednadžbe FESS-a i parametri koji opisuju sustav, navodi se da je najefikasniji način za povećanje kinetičke energije rotora upravo povećanje brzine vrtnje rotora. To, naravno, vuče činjenicu da se upravo kod zamašnjaka sa velikim brzinama vrtnje moraju koristiti materijali sa većom vlačnom čvrstoćom [15]. Vlačna čvrstoća σ , ograničavajući je faktor prilikom projektiranja nominalne brzine zamašnjaka. Određuje maksimalnu brzinu vrtnje rotora kako bi se naprezanje održalo ispod granice čvrstoće materijala [16]. Vlačna čvrstoća opisuje se jednadžbom [16], [24]:

$$\sigma = \rho r^2 \omega^2 \quad (6)$$

gdje je:

σ = vlačna čvrstoća [MPa],

ρ = gustoća tijela rotora [kg/m^3],

r = radijus tijela rotora [m],

ω = kutna brzina [rad/s].

Materijali sa manjom gustoćom generiraju manja inercijska opterećenja i karakterizira ih velika vlačna čvrstoća, što ih čini idealne za zamašnjake sa velikom brzinom vrtnje. Materijali sa većom gustoćom generiraju veća inercijska opterećenja i karakterizira ih manja vlačna čvrstoća, ali zato svojom masom nadoknađuju veći kapacitet pohrane energije, što ih čini idealne za zamašnjake sa malom brzinom vrtnje [15], [16]. Maksimalna gustoća energije u odnosu na masu (specifična energija) i volumen (gustoća energije) opisuje se jednadžbom [19]:

$$E_{m,max} = K \frac{\sigma_{max}}{\rho} \quad (7)$$

$$E_{V,max} = K \sigma_{max} \quad (8)$$

gdje je:

$E_{m,max}$ = maksimalna specifična energija [J/kg],

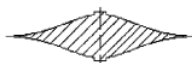

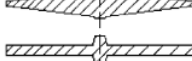
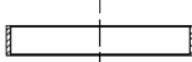
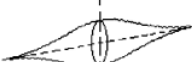

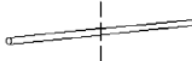
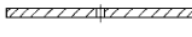

$E_{V,max}$ = maksimalna gustoća energije [J/m³],

K = koeficijent oblika,

σ_{max} = vlačna čvrstoća [MPa],

ρ = gustoća tijela rotora [kg/m³].

Koeficijent K je parametar koji određuje ograničenje brzine vrtnje rotora i energiju koja se može pohraniti na zamašnjak, a ovisi o geometrijskom obliku zamašnjaka. Sljedeća slika prikazuje geometrijske oblike zamašnjaka i njihov pripadajući koeficijent K :

Geometrijski oblik	Poprečni presijek	Koeficijent K
Disc		1.000
Modified constant stress disc		0.931
Conical disc		0.806
Flat unpierced disc		0.606
Thin firm		0.500
Shaped bar		0.500
Rim with web		0.400
Single bar		0.333
Flat pierced bar		0.305

Slika 11 - Koeficijent K i geometrijski oblik zamašnjaka

Izvor: B. Bolund, H. Bernhoff, and M. Leijon, 'Flywheel energy and power storage systems', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, no. 2. pp. 235–258, Feb. 2007. doi: 10.1016/j.rser.2005.01.004

3.3.2. Materijali za izradu rotora

Izbor materijala za zamašnjake ovisi o zahtjevima dizajna i njegovim ograničenjima. Najčešći materijali u današnjici za izradu zamašnjaka su kompozitni materijali i čelik. Kompozitne materijale od ugljičnih vlakana karakterizira visoka čvrstoća i niska gustoća. Prednost ugljičnih vlakana u odnosu na čelične zamašnjake je čvrstoća materijala, čiji omjer σ_{max}/ρ je 600 kNm/kg za ugljična vlakna u odnosu na 75 kNm/kg za čelik. To omogućuje smanjeno naprezanje pri velikim brzinama vrtnje. Naravno, ne smije se nikada uzimat maksimalna vrijednost vlačne čvrstoće σ_{max} , jer to mora predstavljat prag gdje materijal dostiže maksimalna projektirana naprezanja. Materijali od ugljičnih vlakana su ortotropni, što znači da sadrže različita svojstva čvrstoće u različitim smjerovima. Vlakna koja imaju svojstvo čvrstoće u određenom smjeru imaju visok koeficijent $K > 0,5$ (najčešće su dvosmjerni). Izrazito su čvrsti u tom smjeru ali slabiji u ostalima, što znači da ne mogu ravnomjerno rasporediti opterećenje. Međutim ako se koriste vlakna čija su svojstva raspoređena u više smjerova, mogu se ojačati oni slabiji, a to će činiti materijal ravnomjernim ali smanjiti ukupnu čvrstoću. Takvi višesmjerni materijali imaju K koeficijent $< 0,5$. Dakle, to je kompromis između stvaranja materijala koji je čvrst u svim smjerovima sa manjim koeficijentom K ili stvaranja materijala koji je iznimno čvrst u jednom smjeru ali ne podnosi opterećenja u ostalima te ima velik K koeficijent. Današnji materijali su izrazito ortotropni, jer se pokušavaju dizajnirati kao jednosmjerni materijali što omogućuje velika svojstva čvrstoće u tom smjeru. Kako bi se iskoristila njihova snaga moraju se oblikovati u obliku šupljeg cilindra kako bi se maksimizirala snaga u smjeru relevantnom za rotor. Čelični zamašnjaci koriste oblik diska ili cilindra ($K = 0,6$) kako bi maksimizirali čvrstoću, dok se zamašnjaci od ugljičnih vlakana namotavaju u obliku šupljeg cilindra, što smanjuje K koeficijent za polovicu. Štoviše, kada se uzme u obzir dopuštena vlačna čvrstoća (60% za čelik u odnosu na ugljična vlakna) i K koeficijent, zamašnjaci od ugljičnih vlakana zauzimaju dvostruko veći volumen (zbog gustoće – jednadžba 8) od čeličnih za istu energiju (gustoća energije) [13], [25], [26].

Autori Kale V., Secanell M., u svom radu [26] izlažu optimalne izvedbe zamašnjaka ovisno o kriteriju maksimalne kinetičke energije i specifične snage. Čimbenik koji je uzet u obzir je maksimalna vlačna čvrstoća materijala. Rezultati su pokazali da kompozitni materijali kao izbor za zamašnjake nadmašuju metalne zamašnjake u smislu specifične energije, ali su skuplji. Specifična energija kompozitnih rotora mogla bi se povećati upotrebom više spojenih slojeva materijala (laminirani oblik), što bi povećalo performanse.

Nadalje, uspoređujući kapacitet energije i troška, metalni zamašnjaci imaju prednost u odnosu na kompozitne.

Što se tiče zamora materijala i kvarova, čelični rotori obično propadaju zbog pukotina uzrokovanih zamorom materijala, dok zamašnjaci od ugljičnih vlakana imaju mogućnost eksplozije prilikom otkaza, pa je ključna instalacija kućišta u podzemne bunkere jer će zemlja apsorbirati velik dio sile ako dođe do iste [25].

U sljedećoj tablici prikazuju se kapacitet pohrane električne energije, gustoća i vlačna čvrstoća najčešće korištenih materijala za rotor, uzimajući u obzir rotor istih dimenzija:

Tablica 3 - Parametri materijala

Materijal	σ_{max} [GPa]	ρ [kg/m ³]	E_{spec} [Wh/kg]
E stakleno vlakno	3.5	2540	231.9
S stakleno vlakno	4.8	2530	320.6
Kevlar	3.8	1450	441.1
Spectra vlakno/ polietilensko vlakno	3.0	970	520.6
Ugljična vlakna	10	1800	945.7
Čelik	2.7	7800	56.8
Aluminijske legure	0.6	2700	36.1

Izvor: Prilagodio student iz K. Xu, Y. Guo, G. Lei, and J. Zhu, 'A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies', *Energies*, vol. 16, no. 18. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), Sep. 01, 2023.

3.4. MOTOR/GENERATOR

Motor/generator je električni stroj koji uzima višak električne energije iz mreže i, preko energetske pretvarača, pretvara ju u mehanički rad u obliku vrtnje rotora. Taj proces je moguć i obrnuto. Tokom pohrane električne energije, električni stroj je u režimu motorskog rada, gdje proporcionalno brzinom vrtnje rotora raste kinetička energija. Tokom predaje energije natrag u mrežu, električni stroj mora djelovati kao generator. Dakle, oslobađa kinetičku energiju i pretvara u električnu, pritom smanjujući brzinu vrtnje

zamašnjaka [17]. Električni stroj mora imati: sposobnost rada pri vrlo velikim brzinama, minimalne gubitku pri različitim brzinama, visoku učinkovitost i osigurati zadovoljavajuću stabilnost i robusnost [14]. Najčešće korišteni strojevi za FESS sustave su:

- Sinkroni motori sa permanentnim magnetima
- Asinkroni ili indukcijski motori
- Istosmjerni motori
- Reluktantni motori

U sljedećoj tablici prikazani su neki konkretni parametri najčešće korištenih električnih strojeva za zamašnjake:

Tablica 4 - Parametri električnih strojeva

	Asinkroni motor	Prekidačko-reluktantni motor	Motor sa permanentnim magnetima
Izlazna snaga	Velika	Srednja i niska	Srednja i niska
Specifična snaga	Srednja (0.7kW/kg)	Srednja (0.7kW/kg)	Visoka (12kW/kg)
Efikasnost (%)	91-94	90	95-97
Gubici	Bakru i željezu (histereza, vrtložne struje)	Željezu	/
Metode upravljanja	Vektorska kontrola	Vektorska kontrola	Vektorska kontrola
Max brzina (min^{-1})	900-15000	>15000	>30000
Cijena	Niska (22€/kW)	Niska (24€/kW)	Visoka (3824€/kW)

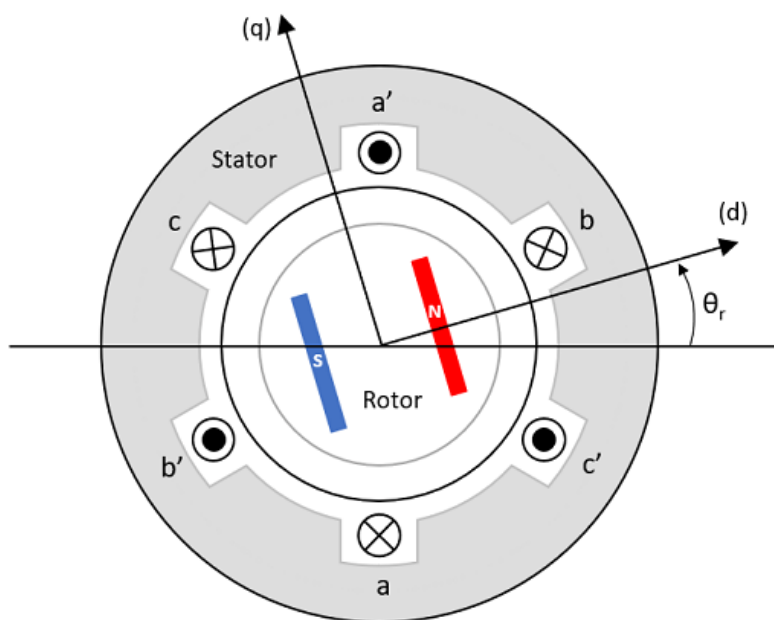
Izvor: Prilagodio student iz K. Xu, Y. Guo, G. Lei, and J. Zhu, 'A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies', Energies, vol. 16, no. 18. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), Sep. 01, 2023

FESS radi većinu vremena u fazi održavanja, gdje stroj radi sa minimalnim opterećenjem. Kako bi se poboljšala učinkovitost i smanjilo samopražnjenje skladišta

energije, stroj mora imati mali gubitak u režimu održavanja [27]. U nekim izvedbama električni stroj je izveden kao dio rotora zamašnjaka, odnosno direktno spojen na istu osovinu, smanjujući volumen sustava. S obzirom da zamašnjaci rađeni od kompozitnih materijala imaju šuplju strukturu, tipično je stroj postaviti unutar zamašnjaka. Kod zamašnjaka sa metalnim rotorom, stroj mora biti ugrađen do zamašnjaka. Učinkovitost električnog stroja najčešće je između 85% - 90% [25].

3.4.1. Sinkroni motor sa permanentnim magnetima

Motori sa permanentnim magnetima su vrsta sinkronih strojeva. Najčešća je izvedba motora koji se ugrađuju u zamašnjake s obzirom na njihov visok stupanj korisnosti, zanemarive gubitke uzbude zbog permanentnih magneta (nema potrebe za vanjskim napajanjem uzбудnih namotaja) i veliku gustoću snage magnetskog toka. Ovakve izvedbe su pritom najskuplje zbog permanentnih magneta, koji su senzibilni na temperaturne promjene koje mogu uništiti njihovo magnetsko svojstvo, a imaju i dosta nisku vlačnu čvrstoću [28]. Materijali od kojih se rade permanentni magneti su neodimijum-željezo-boron (NdFeB) i samarijum-kobalt (SmCo) [14].



Slika 12 - Presijek PMSM

Izvor: <https://in.mathworks.com/help/autoblks/ref/interiorpmsm.html>

Motori sa permanentnim magnetima obično se primjenjuju kod FESS-a sa velikim brzinama vrtnje. Sastoji se od statorskih namotaja (a, b, c) koji su prostorno pomaknuti kako

bi stvorili sinusno rotirajuće magnetsko polje, a rotor je sastavljen od permanentnih magneta. Kada se na statorske namotaje dovede trofazno napajanje, stvara se rotirajuće magnetsko polje. Rotor, sa svojim magnetskim polovima (S - eng. *South* ili Jug, N – eng. *North* ili Sjever), rotira sinkronom brzinom statora. Kako bi rotor uhvatio rotirajuće statorsko polje, nužno je osigurati napajanje pomoću pretvarača frekvencije, koji će kontroliranim povećanjem frekvencije zavrtnuti rotor do nazivne brzine. Na prethodnoj slici prikazan je presjek PMSM (eng. *Permanent Magnet Synchronous Machine*) motora. Poprečni presjek motora sa permanentnim magnetima, prikazan u DQ koordinatnom sustavu. Transformacija statorskih struja u DQ koordinatni sustav koristi se kod, najčešće primijenjene, vektorske kontrole, gdje [d] predstavlja direktnu os ili struju koja stvara moment, dok [q] predstavlja kvadraturnu os, ili struju magnetizacije koja stvara i održava magnetski tok unutar stroja. Vektorska kontrola biti će objašnjena u sljedećim poglavljima.

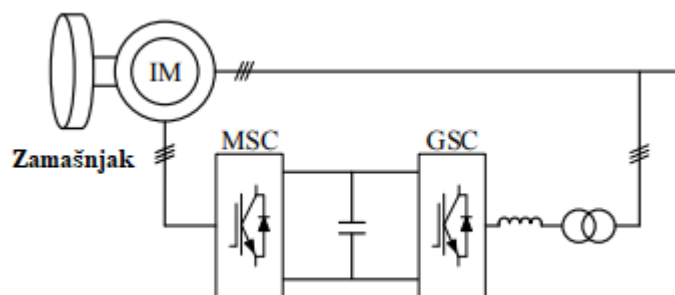
Kako bi se poboljšala izvedba PMSM-a, ključno je minimizirati gubitke. Gubici permanentnih magneta, iako mali, najveća su komponenta gubitaka tog motora. Rezanje i oblikovanje permanentnih magneta na komade jedan je način optimiziranja gubitaka rotora (oblikovanjem magneta za specifičan dizajn može optimizirati distribuciju magnetskog polja i bolju učinkovitost), primjena PWM (eng. *Pulse Width Modulation*) pretvarača sa manje harmoničkih komponenti i rad motora unutar vakuumske kućišta smanjuje gubitak zbog trenja zraka i šireg spektra brzina rada. Dodatno, odabir materijala jezgre sa manjim gubicima željeza i laminiranog oblika, optimiziranje sustava hlađenja i održavanje niže gustoće magnetskog toka zračnog rasporeda dodatno doprinose smanjenju gubitaka rotora (niža gustoća magnetskog toka smanjuje vrtložne struje, gubitke u histerezi i podiže faktor snage, ali smanjuje izlazni moment motora) [27], [29], [30].

3.4.2. Asinkroni/indukcijski motor

Smatra se kao najbolje rješenje za zamašnjake malih brzina i velike snage, zbog njihove robusne konstrukcije, male cijene, velikog momenta i visoke pouzdanosti. Asinkroni motori imaju mnoge prednosti, ali i nedostatke. Nelinearnosti i izrazito jaka magnetska sprega unutar motora čine njihov sustav upravljanja složenijim, pa je regulacija brzine manje precizna nego kod ostalih izvedba. Generalno, asinkroni motori nisu pogodni za instalacije sa velikim brzinama zamašnjaka a isto tako su manje učinkoviti nego PMSM motori. Problem asinkronih motora je stalna inducirana struja rotora, što dovodi do zagrijavanja i isključuje asinkrone motore za primjenu kod kućišta s apsolutnim vakuumom jer je hlađenje

u istima vrlo teško. Apsolutni vakuum dopušta ispuštanje topline samo toplinskim zračenjem [24], [28].

Jedan od rješenja su asinkroni motori sa dvostrukim napajanjem - DFIM (eng. *Double-Fed Induction Motor*) koje karakterizira fleksibilno upravljanje i pretvarači manjih dimenzija: prvi trofazni ulaz napajanja dolazi direktno iz mreže na statorske namotaje sa konstantnom frekvencijom, dok drugi trofazni ulaz dolazi s izlaza pretvarača frekvencije, koji napaja krug rotora. Asinkroni motori sa dvostrukim napajanjem, zbog svoje fleksibilne kontrole preko rotorskog kruga i visoke snage, koriste se najčešće kod vjetroelektrana, hidroelektrana i pumpnih stanica, odnosno kod sustava za proizvodnju energije. DFIM reguliraju tok energije kod vjetroelektrana sa FESS-om sa vektorskom kontrolom upravljanja (FOC – eng. *Field Orientated Control*) kako bi se postigla neovisna regulacija djelatne i jalove snage, matematičkim odvajanjem struja motora i predstavljanje matematičkim modelom unutar sinkrono-rotirajućeg referentnog okvira (više o tome u sljedećim poglavljima) [24], [31]. Sljedeća slika prikazuje blok dijagram DFIM sustava:



Slika 13 - FESS sa DFIM motorom

Izvor: Nguyen, T.-T.; Yoo, H.-J.; Kim, H.-M. A Flywheel Energy Storage System Based on a Doubly Fed Induction Machine and Battery for Microgrid Control. *Energies* **2015**, 8, 5074-5089

3.4.3. Istosmjerni motor

Istosmjerni motor bez četkica ili BLDC (eng. *BrushLess DC motor*), tip je istosmjernih motora koji ima prednost nad ostalim zbog visoke učinkovitosti, visoke gustoće snage, širokog raspona brzine, niskog održavanja i odsutnosti elektromagnetskih smetnji. Kao i sinkroni stroj, sadrži permanentne magnete na rotoru, a upravljanje se izvodi s istosmjernom strujom statora. Najveći problem BLDC motora su gubici i nelinearne sile kod malih opterećenja pri velikim brzinama vrtnje, što ima za potrebu korištenja naprednijih sustava

ležaja. Korištenjem BLDC motora bez željezne jezgre, može spriječiti navedene probleme, pa su najčešće korišteni za FESS u kategoriji DC motora [17], [21].

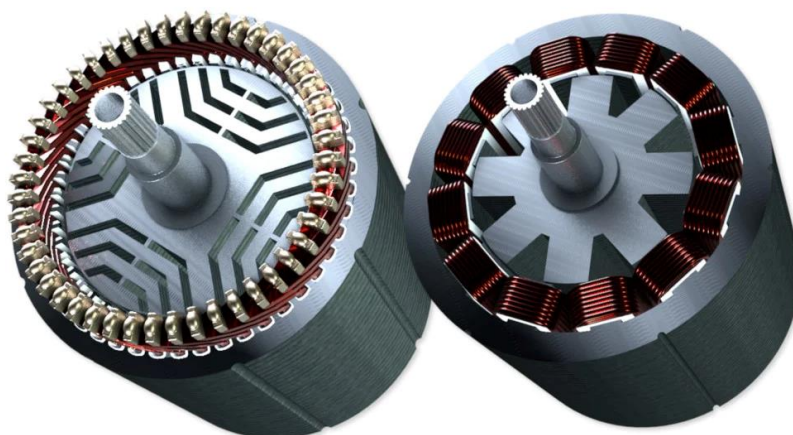
3.4.4. Reluktantni motor

Ovakvu izvedbu motora karakterizira velika robusnost, otpornost na visoke temperature, ekonomičnost, jednostavno održavanje i jednostavan dizajn što je prikladno za zamašnjake s velikim brzinama vrtnje. Međutim, nedostaci su nedovoljno konstantan moment sa velikom valovitošću i neoptimalna učinkovitost, što uzrokuje buku i gubitke zbog trenja rotora [14], [21], [32].

Dva su tipa reluktantnih motora koji se koriste kod FESS-a:

1. Sinkroni reluktantni motori – SynRM (eng. *Synchronous Reluctance Motor*),
2. Prekidačko-reluktantni motori - SRM (eng. *Switched Reluctance Motor*).

Sinkroni reluktantni motori koriste se u FESS-u zbog jednostavnosti, visoke učinkovitosti, velikog kapaciteta snage i male valovitosti. SynRM su vrlo robusni i njihova proizvodna cijena je vrlo niska. SynRM motori imaju trofazne namotaje na statoru i solidan rotor sa istaknutim polovima. Brzina vrtnje ovisi o frekvenciji trofaznog napajanja na statoru i broju magnetski polova [17], [24]. Sljedeća slika prikazuje presjek reluktantnih motora (SRM - lijevo i SynRM - desno):



Slika 14 - Reluktantni motori

Izvor: <https://oswos.com/reluctance-motor/>

Prekidačko-reluktantne motore karakterizira jednostavnost i robusnost, velik raspon brzina, visoka efikasnost i mali gubici u jezgri (manji nego kod PMSM). SRM motori imaju

dvostruko istaknute polove, te ga dizajn čini prikladnim za primjene sa velikim brzinama. Rotor nema magneta niti zavojnica, nego je izrađen od solidnog magnetskog materijala. Upravljanje motorom vrši se pomoću energetske pretvarača koji isključuju i uključuju napajanje na polove statora kako bi se rotor vrtio u smjeru sljedećeg pola koji dobiva napajanje. To znači da brzina vrtnje motora ovisi o brzini prebacivanja napajanja polova.

Iako ovakvi motori nemaju skupe permanentne magnete na rotoru, gubici u jezgri su mali i imaju veliki zakretni moment, ne koriste se previše u FESS primjena zbog velikih valovitosti u struji, magnetskom toku i izlaznom momentu motora, a isto tako imaju mali faktor snage i gubitke zbog vrtložnih struja u rotoru. Njegovo je upravljanje pri velikim brzinama vrtnje jednostavnije od asinkronih motora [14], [17], [23], [24], [32].

3.5. LEŽAJEVI

Ležajevi su jedna od bitnijih komponenti FESS-a jer podržavaju cijeli rotorski sustav i smanjuju gubitke zbog trenja prilikom rotacije zamašnjaka. Ključne su komponente u zamašnjačkim sustavima, posebno za postizanje visoke učinkovitosti skladištenja energije i osiguravanja dugovječnosti sustava. U zamašnjačkim sustavima, ležajevi moraju ograničiti pet od šest stupnjeva slobode, ostavljajući samo rotaciju kao nereguliranu os. Ležajevi moraju biti sposobni izdržati velike brzine rotacije i opterećenja koja proizlaze iz toga, uz minimalno trenje i trošenje. Ključni čimbenici u dizajnu ovih ležajeva uključuju njihovu sposobnost podnošenja velikih brzina, nošenja velikih opterećenja i otpornosti na trošenje i zagrijavanja. Osim toga, napredak u tehnologiji ležajeva ima za cilj povećati izdržljivost, smanjiti potrebe za održavanjem i poboljšati ukupne performanse sustava, čime se pridonosi kontinuiranom razvoju i usvajanju novih tehnologija zamašnjaka kao skladišta za pohranu energije. Ovisno o vrsti građe ležaja, dijele se na mehaničke i magnetske, a mogu se i kombinirati međusobno kako bi se uzele prednosti i jednog i drugog sustava [14].

3.5.1. Mehanički ležajevi

Mehanički ležajevi najstarija su vrsta ležajeva. Koriste se za primjene kod zamašnjaka sa malom brzinom vrtnje i velikim kapacitetom pohrane energije. Iako su inicijalno ekonomičniji, lakši za ugraditi i nude robusnu potporu rotoru, imaju i svoje nedostatke: visoko trenje i gubici, zahtjevi za podmazivanjem ležajeva, često održavanje i kraći životni vijek čine ih inferiornijim od ostalih vrsta ležajeva. Mehanički ležajevi najčešće se uparuju sa magnetskim ležajevima, gdje služe kao pomoćni sustav u slučaju otkaza magnetskih.

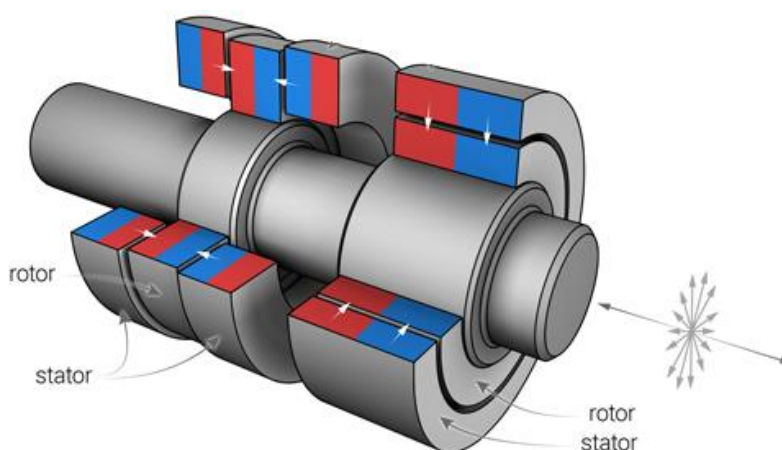
Mehanički ležajevi dijele se na: klizne ležajeve, rotirajuće ležajeve, keramičke ležajeve, itd [14], [17].

3.5.2. Magnetski ležajevi

Magnetski ležajevi pružaju mnoge prednosti nad mehaničkim kod FESS-a. Karakterizira ih dugotrajnost, velika nosivost, vrlo mali gubici sa vrlo malim potrebama za ulaznom energijom, odsutnost potrebe za podmazivanjem zbog levitacije (nema kontakta) i mogućnost korištenja pri velikim brzinama vrtnje rotora (brzina je ograničena samo izdržljivošću materijala od kojeg je izrađen rotor). Nažalost, materijali koji se koriste za izradu takvih sustava su kompleksni i skupi, te se najčešće uparuju sa mehaničkim ležajevima koji služe kao pomoćni ležajevi u slučaju otkaza prvih. Ovisno o tipu magneta koji se koristi dijele se na: pasivne magnete ili PMB (eng. *Permanent Magnetic Bearings*) koji su izrađeni od permanentnih magneta, aktivne magnetske ležajeve ili AMB (eng. *Active Magnetic Bearings*) koji su izrađeni od zavojnica kojima se upravlja dovođenjem napajanja sa elektroničkih upravljačkih sustava i razne kombinacije jednih i drugih. Magnetski ležajevi se isto mogu dijeliti na: magnetske ležajeve s odbijajućim svojstvom i magnetske ležajeve sa svojstvom privlačenja [14], [17].

3.5.2.1. Ležajevi sa pasivnim magnetima

Princip rada svodi se na fizikalnoj odbojnoj ili privlačnoj karakteristici magneta. Sljedeća slika prikazuje pasivni magnetski ležaj:



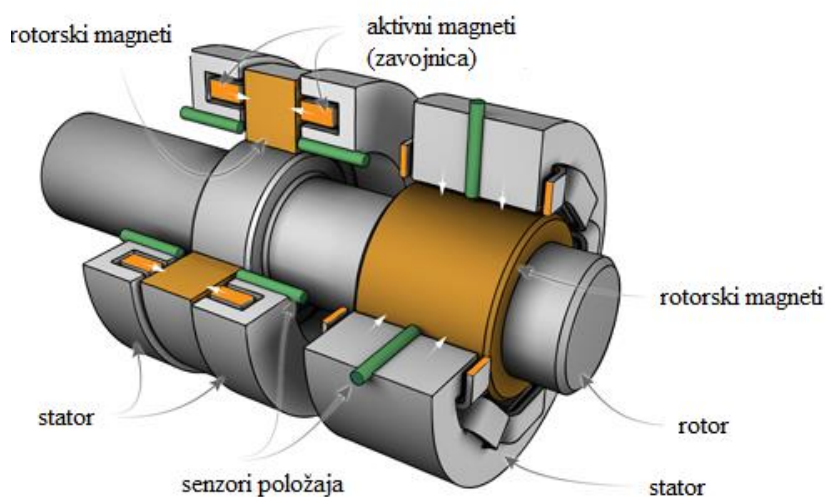
Slika 15 - Ležaj sa pasivnim magnetima

Izvor: B. Toulas, 'Magnetic Bearings - The mechanical engineer's guide - EngineeringClicks'. Accessed: Mar. 28, 2024. [Online]. Available: <https://www.engineeringclicks.com/magnetic-bearing/>

PMB ležajevi sastoje se od dva prstenasta magneta u koaksijalnom smjeru. Promjenom udaljenosti između ta dva magneta, mijenja se i sila između njih [17].

PMB-ove karakteriziraju mali otpor i mali gubici (nemaju potrebu vanjskog napajanja). PMB-ovi se koriste u kombinaciji sa drugim ležajevima (npr. mehaničkim) jer su nestabilni (postizanje apsolutne stabilnosti elektrostatičkog polja je nemoguće) i ne mogu osiguravati ravnomjerno kretanje rotora u svim smjerovima. To znači da su u nemogućnosti samostalno održati magnetsku levitaciju rotora. To proizlazi iz Earnshaw-ovog zakona, koji kaže da tijelo pod nabojem ne može održati ravnotežu samo sa interakcijom elektrostatičkih polja naboja, odnosno permanentni magneti nisu u mogućnosti ostvariti međusobnu stabilnu levitaciju. Sukladno Brownback-ovom zakonu, stabilna levitacija unutar magnetskog polja moguća je ako je magnetska permeabilnost materijala manja od magnetske permeabilnosti okruženja. To znači da materijali od diamagnetskih i supervodljivih materijala (opisanih kasnije) mogu uspostaviti stabilnu levitaciju unutar magnetskog polja, a feromagnetski materijali samo u okruženjima sa većom magnetskom permeabilnosti kao feromagnetske tekućine. Ležajevi sa permanentnim magnetima se zato koriste uz druge vrste ležajeva, a isto tako moraju biti duplirani, gdje svaki set magneta podupire jedan kut slobode rotora (radijalni, aksijalni i nagib) [14], [33], [34].

3.5.2.2. Ležajevi s aktivnim magnetima

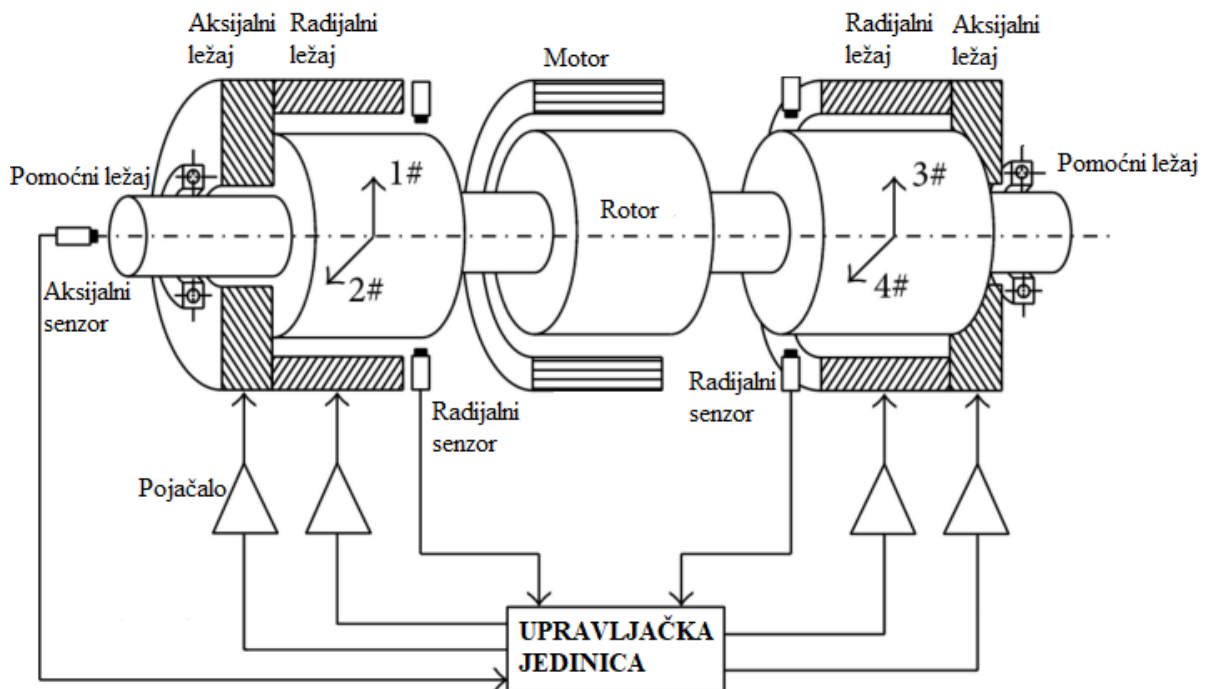


Slika 16 - Ležajevi s aktivnim magnetima

Izvor: B. Toulas, 'Magnetic Bearings - The mechanical engineer's guide - EngineeringClicks'. Accessed: Mar. 28, 2024. [Online]. Available: <https://www.engineeringclicks.com/magnetic-bearing/>

Prethodna slika prikazuje AMB sustav ležajeva. Princip rada svodi se na protjecanju struje kroz zavojnicu koja stvara magnetski tok. Ovakav sustav drži rotor na fiksnoj poziciji kontroliranim elektromagnetima od strane sustava upravljanja. Ovisno o poziciji rotora, sustav upravljanja (upravljač sa povratnom vezom) daje struju zadanim parovima elektromagneta. Ovakva izvedba ležaja mora sadržavati senzore položaja koji, preko povratne veze, šalju točnu poziciju rotora (aksijalnu i radijalnu) upravljačkim sustavima, a zatim oni upravljaju strujom unutar elektromagneta kako bi rotor održali u središnjoj nominalnoj poziciji. Senzori razmaka i rotacije mjere udaljenost rotora i šalju signale upravljačkom sustavu koji smanjuje ili povećava dovod električne energije elektromagnetu, olakšavajući korektivne akcije u slučaju odstupanja rotora od nominalne pozicije [14], [33]. AMB tip ležaja daje stabilan ovjes sa smanjenom bukom, mogućnost kvalitetnog upravljanja, robusnost i dugi vijek trajanja, ali ga karakterizira gubitak snage u pojačalima, kompleksan dizajn (sustav upravljanja) i visoka cijena. Da bi se AMB učinili ekonomičnijim, integriraju se sa pomoćnim mehaničkim ležajevima koji čine sustav praktičnim, stabilnim i ekonomičnim [17].

Na sljedećoj slici prikazan je sustav upravljanja sa aktivnim magnetima.



Slika 17 - Upravljanje AMB ležajevima

Izvor: Prilagodio student iz A. G. Olabi, T. Wilberforce, M. A. Abdelkareem, and M. Ramadan, 'Critical review of flywheel energy storage system', *Energies*, vol. 14, no. 8. MDPI AG, Apr. 02, 2021.

3.5.2.3. Ležajevi sa supervodljivim magnetima

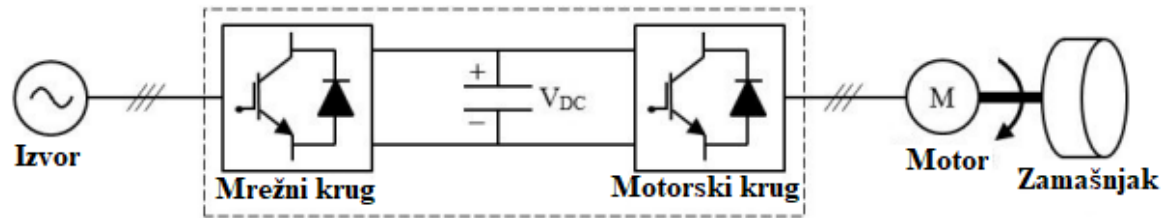
Supervodljivi magnetski ležajevi, iako još uvijek u fazi istraživanja, korisni su kod zamašnjaka sa velikim brzinama vrtnje. SMB rade pri vrlo niskim temperaturama koji se mogu postići kriogenim sustavima hlađenja kako bi se izbjegao kvar ležaja i postiglo svojstvo supervodljivosti (magnetska polja induciraju struje u supervodljivim zavojnicama koje odbijaju permanentne magnete na rotoru). Takve ležajeve karakterizira dugotrajnost, kompaktna veličina i vrlo malo, zanemarivo trenje. Nedostatak su veliki gabariti sustava hlađenja što povećava trošak instalacije. SMB se najčešće uparuju sa PMB, kako bi se smanjili zahtjevi za hlađenjem i povećala ekonomičnost [17], [32].

3.5.3. Kombinacija ležajeva

Sustavi pohrane energije zamašnjakom koriste sljedeće kombinacije ležajeva: PMB sa pomoćnim mehaničkim ležajevima, AMB sa pomoćnim mehaničkim ležajevima, AMB sa PMB ležajevima, gdje AMB drži radijalni razmak između rotora a PMB drži aksijalni razmak između rotora [14]. U radovima [35], [36] spominju se i kombinacije SMB i PMB. Provedeni pokusi, opisani u radovima, mjere radijalne i aksijalne sile za to hibridno rješenje. SMB, koji rade na principu supervodljivosti sa zahtijevanim hlađenjem (hlađenjem na niske temperature pomoću npr. tekućeg dušika), pruža radijalnu i aksijalnu stabilnost zamašnjaka, i neophodan je za nestabilan PMB. PMB je ukomponiran u sustav jer, osiguravajući dodatnu podršku SMB ležajevima, smanjuje ovisnost o hlađenju i povećava stabilnost sustava.

3.6. ENERGETSKA ELEKTRONIKA

Cilj energetske pretvaračke sklopove je napajanje motora zamašnjaka i dvosmjerno pretvaranje i reguliranje električne energije ovisno o režimu rada (punjenje ili pražnjenje zamašnjaka), pritom olakšavajući regulaciju napona i frekvencije [16]. Prilikom pražnjenja zamašnjaka, dolazi do usporavanja vrtnje rotora, te posljedično propada napona i frekvencije generatora – izlazni napon i frekvencija doživljavaju fluktuacije u iznosu. Primarna svrha energetske elektronike je povezivanje mreže fiksne frekvencije sa zamašnjakom promjenjive brzine, kao i pretvaranje istosmjerne struje u izmjeničnu i obrnuto, reguliranje protoka energije i pružanje pravilnog valnog oblika napona i struje. Od energetske se pretvarača očekuje da imaju mogućnost transformiranja izlaznog promjenjivog napona i frekvencije u konstantnu izlaznu električnu energiju, fiksnog napona i frekvencije [14], [32]. Sljedeća slika prikazuje blok shemu energetske pretvarača:



Slika 18 - Blok shema energetskog pretvarača

Izvor: Prilagodio student iz M. A. Awadallah and B. Venkatesh, 'Energy storage in flywheels: An overview', Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 38, no. 2, pp. 183–193, Mar. 2015.

Dvosmjerne energetske pretvarače karakterizira brz odziv i učinkovita pohrana električne energije unutar širokog raspona brzine vrtnje zamašnjaka, kvalitetna regulacija napona i frekvencije pomoću upravljačkih sustava i pripadnih algoritama u širokom rasponu brzine vrtnje zamašnjaka, učinkovit rad tih pretvarača ovisno o punjenju i pražnjenju zamašnjaka i, na posljetku, sposobnost održavanja kvalitete električne energije (gdje će energetske pretvarači u što manjem iznosu utjecati na totalno harmoničko izobličenje mreže – THD (eng. *Total Harmonic Distortion*)) [14].

3.6.1. Energetski pretvarači

Energetski pretvarači zamašnjaka mogu biti izvedeni u više topologija. U slučaju istosmjerne mreže, postoje DC-AC i DC-DC-AC topologije. Ako je mreža izmjenična, najčešće imamo AC-AC i AC-DC-AC topologije. Najidealnije rješenje odabrati će se ovisno o potrebi korisnika. AC-DC-AC konfiguracija, najčešća izvedba kod izmjenične mreže, nazvana još i BTB konfiguracija (eng. *Back to Back*), sadrži mrežni krug, motorski krug i istosmjerni međukrug. Prilikom punjenja zamašnjaka, mrežni krug radi kao ispravljač (ispravlja mrežni trofazni napon u istosmjerni napon međukruga), a motoski krug kao izmjenjivač (pretvara istosmjernu struju međukruga u izmjeničnu struju). Prilikom pražnjenja, uloga mrežnog i motorskog kruga se mjenja [19]. BTB pretvarači koriste širinsko-impulsnu modulaciju ili PWM (eng. *Pulse Width Modulation*), za upravljanje energetskim sklopkama [17]. U BTB konfiguraciji, više zamašnjaka može biti povezano na mrežu preko zajedničkog istosmjernog međukruga, što omogućuje finu regulaciju frekvencije, napona i povećanje kapaciteta pohrane energije.

Kako bi se dodatno povećala kvaliteta energije, korištenjem višerazinskih izmjenjivača može se postići veća učinkovitost, niže du/dt vrijednosti i niži THD. BTB

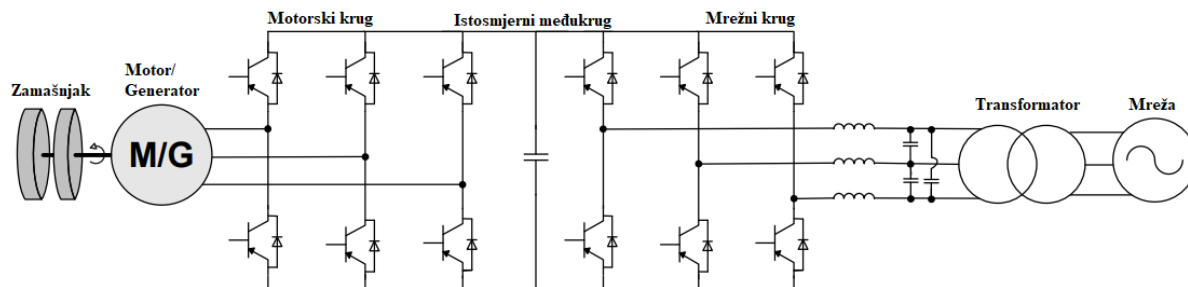
višerazinski pretvarači, kao npr. NPC (eng. *Neutral Point Clamped*), imaju prednost u usporedbi sa klasičnim zbog veće učinkovitosti, potrebe za manjim filtrima, niže vrijednosti harmoničkih komponenti i niže naponske nivoe koje sklopke moraju sklapati. Problem je veliki broj sklopki, što povećava cijenu ovakvog sustava [17].

Drugi tip topologije energetskih pretvarača je AC-AC topologija. AC-AC pretvarači uzimaju energiju iz izmjenične mreže i, promjenom amplitude i faze, napajaju izmjenično trošilo. Matrični pretvarači čine jedan dio ove topologije, a dijele se na direktne matrične pretvarače ili DMC (eng. *Direct Matrix Converter*) i indirektne matrične pretvarače ili IMC (eng. *Indirect Matrix Converter*). Ovakav tip pretvarača je mrežno komutiran i, za razliku od BTB konfiguracije, ne sadrži istosmjerni međukrug (kondenzatore). Glavna značajka matričnih pretvarača je jednostavna struktura sa mogućnošću rada sa bilo kojom vrstom opterećenja. Sastoji se od $m \times n$ dvosmjernih energetskih sklopki koji se spajaju na m -fazni izvor i n fazno opterećenje. U kontekstu trofaznog FESS sustava, to je 9 energetskih sklopki dvosmjernog tipa, koji povezuju mrežu sa motorom. Jednostavnost pretvarača omogućuje manje gabarite, ali veći THD i kompleksnije upravljanje [17], [37].

Energetski pretvarači temelje se na energetskim sklopkama. U ranijim fazama, koristile su se poluvodičke sklopke kao npr. SCR i GTO tiristori (eng. *Silicon Controlled Rectifier, Gate Turn-Off*). SCR su bili najjeftiniji izbor za napone do 5kV i struje do 3kA, sa frekvencijom prekidanja do 500Hz. Sa rastom potrebe za vanjskim upravljanjem, počeli su se koristiti GTO tiristorske sklopke. GTO mogu raditi sa naponima do 6kV, strujama do 2kA i frekvencijama preko do 1kHz [15]. IGBT (eng. *Integrated Gate Bipolar Transistor*) je najsuremenija i najčešća komponenta za energetske prekidačke sklopove zamašnjaka, zbog mogućnosti preklapanja velike snage vrlo visokim frekvencijama (6.7kV, 1.2kA). Metoda upravljanja takvim sklopkama je najčešće širinsko-impulsna modulacija (PWM) [14]. Osim IGBT sklopke, ovisno o primjeni, koriste se i MOSFET tranzistori (eng. *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*), BJT (eng. *Bipolar Junction Transistor*) i tiristori (GTO, SRC, MCT) [16].

Topologije uključuju BTB konfiguracija, BTB konfiguracija s integriranim boost converterom i DC istosmjernim krugom (b), Z-source pretvarači, DMC, IMC, višerazinskim pretvaračem sa diodnim zatezanjem (NPC – neutral point clamped), miješanjem DC-DC pretvarača sa NPC (d), BTB topologija kombinirana sa NPC (e), itd..

Na sljedećoj slici prikazan je, najčešće korišten, BTB pretvarač energije:



Slika 19 - BTB energetska pretvarač

Izvor: Prilagodio student iz Kramer, W. & Chakraborty, Sudipta & Kroposki, Benjamin & Thomas, H. Advanced Power Electronic Interfaces for Distributed Energy Systems Part 1: Systems and Topologies, (2008).

3.6.2. Algoritmi upravljanja

Učinkovitost algoritma upravljanja energetskih pretvarača u FESS sustavima ključna je za poboljšanje kvalitete električne energije. Iako se različiti algoritmi upravljanja za pretvarače frekvencije – VFD (eng. *Variable Frequency Drive*) mogu primijeniti u kontekstu FESS sustava, odabir najboljeg rješenja ovisit će o rješavanju izazova održavanja željenog napona i frekvencije tokom pražnjenja zamašnjaka, pritom osiguravajući kvalitetu izlazne energije (regulacija nelinearnosti, smanjenje smetnji i povećanje pouzdanosti isporuke ee). Zbog velikih brzina vrtnje rotora, upotreba senzora za dobivanje položaja i brzine vrtnje rotora je poželjna. Dodatno, potrebno je glatko upravljanje prijelazom između režima rada, kako bi se izbjegle neželjene prijelazne pojave. Uobičajeni algoritmi upravljanja su: skalarno U/f upravljanje, vektorsko upravljanje ili FOC (eng. *Field Orientated Control*), direktno upravljanje zakretnim momentom ili DTC (eng. *Direct Torque Control*), modelsko prediktivno upravljanje ili MPC (eng. *Model Predictive Control*), inteligentno upravljanje, itd... FOC upravljanje sa pretvaračima BTB i asinkronim ili sinkronim motorima, najčešće je korišten algoritam upravljanja kod FESS sustava [17].

Asinkroni strojevi, uključujući DFIM, istaknuti su izbor motora za FESS sustave, s algoritmima upravljanja kao što su klasično skalarno U/f upravljanje do sofisticiranog direktnog upravljanja zakretnim momentom (DTC) i vektorskog upravljanja (FOC). Strojevi sa permanentnim magnetima (PMSM) i istosmjerni motori (BLdc), koriste napredne tehnike upravljanja poput upravljanja strujom prostorno-vektorskom modulacijom i bez senzorsko vektorsko upravljanje. Reluktantni motori (RM), uključujući sinkrone i prekidačko-reluktantne motore, koriste algoritme upravljanja poput FOC, upravljanje povratnim vezama

(eng. *FeedForward control*), i PI (eng. *Proportional-Integral*) kompenzatore sa povratnom vezom [24]. Neke metode opisane su u nastavku:

FOC ili vektorsko upravljanje, matematički je model upravljanja sa VFD, i spada pod regulirane elektromotorne pogone u zatvorenoj petlji, a koristi se za upravljanje sinkronim i asinkronim motorima. FOC metoda svodi se na matematičko razlaganje trenutnih vrijednosti vektora struje statora (I_a , I_b , I_c), predstavljenih u stacionarnoj referentnoj točki, na dvije komponente: direktnu komponentu struje statora I_d (stvara moment), i kvadraturnu komponentu struje statora I_q (stvara magnetsko polje). Te dvije komponente predstavljene su u rotirajućem dq koordinatnom sustavu orijentiranom na tok rotora. Te dvije komponente, ortogonalne veličine, analogne su aktivnoj i jalovoj snazi unutar motora. Vektorsko upravljanje odnosi se na mjerenje i pretvorbu statorskih struja u direktnu struju i kvadraturnu struju (čija vrijednost bi trebala biti što manja, ostavljajući samo direktnu struju koja proizvodi moment). Bitno je dobiti još i položaj/kut rotora pomoću senzora položaja, kako bi upravljački sustav mogao uskladiti vektore struje momenta sa vektorom magnetskog toka rotora, a to omogućuje odvojeno upravljanje momentom i magnetskim tokom (kvadraturna struja bi poželjno trebala težiti ka nuli). Ova transformacija je još nazvana Parkova i Clarkova transformacija [38], [39], [40].

DTC algoritmom upravljanja, još jednim matematičkim modelom, upravlja se momentom i mag. tokom bez potrebe za transformacijom u rotirajući referentni okvir. Mjeri se trenutna vrijednost momenta i magnetskog toka te se uspoređuje sa referentnom (željenom) veličinom, a sustavom upravljanja kontroliraju se vektori napona za upravljanje tim parametrima. Robustan je način upravljanja koji zahtijeva niske računalne resurse. U kontekstu asinkronih motora korištenih kod vjetroelektrane, u radu [39] pokazao se kao bolja metoda, zbog jednostavnosti upravljanja, veće efikasnosti i dinamike.

Kod skalarne U/f kontrole, nema upravljanja niti momentom niti magnetskim tokom, nego se mijenjaju amplitude napona i frekvencije (nema upravljanja magnetske sprege). To omogućuje vrlo jednostavnu realizaciju, ali uz dosta slabije mogućnosti kvalitetnog upravljanja za razliku od FOC i DTC metode. Osnovni princip upravljanja svodi se na jednadžbi $\varphi_s = u/\omega$. To znači da je magnetski tok statora φ_s jednak omjeru primijenjenog napona na stator u i kutne brzine rotora ω (frekvencija). Promjenom frekvencije, potrebno je mijenjati i napon na statoru, kako bi se održao konstantni magnetski tok. Ovakav način upravljanja ima poteškoća u regulaciji U/f pri malim brzinama vrtnje, veliku valovitost i

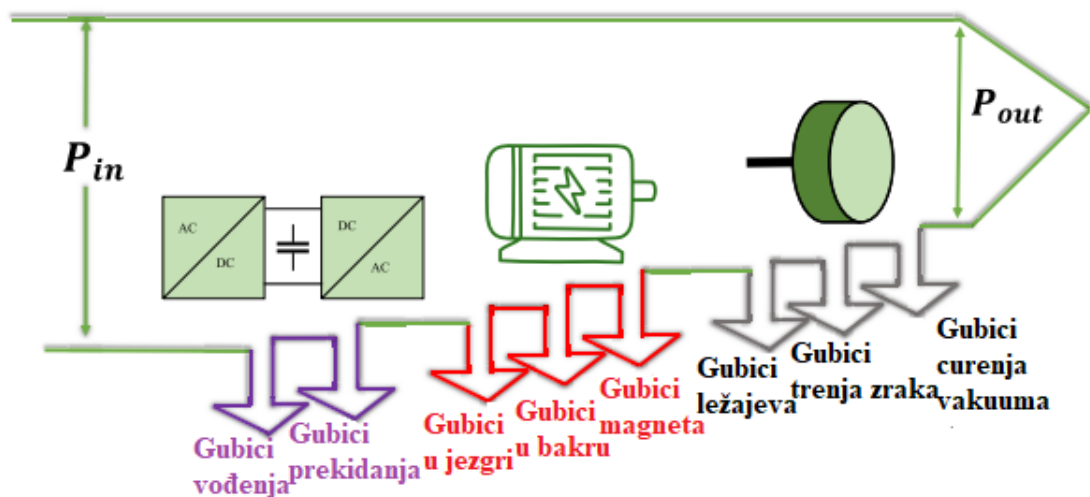
promjenjivo ponašanje [41]. Ovisno o primjeni FESS-a, ekonomskoj isplativosti i vrsti FESS motora, prilagodit će se i najoptimalnija metoda upravljanja.

3.7. GUBICI I SIGURNOST FESS SUSTAVA

Sljedeća poglavlja opisuju najčešće gubitke i kvarove FESS sustava, te neke od zahtjeva za dizajnom kako bi se isti spriječili, ili smanjili. Gubici i kvarovi najčešće su vezani uz rotirajuće dijelove zamašnjaka, kao što su motor, rotor i ležajevi. Kućište je prva crta obrane protiv kvarova, te je montaža rotirajućih dijelova unutar istog ključna za osiguravanje rada i sigurnosti.

3.7.1. Gubici FESS-a

Gubici u zamašnjačkim sustavima utječu na ukupnu učinkovitost sustava, brzinu samostalnog pražnjenja sustava i vremenskog trajanja čuvanja energije. Kako bi se smanjili gubici, ključno je koristiti dijelove sustava koji su efikasni u pretvorbi energije. Gubici, prikazani na sljedećoj slici su: električni (bakar, magneti, vrtložne struje i histereza), mehanički (trenje ležajeva i zraka) i gubici energetskih pretvarača (prekidanje i vođenje struje) [16], [17]. Na sljedećoj slici prikazani su svi glavni gubici FESS sustava:



Slika 20 - Gubici u FESS sustavu

Izvor: Prilagodio student iz R. Takarli et al., 'A Comprehensive Review on Flywheel Energy Storage Systems: Survey on Electrical Machines, Power Electronics Converters, and Control Systems', IEEE Access, vol. 11. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 81224–81255, 2023.

Električni gubici vezani su uz električni stroj. Kod strojeva sa permanentnim magnetima, napravljenih od rijetkih materijala, moguća je izrada statora bez željezne jezgre, odnosno namotaji sa zračnim rasporedom. Time se smanjuju gubici zbog histereze zbog odsutnosti statorske feromagnetske jezgre, ali uzrokuje nisku permeabilnost materijala (zrak), pa se jakost magnetskog polja smanjuje u većoj mjeri sa odmakom od magneta (manja snaga). Vrtložne struje magneta stvaraju se u magnetima zbog interakcije statorskog magnetskog polja sa magnetom. Vrtložne struje stvaraju gubitke unutar magneta jer rasipaju energiju na unutarnjem otporu magneta u obliku topline (smanjuje se životni vijek magneta zbog gubitka magnetskog svojstva), a to utječe na gubitak ukupne snage koju motor može predati na zamašnjak. Gubici u bakru (I^2R) mogu se izbjeći ili povećanjem vodljivog materijala unutar statorske jezgre (uvećava gabarite sustava i smanjuje ekonomičnost), što smanjuje ukupan otpor statorskih namotaja, ili smanjenjem struje statora (potreban viši napon za održavanje iste snage motora) [15].

Mehanički gubici, glavni gubici zamašnjačkih sustava, vezani su uz trenje unutar sustava. Gubici trenja mogu nastati najčešće zbog ležajeva ili zbog prisutnosti zraka (odsutnost potpunog vakuuma, curenje vakuuma, itd...). Gubici zbog trenja kod mehaničkih ležaja općenito se određuju procjenom naprezanja klizanja i smicanja unutar međusobno povezanih površina ležaja. Gubici trenja zbog ležajeva mogu se lako eliminirati korištenjem magnetskih ležajeva [42]. U radu [24], predlaže se zamjena tradicionalnih mehaničkih ležajeva sa magnetskim ležajevima (SMB i PMB), koji nude poboljšan ovjes rotoru i smanjeno trenje. Sustavi hlađenja koji koriste tekući dušik ili kriogeno hlađenje koriste se za održavanje performansi supervodljivih materijala, bitnih elemenata unutar ležajeva. Nadalje, aktivni magnetski ležajevi (AMB) koriste se za ovjes u FESS sa velikim brzinama vrtnje, koristeći električno upravljane zavojnice i povratne veze za smanjenje gubitaka i održavanje stabilnosti. U tekstu se ističe značaj parametara sustava, kao što su brzina rotora i masa AMB, utjecaj na gubitke i vrijeme samopražnjenja.

Gubitak aerodinamičkog otpora nastaje zbog trenja između rotora zamašnjaka i okolnog medija. Gubitak će biti značajan ako zamašnjak radi s atmosferskim tlakom. Smanjenje tih gubitaka postiže se montiranje rotora unutar vakuumske kućišta. Sa povećanjem vakuuma unutar kućišta, biti će teže i održati taj isti vakuum od curenja iz kućišta. Vakuumske kućište smanjuju električnu izolaciju okolnog zraka, a isto tako se odvodnja topline, kao prethodno objašnjeno, odvija samo zračenjem [42].

Što se tiče energetskih pretvarača, razlikujemo dvije vrste gubitaka: gubici vođenja i gubici prekidanja. Gubici prekidanja javljaju se kada energetska sklopka prelazi iz stanja vođenja u stanje ne vođenja, i obrnuto. Energija koja se gubi u svako prijelazu između ta dva stanja jednaka je umnošku napona i struje koju ta sklopka prekida u određenom trenutku (zbog ne mogućnosti sklopke da trenutačno prekine te dvije veličine). Ako se energija pomnoži sa frekvencijom prekidanja, dobiju se gubici prekidanja. Gubici vođenja nastaju kada je sklopka u stanju vođenja, što je jednako umnošku pada napona na njezinim stezaljkama i struji koja kroz nju protječe [43].

3.7.2. Kvarovi FESS-a

Održavanje zamašnjaka jeftinije je od održavanja ostalih sustava za pohranu energije. Primjer je baterijski sustav, koji je za čak polovicu troška održavanja zamašnjačkih sustava skuplji. Jedino neophodno održavanje kod zamašnjaka je godišnji preventivni pregled sustava, a svakih pet do deset godina i zamjena ležaja (u slučaju da zamašnjak ima mehaničke ležajeve). Magnetski ležajevi ne zahtijevaju održavanje s obzirom na levitaciju rotora bez fizičkog kontakta. Također, zamašnjaci ne sadrže nikakve kemikalije za razliku od baterijskih sustava, pa je prilikom kraja radnog vijeka zamašnjaka, nisu potrebne rigorozne mjere recikliranja kao kod baterijskih sustava [21], [44].

Kvarovi zamašnjaka mogu nastati zbog različitih faktora. Neki od tih faktora su: naprezanje pri centrifugalnim silama, defekti materijala i vanjski utjecaji. Kao što je navedeno u prethodnim poglavljima, najopasniji kvarovi FESS sustava tiču se rotora. Rotori izgrađeni od čeličnog materijala obično propadaju zbog zamora materijala prilikom velikih centrifugalnih sila i posljedičnog nastanka pukotina. Te pukotine dovode do loma rotora. Kompozitni materijali od ugljičnih vlakana raspadaju se u obliku eksplozije malih krhotina, suprotno od čelika, koji se raspadaju u više velikih komada. Prilikom raspada bilo kakve vrste rotora, segmenti istog dolaze u kontakt sa kućištem te rotiraju velikim brzinama u aksijalnom i radijalnom smjeru. Sile koje nose ti fragmenti mogu uništiti kućište ili probiti poklopac kućišta, što za posljedicu može prouzročiti ispuštanje dovoljne energije za uništavanje betonskih zidova ili stropa. Uzimajući u obzir visoke brzine i način raspadanja materijala, kako bi se spriječili takvi kvarovi, a isto tako i zaštitilo osoblje koje rukuje sustavom, zamašnjaci se ukopavaju u podzemne bunkere kako bi okolno tlo zadržalo energiju koju bi potencijalni kvar mogao osloboditi. Isto tako, kućište mora biti dizajnirano tako da ne može doći do prodora, proboja ili ispuštanja/ulaska plina i zraka, što bi rezultiralo

eksplozijom. Rotor mora biti izgrađen sukladno sigurnosnim standardima, tako da vjerojatnost bilo kakvog potencijalnog kvara se dovede na što manju mjeru [25], [45]. Jedan primjer nesreće desio se 2011-te godine, gdje su 2 od 700 zamašnjaka tvrtke Beacon Power doživjeli kvar rotora. Sustav koji je detektirao abnormalne vrijednosti u radu, koji su nastali zbog raspadajućeg rotora, aktivirao je dovod vodenog hlađenja, koji je izazvao eksploziju zbog stvaranja pare velikih temperatura. Srećom, energija eksplozije uspjela se zadržati unutar zaštitnog kućišta i barijere okolnog tla [46].

Što se tiče električnih kvarova, u radu [47], ističu se neke činjenice što se tiče FESS sustava kod uravnoteženih i neuravnoteženih sustava. Rezultati pokazuju da struja kratkog spoja, najznačajniji električni kvar, može uzrokovati smetnje u radu FESS sustava i smetnje na mrežu, pa je zaštita od ovakvog kvara ključna. Zamašnjak, zbog svoje velike inercije rotora, može ublažiti kvarove kratkog spoja kratkog trajanja zbog svog visokog momenta inercije, pa sukladno tome, proporcionalno momentu inercije zamašnjaka i trajanju kvara, raste i trajanje smetnje koje doživljava mreža.

3.7.3. Testiranje FESS-a i standardi

U današnjici postoje različiti testovi i standardi u kontekstu zamašnjaka, koji omogućuju dizajnerima projektiranje sigurnog sustava. Softveri za promatranje dinamike rotora omogućuju projektantima simulaciju ponašanja rotora pri različitim kvarovima. Simulacija kvarova omogućuje analizu širenja fragmenata kod raspada zamašnjaka. Isto tako postoje i testovi prodora fragmenata koji omogućuju bolji dizajn kućišta radi sprječavanja takvih situacija. Iako simuliranje ponašanja sustava može pomoći u anticipiranju takvih katastrofalnih stanja, potrebno je provesti i stvarna testiranja pri većim brzinama vrtnje od maksimalno dozvoljene kako bi se dokazale provedene simulacije. Ispitivanje kućišta nakon nastanka kvara i deformacije komponenti pomažu u određivanju sigurnosne granice. Neki fenomeni poput raspada rotora ne mogu se predvidjeti. Ispitivanja bez razaranja mogu otkriti neke ranije nedostatke u određenoj mjeri, a otkrivanje istih se smanjuje sa debljinom i gustoćom materijala pod ispitivanjem [45].

Što se tiče standarda, ne postoje konkretni standardi za zamašnjake. Neki općeniti standard koji se uzima u obzir za FESS sustave je europski standard: „Safety of Machinery Standard, EN 60204“. Studije i sigurnosne procjene rizika i testovi potrebni su za puštanje sustava u pogon [45].

4. PRIMJENE SUSTAVA POHRANE ENERGIJE ZAMAŠNJAKOM

FESS sustav pogodan je za različite primjene, od manjih kućanstva do velikih elektroenergetskih mreža. Tipične primjene sustava pohrane energije zamašnjakom obuhvaćaju: integraciju u elektroenergetsku mrežu, radi poboljšanja kvalitete napajanja (regulacija napona i frekvencije mreže), kao sustavi besprekidnog napajanja (eng. *Uninterruptible Power Supply* ili UPS), regeneracija energije u automobilima i lokomotivama i postizanja visokih kapaciteta pohrane energije, radi fleksibilnije konfiguracije mreže [48]. U sljedećim potpoglavljima opisane su neke od implementacija sustava pohrane energije zamašnjakom.

4.1. BRODSKI ELEKTROENERGETSKI SUSTAV

Brodaska elektroenergetska mreža razlikuje se od kopnene mreže zbog strožih zahtjeva u kontekstu sigurnosti. Izvori električne energije u elektroenergetskom sustavu broda skloni su fluktuaciji u naponu i frekvenciji, što dovodi do nepouzdanosti sustava. Ne balans između generirane snage i potrošnje može dovesti do opterećenja mreže, odnosno propada napona i frekvencije (pogotovo kod pokretanja potrošača velike snage), što može dovesti do ispada elektroenergetskog sustava. Pomoću FESS-a, može se stabilizirati fluktuacija u naponu i frekvenciji mreže kod tranzijentnih pojava, zbog svoje sposobnosti apsorpiranja i predaje velikih količina električne energije unutar nekoliko sekundi. Isto tako, zbog brzog odziva, mogu se koristiti kao sustavi za pokrivanje vršnih opterećenja („peak shaving“), za stabilizaciju izlazne snage, kao sustav besprekidnog napajanja i ukomponirati sa ostalim skladištima energije u obliku hibridnih rješenja [16].

4.1.1. Poboljšanje i regulacija kvalitete električne energije

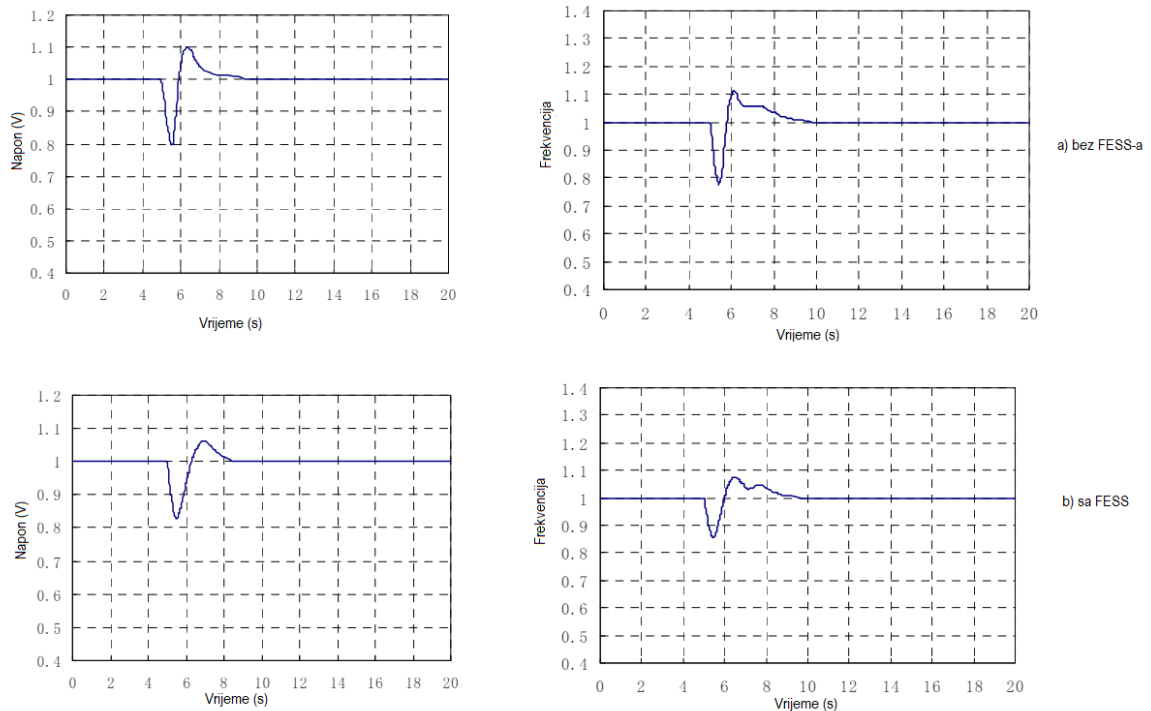
Brodaska elektroenergetska mreža stabilna je integracija izvora električne energije (generatori, baterijski sustavi, obnovljivi izvori energije, itd.), koji preko razvoda (rasklopne ploče, kabeli, razdjelnici snage, itd.) napajaju potrošače (sustav propulzije, motori, pumpe, rasvjeta, itd.). Koncept potpuno integriranog elektroenergetskog sustava i propulzije danas je svakodnevica, odnosno jedinstvena električna centrala koja stabilnom proizvodnjom električne energije napaja potrošače na brodu. Stabilan elektroenergetski sustav zahtijeva konstantan napon i frekvenciju mreže. Napon mreže mora se održati u granicama točnosti od $\pm 3\%$ u stacionarnom stanju, dok se frekvencija mora održati unutar $\pm 5\%$ nazivne vrijednosti u stacionarnom stanju, ili $\pm 10\%$ kod prijelaznih pojava unutar 5s [49], [50].

Frekvencija mreže održava se brzinom vrtnje generatora, dok se napon mreže održava automatskim regulatorom napona (eng. *Automatic Voltage Regulator* ili AVR). Ako se opterećenje mreže poveća, generator usporava zbog neravnoteže (mehanička energija dizel-motora, koji pogoni generator, manja je od potrebne električne snage), pa je dizel-motoru potrebno više goriva kako bi održao nominalnu brzinu vrtnje generatora. Svaka takva promjena udaljava dizel-motor od optimalnog opterećenja gdje je specifična potrošnja goriva najmanja. Analogno tome, ako se opterećenje smanji, frekvencija se povećava i generator ubrzava sve dok regulator brzine (eng. *speed governor*) ne smanji dovod goriva u motor. Nekontrolirani porast opterećenja generatora može uzrokovati njegovo preopterećenje. Minimalno potrebno vrijeme za sinkronizaciju sljedećeg generatora u mrežu je 1 minuta, a tokom tog vremena sustav treba održati u radnom stanju kako ne bi došlo do nestanka električne energije na brodu (eng. *blackout*). Brodski EE sustav razlikuje se od kopnenog zbog male rezerve energije, za ublažavanje velikih promjena zahtijeva potrošača. Isto tako, ovisno o fazi eksploatacije broda i radnih uvjeta u kojem se brod nalazi, kvaliteta energije mijenja se u širokom rasponu. Za rješavanje ovog problema, odnosno za pravilan rad mrežnih izvora pri promjenjivom opterećenju, korisno je imati dodatnu rezervu snage u obliku skladišta energije [48], [51], [52].

U radu [51], simuliran je elektroenergetski sustav broda s ugrađenim skladištem energije (FESS) unutar Matlab/Simulink modela, kako bi se utvrdio dinamički odziv snage, napona i frekvencije pri uključanju velikih potrošača kratkog trajanja (eng. *pulse load*). Takvi potrošači mogu izazvati razne nestabilnosti sustava: pad napona unutar mreže, isključenje ostalih potrošača sa mreže, pa čak i isključenje dijelova mreže. Takvi potrošači su vrlo zahtjevni prilikom integracije unutar sustava, zbog visokih tranzijentnih zahtjeva za snagom tokom njihovog rada. Stoga je ključno osigurati dodatnu rezervu snage upravo za takve potrošače.

U radu [53], isto tako, softverski je simuliran model brodskog elektroenergetskog sustava s integriranim FESS-om. Opisani su scenariji simulacije: prvi tokom razdoblja gdje je FESS isključen iz mreže i drugi, gdje je je FESS uključen u mrežu. Potrošač je modeliran u obliku paralelnog otpora velikog opterećenja (simulira otvoreni krug) i malog opterećenja (simulira potrošača kratkog trajanja, kratki spoj), a izbor između istih upravlja se sklopkom. Studija zaključuje da FESS sustavi ublažuju štetne učinke zbog rada potrošača velikih snaga na elektroenergetski sustav broda, djelujući kao međuspremnik energije (odnosno skladište energije).

U sljedećim grafovima iz [51], prikazan je odziv napona i frekvencije, pri uključenju potrošača velike snage u $t = 5s$, sa trajanjem simulacije 20s. U grafovima b), vidi se blaža magnituda oscilacije napona i frekvencije s integriranim FESS, u odnosu na grafove pod a), gdje je odsutan FESS.

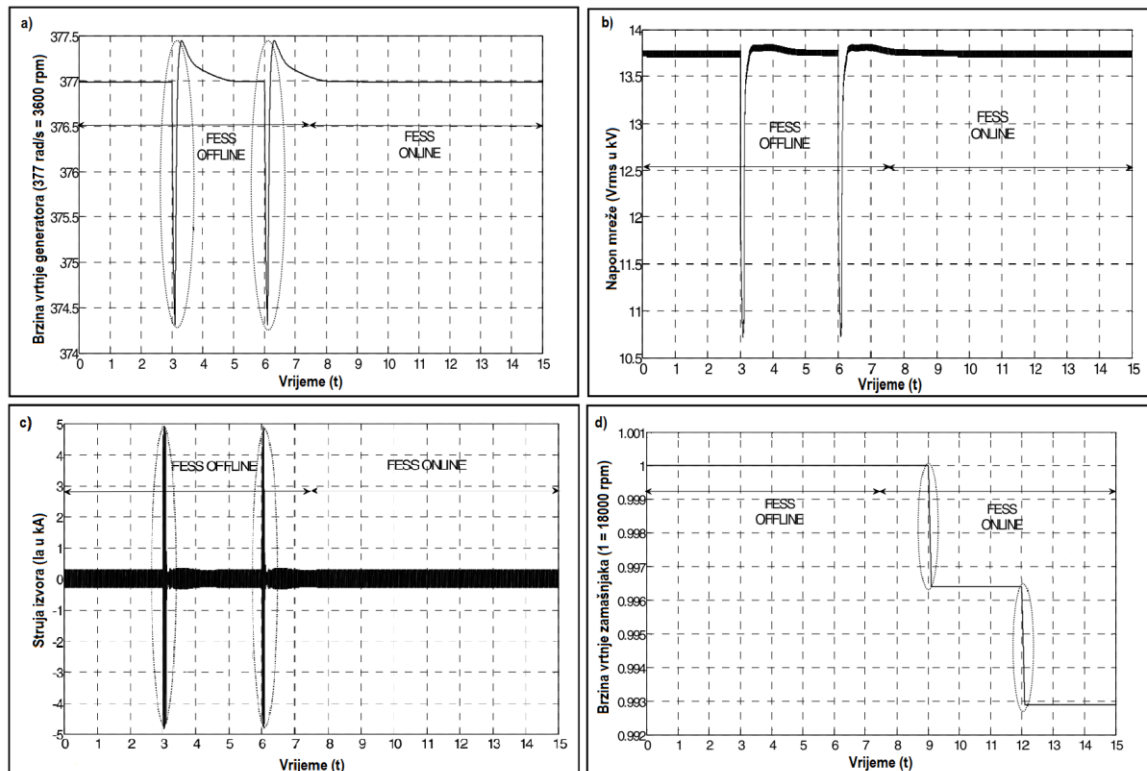


Slika 21 - Dinamički odziv napona i frekvencije pri uključenju potrošača velike snage

Izvor: Prilagodio student iz X. Chunling and Z. Conghui, 'Research on the Ship Electric Propulsion System Network Power Quality with Flywheel Energy Storage', *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Mar. 2010.

U sljedećim grafovima iz [53], isto tako, prikazan je odziv napona i frekvencije (brzine vrtnje glavnog izvora napajanja, u ovom slučaju dizel-generatora), promjena struje unutar mreže i promjena brzine vrtnje zamašnjaka. Simulacija traje 15s, gdje je polovicu vremena FESS isključen iz mreže (prikazano na slici engleskim izrazom *FESS OFFLINE* od $t = 0s$ do $t = 7.5s$), a ostalu polovicu FESS je dio mreže (prikazano na slici engleskim izrazom *FESS ONLINE* od $t = 7.5s$ do $t = 15s$). Potrošač se uključuje na mrežu u intervalima $t(s) = \{3, 6, 9, 12\}$. U prvom grafu a), prikazana je promjena brzine vrtnje generatora u različitim intervalima vremena. U vremenskim intervalima $t = 3s$ i $t = 6s$, što odgovara vremenu uključenja potrošača velike snage, može se primijetiti pad frekvencije vrtnje generatora, koji se kasnije stabilizira regulatorom brzine. Nakon $t = 7.5s$, u periodu kada je FESS uključen unutar mreže, može se uočiti da nema pada brzine vrtnje generatora, jer regulator brzine više

nije taj koji treba povećati dovod goriva za održavanje frekvencije generatora, nego FESS konverzijom energije iz kinetičke u električnu, daje potreban višak snage u mrežu. Pritom on usporava, što se može vidjeti na grafu d) (nakon $t = 7.5s$). U grafu c) vidi se porast struje unutar mreže, koja je potrebna od strane generatora za napajanje novonastale potrebe za snagom od strane potrošača, dok se u grafu b) vidi pad napona glavnih sabirnica koji nastaje zbog istog razloga. Od $t = 7.5s$, kao i kod ostalih prethodno navedenih grafova, tog pada nema, odnosno FESS nadopunjava trenutni manjak energije unutar mreže.

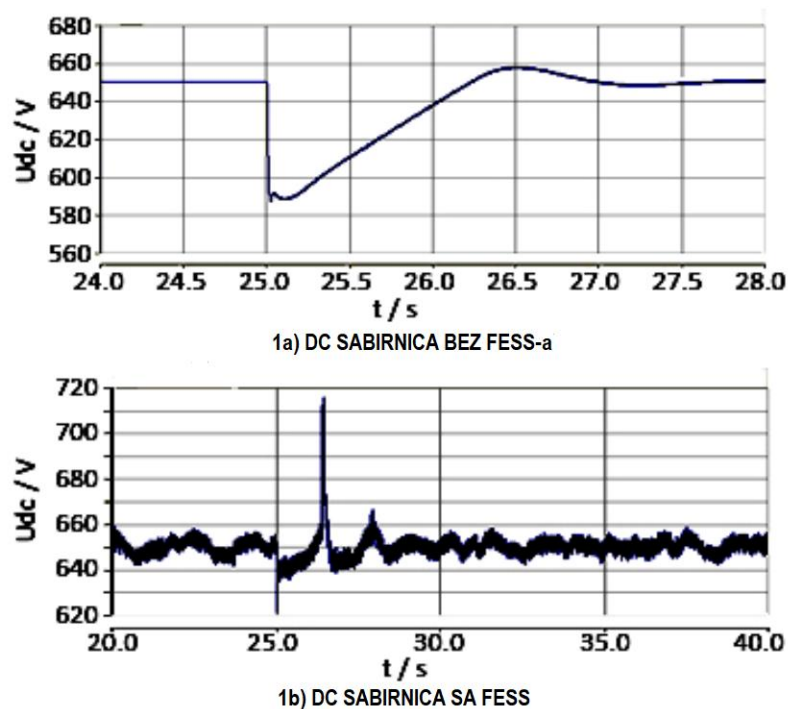


Slika 22 - Dinamički odziv frekvencije generatora, napona i struje mreže te brzine vrtnje zamašnjaka

Izvor: Prilagodio student iz S. Santoso and S. Kulkarni, 'Impact of Pulse Loads on Electric Ship Power System: With and Without Flywheel Energy Storage Systems', IEEE Electric Ship Technologies Symposium, Apr. 2009.

Još jedan primjer prikazan je u radu [54], gdje je predstavljen model EE sustava broda s integriranim FESS sustavom priključenim na istosmjernu sabirnicu, sa nominalnim naponom od 650V i snagom od 34kVA. FESS sustav sastavljen je od FESS-a s asinkronim motorom, spojenim na mrežu preko dvosmjernog energetskeg pretvarača, upravljanim FOC metodom. Simulirani su razni scenariji: izbacivanje generatora iz mreže, iznenadno uključivanje potrošača te su provedene statičke i tranzijentne studije stabilnosti sustava. Prva

studija prikazuje iznenadno ispadanje generatora sa mreže, koju karakterizira trošilo od 3kW i otpor od 400 ohma. Nakon 5 sekundi bez napajanja, može se uočiti tranzijentna pojava prilikom ponovnog uspostavljanja napajanja od strane generatora. Međutim, s uključenjem FESS sustava, napon DC sabirnice nakon ispada generatora ostaje stabilan unutar određenog raspona, smanjujući prekide i poboljšavajući pouzdanost opskrbe energijom. Posebno je interesantna druga studija iznenadnog uključanja potrošača, predstavljenog snagom od 15 kW. Na sljedećem grafu 1) prikazan je napon sabirnice s i bez zamašnjaka. U grafu a) vidi se nagli pad napona na DC sabirnici, dok na grafu b) uočava stabilizacija napona nakon kratkotrajne tranzijentne pojave pri uključanju FESS-a.

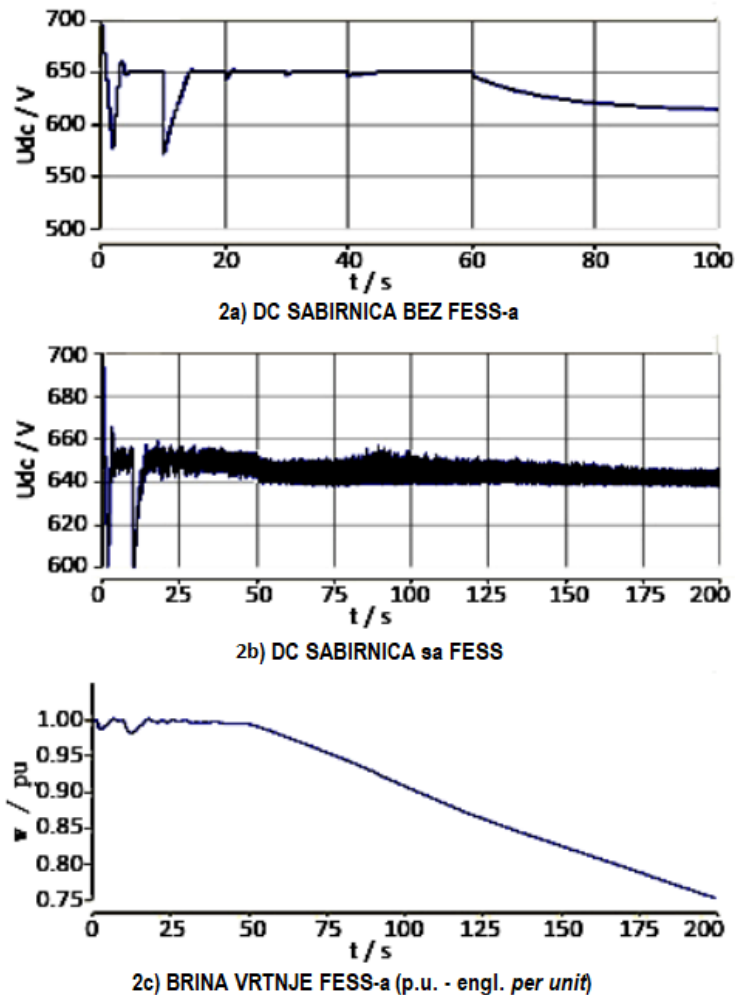


Slika 23 - Grafički prikaz pada napona prilikom iznenadnog uključanja potrošača

Izvor: Prilagodio student iz J. Feng, W. Gongbao, F. Lijun, W. Gang, and X. Zhen, 'Applying Flywheel Energy Storage System to Integrated Power System for Power Quality and Stability Enhancement', *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Aug. 2011.

Nadalje, studija statičke stabilnosti prikazuje odziv sustava na promjenjiva opterećenja, s i bez intervencije FESS-a, što opravdava njegovu sposobnost održavanja stabilnosti čak i pri maksimalnim opterećenjima. U ovoj studiji postepeno su spojeni na mrežu potrošači od 20kW, 2kW, 1kW, 1kW i 1kW, u intervalima od 10s, 20s, 30s, 40s, 50s. U grafu 2a), sa porastom opterećenja, regulator napona povećava struju uzbude generatora do 50-te sekunde, gdje se stabilnost DC napona ne može održati, te se primjećuje pad na

612V. Na grafu 2b), kada regulator napona dosegne svoj limit, napon sabirnice pada na 640V, gdje se uključuje FESS, koji podiže napon. Nakon što se FESS isprazni, odnosno rotor dosegne svoju minimalnu brzinu ω_{min} , FESS prestaje s radom, što rezultira ponovnim padom napona sabirnice na 612V. Međutim, smanjenje napona tijekom uključanja opterećenja u usporedbi sa grafom 2a) ublaženo je, odnosno trajanje pada napona se produljuje, što je korisno za stabilnost sustava.

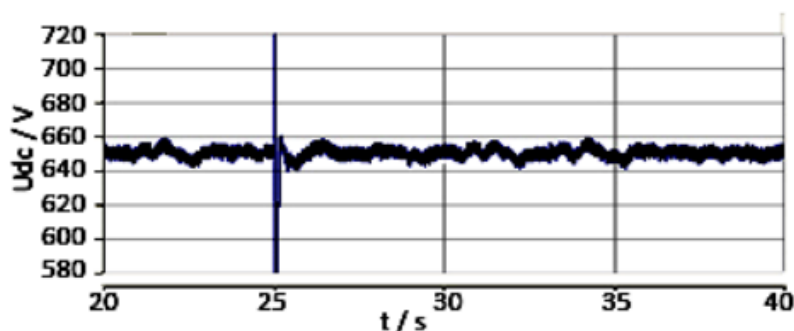


Slika 24 - Grafički prikaz pada napona prilikom studije statičke stabilnosti

Izvor: Prilagodio student iz J. Feng, W. Gongbao, F. Lijun, W. Gang, and X. Zhen, 'Applying Flywheel Energy Storage System to Integrated Power System for Power Quality and Stability Enhancement', *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Aug. 2011.

Tranzijentna stabilnost sustava simulirana je pojavom kratkog spoja u sustavu s potrošačem od 15kW. U $t = 25s$ pojavljuje se kratki spoj na sabirnici. Tokom kratkog spoja, FESS nastavlja oslobađati energiju ali nije u mogućnosti uspostaviti nominalni napon.

Nakon uklanjanja kvara, uz pomoć FESS-a, napon sabirnice naglo raste na nominalnu vrijednost, što čini sustav boljim od onog gdje FESS nije implementiran.



Slika 25 - Grafički prikaz pada napona prilikom studije tranzijentne stabilnosti

Izvor: Prilagodio student iz J. Feng, W. Gongbao, F. Lijun, W. Gang, and X. Zhen, 'Applying Flywheel Energy Storage System to Integrated Power System for Power Quality and Stability Enhancement', *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Aug. 2011.

Tehnologija pohranjivanja energije na zamašnjaku predstavlja obećavajuće rješenje za smanjenje potrošnje goriva na tegljačima [55] i plovilima sa dinamičkim pozicioniranjem [52]. Autor u radu [52] naglašava potrebu za sustavom upravljanja električnom energijom (eng. *Power Management System* – PMS) i korištenje skladišta energije tokom operacija bušenja morskog dna broda s dinamičkim pozicioniranjem. PMS sustav će, tokom perioda niske potrošnje (viška snage), puniti skladište energije i uzimati energiju iz istog u periodima visoke potrošnje (manjka snage), čime će se učinkovito smanjiti ovisnost o konvencionalnim izvorima energije. Ovaj inovativni pristup ne samo da poboljšava energetska učinkovitost, već i doprinosi smanjenju okolišnih utjecaja, smanjenjem emisija. U radu [55], prikazan je model tegljača s dizel-generatorom, kao glavnim izvorom napajanja. Rezultati pokazuju uštedu u potrošnji goriva od 23% korištenjem FESS tehnologije, dok se upotrebom DFIM motora s promjenjivom brzinom postiže ušteda goriva do 25,6%. Nadalje, koncept „*peak shaving*“ dodatno ističe značaj FESS tehnologije. Vršna (eng. *peak*) opterećenja su kratkotrajni porasti potrošnje električne energije u nekom razdoblju vremena, koji uzrokuju stres na energetska sustav, što utječe na pouzdanost sustava. Princip „*peglanja*“ vršnih opterećenja svodi se na upotrebu dodatne snage ili smanjenje potrošnje, kako ne bi došlo do potrebe za pokretanjem dodatnih generatora u mrežu [52]. Kao rezultat, potrošnja će se smanjiti na određenu graničnu razinu. U radu [56] o „*peak shaving*“ tehnikama, navodi se FESS sustav kao potencijalno rješenje za pokrivanje vršnih opterećenja, ali bi bilo potrebno više jedinica, jer su trenutni kapaciteti još uvijek mali za velike primjene.

Još dva primjera navedeni su u sljedećem tekstu. U radu [57], simuliran je elektroenergetski sustav s integriranim FESS sustavom i njegova stabilnost, koristeći simulaciju u stvarnom vremenu pomoću „*Hardware-in-the-loop*“ tehnike te su rezultati potvrđeni unutar MATLAB modela. „*Hardware-in-the-loop*“ tehnika omogućuje spajanje upravljačke jedinice na simulirani sustav s realnim povratnim signalima, gdje će upravljačka jedinica smatrati taj sustav kao stvarni svijet. Rezultati pokazuju učinkovitost FESS-a za kompenzaciju pada napona i doprinosu regulaciji frekvencije. Padovi napona (najčešći) od 5, 10, 15 i 20% simulirani su unutar mreže, a rezultati pokazuju da velika brzina i inercija FESS-a može održati napon unutar mreže, gdje se samo mali dio djelatne snage koju predaje FESS troši na gubitke energetske pretvarača i ostalih komponenti. U radu [58], prikazan je model FESS SE kao brodski izvor energije u nuždi, unutar vojne primjene. Izlazna snaga skladišta je 500kW za primjene kod teških opterećenja tokom 30 sekundi i 2MW tokom kratkotrajnih potrošača velike snage. Rezultati pokazuju da ga, visoka gustoća snage i učinkovitost, čini primjenjivim u vojne svrhe.

4.1.2. Hibridna rješenja

Kombinacija dva ili više vrsta skladišta energije (poput baterija, kondenzatora ili FESS-a) unutar elektroenergetskog sustava zovemo hibridno rješenje. Integracija više skladišta energije u isti elektroenergetski sustav omogućuje fleksibilnije i robusnije dizajniranje sustava. Jedan od ključnih prednosti hibridnih rješenja je iskorištavanje prednosti svake pojedinačne tehnologije pohrane energije, dok istovremeno smanjuje utjecaj njihovih nedostataka. Generalno, hibridno rješenje karakterizira jedno skladište energije, koje ima visok kapacitet energije i jedno skladište energije, koje ima visoku specifičnu snagu. Cilj hibridnog pogona je da skladište energije visoke specifične snage zadovoljava kratkotrajna i česta vršna opterećenja, dok skladište energije visokog kapaciteta pohrane energije zadovoljava dugoročne potrebe za energijom. Na primjer, FESS sustav omogućuje oslobađanje velikih količina energije u kratkom periodu vremena s brzim odzivom i visokom pouzdanošću, ali nema veliku gustoću energije. Isto tako je vrlo pouzdan u smislu životnog vijeka, jer omogućuje velik broj ciklusa punjenja/pražnjenja s velikim varijacijama temperature. S druge strane, baterijski sustav pohrane energije (eng. *Battery Energy Storage System* - BESS) nudi veću gustoću energije, ali je vrlo osjetljiv na temperaturne varijacije i limitiran je u smislu ciklusa punjenja/pražnjenja. Kombiniranje ove dvije tehnologije, postiže se balans između gustoće energije, brzine odziva sustava i pouzdanosti [59]. Upravo je takva konfiguracija hibridnog rješenja prikazana u sljedećem primjeru:

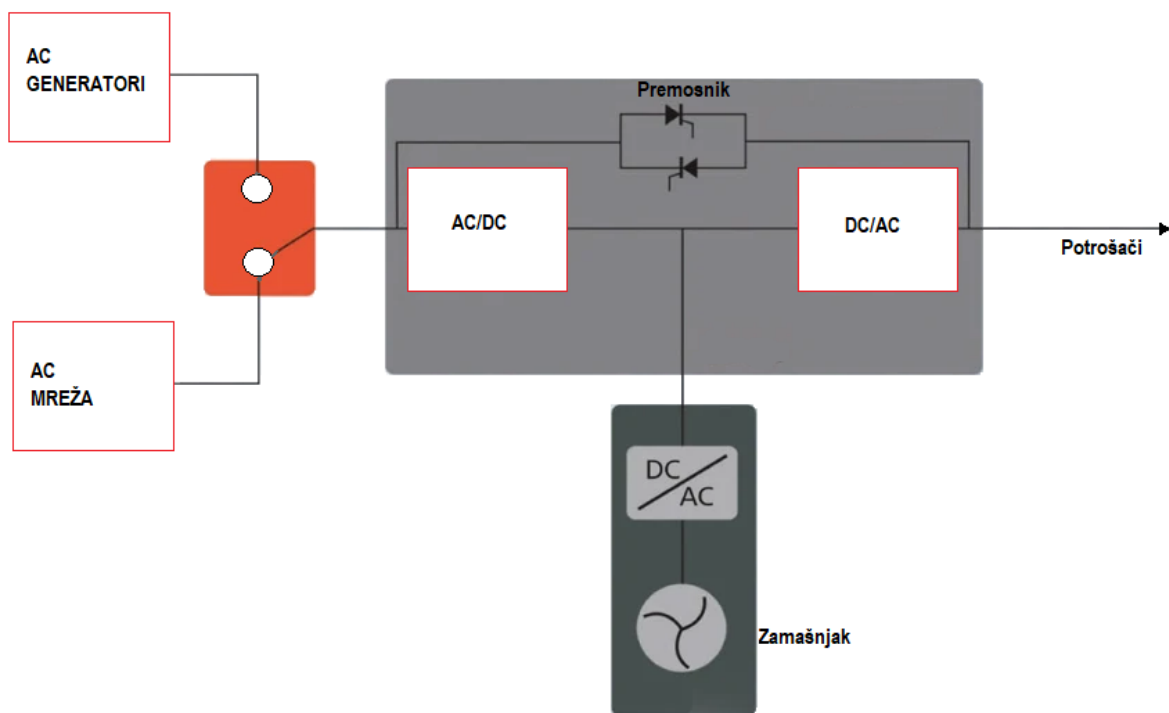
U radu [60], predstavljena su i uspoređena dva hibridna rješenja: 1) FESS od 90kW i BESS s nazivnim naponom od 128V i kapaciteta 100Ah (litij-ionske baterije); 2) BESS (istih dimenzija) i superkondenzatori nazivnog napona 125V, 63F (eng. Ultra Capacitor - UC), za kompenzaciju fluktuacije snage i minimizaciju gubitaka skladišta energije tokom različitih stanja mora (klasični problem fluktuacije potrebne snage od strane propulzijskog motora uzrokovane rotacijom propelera i nailaženje na valove koji dižu propelu iznad razine mora). Rezultati pokazuju da BESS/FESS konfiguracija nadilazi BESS/UC u kontekstu kompenzacije fluktuacije snage i efikasnosti tokom stanja nemirnog, visokog mora (razlike između početka i vrha vala), dok je BESS/UC prikladniji u stanju mirnog mora. Isto tako, prva konfiguracija smatra se povoljnijom za baterije, jer se smanjuje njihova potrošnja, manje su vršne vrijednosti struja (tokom najveće potražnje energije iz baterija) i baterije su generalno dugoročno izložene manjem opterećenju, što produžuje njihov vijek trajanja.

4.1.3. Besprekidno napajanje

Iako još u fazi istraživanja, FESS se pokazao kao obećavajuće rješenje za sustave neprekidnog napajanja (UPS). UPS je elektronički upravljano skladište energije s kratkim vremenom trajanja, koji se uključuje u slučaju ispada mrežnog napajanja (eng. *blackout*). S obzirom da većina „blackout“ stanja (čak 80%) traje manje od 3 sekunde, FESS sustavi pohrane energije pokazali su se kao vrlo pouzdano rješenje u ovom slučaju, zbog sposobnosti predaje visokih iznosa snage u kratkom vremenu (do 15s). FESS sustav je najprikladniji za zadovoljavanje trenutnih potreba mreže za energijom, dok ostali sustavi ne postanu operativni. Takva primjena ih čini idealnim za kritične sustave poput bolnica, podatkovnih centara i industrijskih postrojenja sa kritičnim točkama sustava [16], [61]. Iako u većini slučajeva osigurava dovoljno energije da sustav koji napaja ostaje u funkciji do ponovnog uspostavljanja rada glavnog izvora napajanja, dugotrajni prekidi rješavaju se pomoću dizel-generatora ili BESS.

Trenutno najkorištenija vrsta skladišta energije za UPS primjenu su baterijska skladišta energije. Iako je BESS sposoban napajati sustav tokom dužeg vremenskog perioda s manjim gubicima, sve ostale karakteristike čine FESS povoljnijim nego BESS: duži životni vijek (FESS – 20g, BESS – do 5g), robusnost na vanjske temperature (BESS zahtijeva sustave hlađenja unutar posebnih prostorija), veći broj ciklusa punjenja/pražnjenja, pouzdanost, kompaktnost (manji gabariti za istu snagu), sigurnost (BESS ispušta toksične kemikalije) i smanjena potreba za održavanjem. Česti ciklusi punjenja/pražnjenja su štetniji

za BESS nego za FESS. S obzirom da u današnjici najveći postotak smetnji u mreži traje do 5s, logično je koristiti FESS za pokrivanje/uklanjanje takvih smetnji, dok bi se baterije koristile za smetnje dužeg trajanja. FESS sustav bi se isto tako mogao lako implementirati kao hibridno rješenje s baterijskim sustavima za UPS primjene, što je spomenuto u prethodnom poglavlju [61], [62]. Klasična topologija UPS s FESS-om prikazana je na sljedećoj slici. Na slici se mogu uočiti dva izvora napajanja, glavni mrežni izvor i generator u nuždi. U slučaju pojave blackout-a, trenutnu potrebu za energijom preuzima FESS, koji napaja potrošače preko dvosmjernog energetskog pretvarača, sve dok se ne uključi generator u nuždi.



Slika 26 - UPS sustav

Izvor: Prilagodio student iz <https://www.techbriefs.com/component/content/article/39432-flywheel-energy-storage-continues-to-advance-green-initiatives>.

4.2. OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE

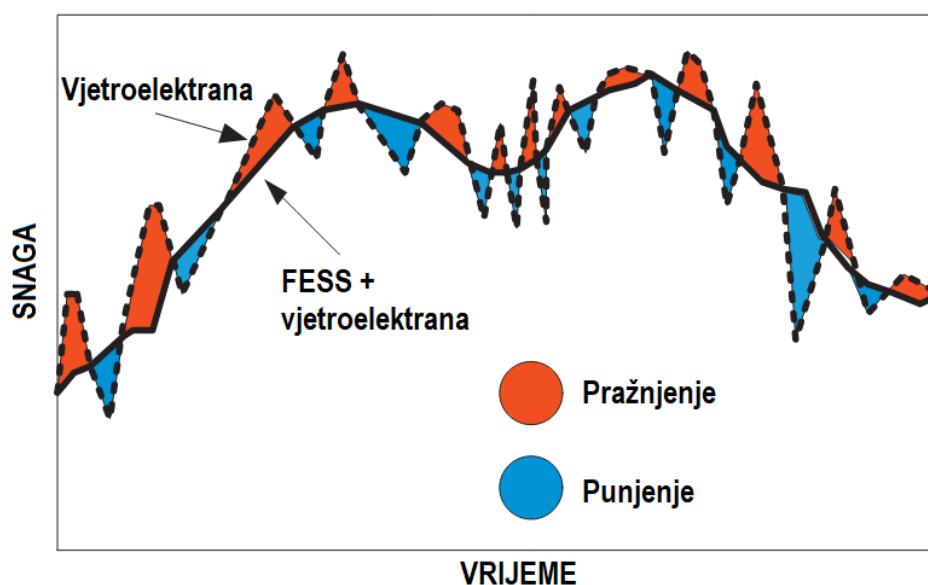
Konvencionalni izvori energije, kao što su elektrane na bazi fosilnih goriva, imaju najveći udio u ukupnoj proizvodnji. Naravno, tu se javljaju razni problemi, a najveći od njih je onečišćenje okoliša, koji potiče države u zadnjih par godina na prelazak na čišće, obnovljive izvore energije. Među obnovljivim izvorima energije ističu se vjetroelektrane i solarne elektrane, s kojima se FESS najčešće implementira. S obzirom na nepredvidivu

prirodu obnovljivih izvora, posljedično dolazi do fluktuacije u proizvodnji energije. Izlazna snaga vjetroelektrane ovisi o trenutnoj brzini vjetra, dok izlazna snaga solarne elektrane ovisi o jačini sunčeve svjetlosti ili pojave oblaka. FESS može, kako bi podržao mikromrežu, pohranjenu energiju predati mreži kada je to potrebno, jer varijacije u izlaznoj energiji najčešće su kratkotrajne, ali dovoljne da izazovu velike smetnje, a u rijetkim slučajevima i uzrok nastanka neželjenih stanja, kao što je blackout [23], [48].

4.2.1. Vjetroelektrane

FESS reguliran optimizacijskim algoritmima upravljanja električnom energijom može smanjiti visokofrekventne smetnje, uzorkovane promjeni brzine vjetra za 92%. U nekim otočnim aplikacijama, pokazalo se da uz integraciju sa dizel-generatorima, hidro i vjetro agregatima, FESS može poboljšati dinamičke performanse EE sustava i tako smanjiti trošak goriva za dizel-generatore [14], [23].

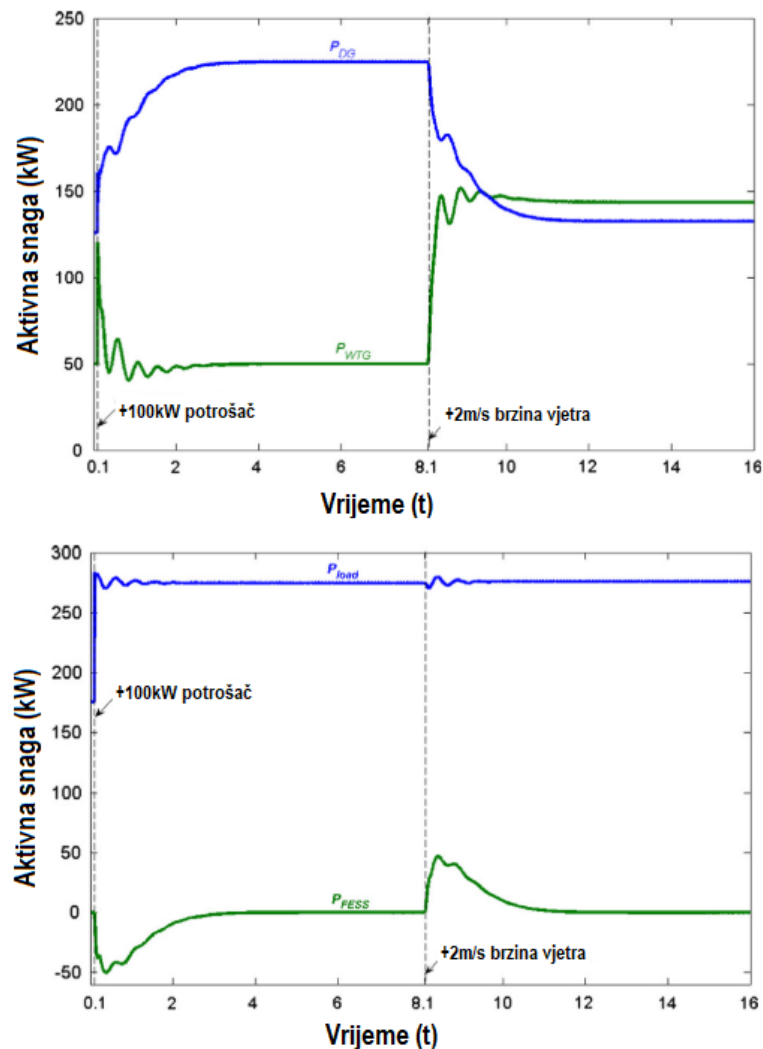
Upravo je takav primjer prikazan u radu [63], gdje je simuliran izolirani energetska sustav sastavljen od dizel-generatora, vjetroelektrane i skladišta energije (FESS). Cilj vjetroelektrane je doprinos proizvodnji električne energije DG, što bi smanjilo potrošnju goriva, odnosno utjecaj na okoliš.



Slika 27 - Pokrivanje kratkoročnih potreba za energijom pomoću FESS-a

Izvor: Prilagodio student iz A. A. K. Arani, H. Karami, G. B. Gharehpetian, and M. S. A. Hejazi, 'Review of Flywheel Energy Storage Systems structures and applications in power systems and microgrids', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69. Elsevier Ltd, pp. 9–18, Mar. 01, 2017.

Smanjena potrošnja goriva, postigla bi se smanjenjem postotka vremena u kojem DG radi, a s obzirom da vjetroelektrana ne može održati konstantnu izlaznu snagu, integrirano je skladište energije za pokrivanje kratkoročnih potreba za energijom, prikazano na prethodnoj slici. Rezultati, prikazani na sljedećoj slici, pokazuju da je zamašnjak male brzine vrtnje i velike snage odgovarajući za kompenzaciju fluktuacije snage. Tijekom naglih varijacija opterećenja i brzine vjetra, vjetroelektrana s FESS-om pokazuje značajno smanjeno odstupanja napona i frekvencije, što osigurava stabilan i pouzdan rad izolirane mikromreže [63].



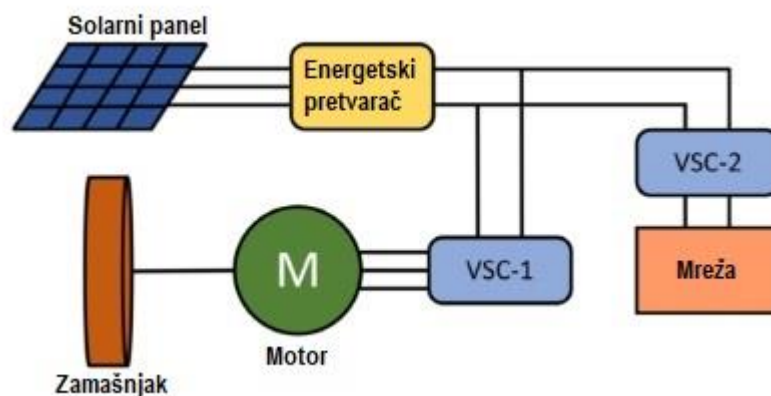
Slika 28 - Graf promjene aktivne snage unutar mikromreže

Izvor: Prilagodio student iz R. Sebastián and R. Peña-Alzola, 'Control and simulation of a flywheel energy storage for a wind diesel power system', International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 64, pp. 1049–1056, 2015.

U prvom grafu prikazana je proizvedena aktivna snaga (u kW) dizel-generatora (plavo) i aktivna snaga (u kW) vjetroelektrane (zeleno). Može se uočiti da snaga koju vjetroelektrana daje mreži ostaje ista pri uključenju dodatne potrošnje, a nakon rasta brzine vjetra, raste i krivulja izlazne snage vjetroelektrane (preuzima određenu količinu potrebne snage). U grafu ispod, prikazana je aktivna snaga koja se troši na potrošaču (u kW) i na FESS-u. Kod negativnih vrijednosti snage, FESS predaje snagu u mrežu i obrnuto. Prilikom povećanja brzine vjetra, odnosno snage koja se generira u vjetroelektrani, FESS se puni/prazni samo prilikom prijelaznih pojava, kako bi se frekvencija i napon mreže održali konstantnim. Iz oba grafa, može se uočiti da FESS pegla promjenjivu izlaznu snagu i drži ju konstantnom na strani potrošača, prilikom promjena izlazne snage iz vjetroelektrane ili DG, što čini mikromrežu pouzdanijom i kvalitetnijom [63].

4.2.2. Fotonaponske instalacije

Fotonaponski paneli koriste se za pretvaranje energije sunčeve svjetlosti u električnu energiju. Međutim, zračenje sunca varira tijekom dana i kroz godišnja doba, što rezultira neujednačenom izlaznom snagom. Česti karakteristični problemi su: nestabilnost napona, fluktuacije izlazne snage i utjecaj na frekvenciju mreže. Primjer ovakvog rješenja prikazan je na sljedećem blok-dijagramu:



Slika 29 - Integrirani FESS unutar fotonaponske instalacije

Izvor: Prilagodio student iz A. A. K. Arani, H. Karami, G. B. Gharehpetian, and M. S. A. Hejazi, 'Review of Flywheel Energy Storage Systems structures and applications in power systems and microgrids', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69. Elsevier Ltd, pp. 9–18, Mar. 01, 2017.

Integracija FESS-a sa solarnim panelima obećavajuća je rješenje za poboljšanje energetske efikasnosti. Neke studije provedene u Njemačkoj, o učinkovitosti FESS-a u ovom

kontekstu, naglašavaju energetske učinkovitost kao ključni faktor. Za razliku od tradicionalnih baterijskih sustava, kao što je već spomenuto, FESS pohranjuje energiju putem kinetičke energije, što predstavlja zeleniju i potencijalno dugotrajniju alternativu za primjene u gradovima i naseljima. Iako BESS trenutno dominira na tržištu, FESS ima prednosti poput produljenog vijeka trajanja i smanjenog utjecaja na okoliš, što ih čini privlačnim izborom za održivu pohranu energije. Međutim, istraživanje također ističe izazove, poput relativno visokog postotka samopražnjenja, koji ograničava energetske učinkovitost FESS-a u kućnim/solarnim instalacijama, na tipično manje od 40% [64].

4.3. TRANSPORT

Transportni sektor značajan je potrošač energije, gdje zauzima jednu trećinu udjela u Europi, a pridonosi četvrtini globalnih emisija ugljičnog dioksida. Kao i u svim ostalim sektorima, pa tako i u transportnom sektoru, teži se za održivim, ekološkim rješenjima. U današnjici, FESS je moguće implementirati u različitim područjima transportne industrije: automobilske industriji, željezničkom prometu, pomorskom prometu, svemirskom prometu. Implementacija FESS-a u transportnom sektoru istražena je u različitim kontekstima. Dva su primarna načina za korištenje FESS-a s energetske stajališta. Prvi je integracija uz glavni pogonski sustav, gdje bi se apsorbirala energija koja bi se inače trošila usporavanjem vozila. Taj proces se još zove regenerativno kočenje, gdje se pohranjena energija prilikom usporavanja vozila koristi kao pomoć prilikom ubrzavanja. Druga opcija je korištenje FESS-a kao glavni izvor napajanja, što je trenutno još u fazi istraživanja, zbog limitiranog kapaciteta kod dugotrajne pohrane energije [32], [65].

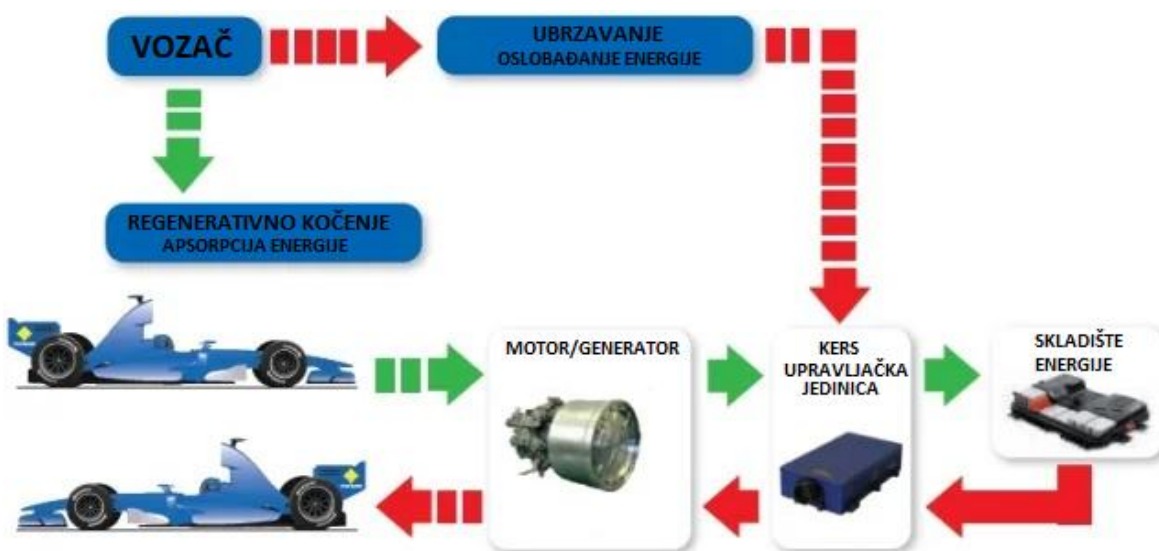
4.3.1. Regenerativno kočenje

Učinkovitost vozila u gradskoj vožnji naglo opada jer se, zbog čestih ubrzavanja i zaustavljanja, 60% energije gubi prilikom kočenja. Regenerativno kočenje je mehanizam povrata energije, koji usporava vozilo ili objekt u kretanju, pretvarajući njegovu kinetičku ili potencijalnu energiju u oblik energije koji se može pohraniti (baterija, FESS). Ovaj proces omogućuje veću energetske učinkovitost i produžuje domet vozila.

Hibridna vozila na baterije poznata su alternativa tradicionalnim vozilima s motorima s unutarnjim izgaranjem. Međutim, isti se suočavaju sa nedostacima: ograničena gustoća energije, osjetljivost na temperature (smanjuje učinkovitost i životni vijek baterije), životni ciklus (degradiranje baterije). FESS nudi alternativu baterijskim sustavima. Moderni

zamašnjaci izrađeni od kompozitnih materijala nude visoku specifičnu snagu i energiju, čineći ih prikladnima za automobilske primjene, odnosno, mogu brzo apsorbirati i predati energiju bez značajne degradacije. FESS sustavi obično se mogu napuniti unutar 10 sekundi, što značajno poboljšava performanse i učinkovitost sustava regenerativnog kočenja u električnim vozilima [21], [32], [66].

KERS sustav (eng. *Kinetic Energy Recovery System*) primjer je FESS sustava, koji se koristi kao sustav regenerativnog kočenja u Formuli 1, koju je uvela FIA (eng. *International Automobile Federation*) 2009. godine kao poticaj za rješenje svjetskih ekoloških izazova. KERS sustav, prikazan na sljedećoj slici, koristi jednu od tri vrste skladišta, ovisno o želji konstruktora bolida: mehaničkog skladišta energije (FESS), elektrokemijskog skladišta energije (BESS) ili električnog skladišta energije (kondenzatori). Dopusštena snaga sustava bila je limitirana na 60kW 2009. godine, a kasnije je to povećano na 120kW. Pohranjena snaga može se koristiti 6,6 sekundi. KERS na bazi FESS sustava dizajniran je sa brzinama vrtnje od 60.000 min^{-1} okretaja [65], [67].



Slika 30 - KERS sustav

Izvor: Prilagodio student iz <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9503>

Posebno je interesantna integracija FESS-a u željezničke sustave, što predstavlja obećavajuće rješenje za energetska učinkovitost i održivost u javnom prijevozu. Pohranjivanjem energije prilikom regenerativnog kočenja, FESS pomaže smanjiti ovisnost o tradicionalnim izvorima energije, ublažiti utjecaj na okoliš, ublažiti rad lokomotive prilikom ubrzanja, smanjiti vrijeme putovanja i poboljšati učinkovitost potrošnje goriva [32].

Implementacija FESS-a u istom, rezultirala bi redukcijom u potrošnji energije kod lakih lokomotiva za čak 31,2%, pohranom energije kod regenerativnog kočenja (prikazano na sljedećoj slici) – umjesto klasičnog kočionog sustava, gdje se energija pohranjena u inerciji lokomotive troši u toplinu, regenerativni kočioni sustav usporavao bi vlak, pretvarajući energiju pohranjenu u inerciji vlaka u električnu energiju koja bi se pohranila u obliku kinetičke energije unutar zamašnjaka. Integracijom FESS-a u lokomotive, postiglo bi se bolje ubrzanje pri većim brzinama, smanjeno vrijeme putovanja, veći stupanj korisnosti i manja težina same lokomotive [21].



Slika 31 - Regenerativno kočenje unutar željezničkog prometa

Izvor: Prilagodio student iz A. G. Olabi, T. Wilberforce, M. A. Abdelkareem, and M. Ramadan, 'Critical review of flywheel energy storage system', *Energies*, vol. 14, no. 8. MDPI AG, Apr. 02, 2021.

4.3.2. Zamašnjak kao glavni izvor napajanja

Iako trenutna gustoća energije zamašnjaka ograničava njihovu primjenu kao jedini izvor energije, stalni napredak u razvoju tehnologije nastavlja širiti granice njegove implementacije. Gyrobus je primjer primjene FESS tehnologije kao primarnog izvora energije, kojeg je razvila je švicarska tvrtka Oerlikon 1940-ih. Gyrobus je koristio veliki metalni zamašnjak koji se vrtio do 3000 min^{-1} okretaja za pohranu energije. Punjenje se odvijalo putem elektromotora s kontaktima na krovu vozila, koji je pogonio zamašnjak. Električne punionice bile su smještene na strateškim pozicijama u gradu, tamo gdje je to bilo najpotrebnije. Tijekom putovanja, motor pokretan zamašnjakom djelovao je kao generator, pretvarajući kinetičku energiju natrag u električnu. Dio energije vraćao se regenerativnim kočenjem nazad u zamašnjak [65].

Tipični Gyrobus mogao je prevaliti oko 6 km na ravnoj ruti, pri brzinama između 50 i 60 km/h, ovisno o opterećenju. Punjenje zamašnjaka trajalo je između 30 sekundi i 3 minute, s potencijalnim smanjenjem koje se moglo postići povećanjem napona punjenja. Međutim,

gust gradski promet predstavljao je problem dometu, zbog ograničene pohranjene energije. Prednosti Gyrobusa uključivale su tihi radi bez zagađenja. Međutim, značajni nedostaci uključivali su gabarite zamašnjaka, sigurnosne rizike povezane s rotirajućom masom velikom brzinom, ograničeni domet i složenost vožnje zbog žiroskopskih učinaka. Moderna tehnologija mogla bi riješiti mnoge od ovih nedostataka, čineći javni prijevoz temeljen na zamašnjaku izvedivijim [65].

Iako je, kao gore navedeno, bilo pokušaja implementacije zamašnjaka kao glavni izvor napajanja, FESS tehnologija nije još uvijek dovoljno zrela, kako bi prešla na serijske automobile zbog ograničenog kapaciteta za pohranu energije, koji je manje prikladan za dugoročno i postupno oslobađanje energije potrebno u tipičnim uvjetima vožnje. Zamašnjaci su prikladniji za kratkoročne primjene s visokim učinkom poput utrka, gdje dolazi do čestih i intenzivnih kočenja/ubrzavanja. Značajan napredak i smanjenje troškova u tehnologiji baterija, učinili su iste boljim izborom za proizvođače automobila. Osim toga, postojeća infrastruktura i potražnja potrošača favoriziraju baterije [68].

5. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu detaljno je obrađena tema „sustav pohrane energije zamašnjakom“, kao jedan od pristupa rješavanju problema pohrane energije u modernim energetske sustavima. Ovaj sustav se, kao mehaničko skladište energije, izdvaja kao značajna tehnologija koja omogućuje pretvorbu električne energije u kinetičku energiju i njezino pohranjivanje.

Kroz analizu podjele skladišta energije, usporedbu različitih tehnologija skladištenja, te povijesni razvoj zamašnjaka, prikazani su osnovni principi skladištenja energije. Daljnje istraživanje fokusirano je na građu sustava pohrane energije zamašnjakom. Struktura zamašnjaka obuhvaća kućište, u kojem se nalazi: motor/generator i rotor koji pohranjuje energiju, a podržan je ležajevima. Motor/generator može biti sinkroni motor s permanentnim magnetima, asinkroni motor, sinkroni motor ili d-reluktantni motor. Rotorski sustav, najčešće od čelika ili kompozitnih materijala, određuje kapacitet pohrane energije. Ležajevi, mehanički ili magnetski, ključni su za stabilnost sustava. Energetski sklopovi, koji napajaju motor, omogućuju dvosmjerno pretvaranje električne energije. Održavanje zamašnjaka je ekonomično, zahtijevajući godišnje preventivne preglede i periodičnu zamjenu ležajeva. Pažnja je posvećena gubicima i sigurnosti ovog sustava, mogućim kvarovima i sigurnosnim standardima. Nadalje, primjene sustava pohrane energije zamašnjakom su detaljno istražene u kontekstu brodskih elektroenergetskih sustava, obnovljivih izvora energije te transporta. Razmatrana su poboljšanja u kvaliteti električne energije, hibridna rješenja, besprekidno napajanje, kao i integracija ovog sustava u vjetroelektrane, fotonaponske instalacije te primjene u transportu (regenerativno kočenje).

Prednosti zamašnjaka uključuju visoku energetske učinkovitost, brz odziv, veliku snagu, nisku potrebu za održavanjem, ekološku prihvatljivost i dug životni vijek. Unatoč visokom početnom trošku instalacije, zamašnjak se ističe kao ekonomska alternativa zbog lako dostupnih materijala. Sustav pohrane energije zamašnjakom korisna je tehnologija koja će, razvojem novih materijala i tehnologije, naći primjenu u različitim područjima industrije te poboljšati rad elektroenergetskog sustava. S obzirom na sve navedeno, može se zaključiti da je sustav pohrane energije zamašnjakom perspektivan i potencijalno važan dio budućih energetske sustava. Njegova primjena donosi brojne prednosti u smislu povećane pouzdanosti, učinkovitosti i integracije s obnovljivim izvora energije te, stoga, predstavlja značajan doprinos razvoju održivih energetske rješenja.

LITERATURA

- [1] S. Sabihuddin, A. E. Kiprakis, and M. Mueller, 'A numerical and graphical review of energy storage technologies', *Energies (Basel)*, vol. 8, no. 1, pp. 172–216, 2015, doi: 10.3390/en8010172.
- [2] 'Intermittent electricity - Energy Education'. Accessed: May 06, 2024. [Online]. Available: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Intermittent_electricity
- [3] S. Koochi-Kamali, V. V. Tyagi, N. A. Rahim, N. L. Panwar, and H. Mokhlis, 'Emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power systems: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25, pp. 135–165, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.03.056.
- [4] M. U. Mutarraf, Y. Terriche, K. A. K. Niazi, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, 'Energy storage systems for shipboard microgrids - A review', *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 12, Dec. 2018, doi: 10.3390/en11123492.
- [5] 'Microgrids | Grid Modernization | NREL'. Accessed: May 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/grid/microgrids.html>
- [6] S. Rehman, L. M. Al-Hadhrami, and M. M. Alam, 'Pumped hydro energy storage system: A technological review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, pp. 586–598, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.12.040.
- [7] Z. Zhou, M. Benbouzid, J. Frédéric Charpentier, F. Scuiller, and T. Tang, 'A review of energy storage technologies for marine current energy systems', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 18, pp. 390–400, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.10.006.
- [8] A. Saldarini, M. Longo, M. Brenna, and D. Zaninelli, 'Battery Electric Storage Systems: Advances, Challenges, and Market Trends', *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 22, Nov. 2023, doi: 10.3390/en16227566.
- [9] W. Kramer, S. Chakraborty, B. Kroposki, and H. Thomas, 'Advanced Power Electronic Interfaces for Distributed Energy Systems; Part 1: Systems and Topologies', 2008. [Online]. Available: <http://www.osti.gov/bridge>
- [10] I. Sarbu and C. Sebarchievici, 'A comprehensive review of thermal energy storage', *Sustainability (Switzerland)*, vol. 10, no. 1, Jan. 2018, doi: 10.3390/su10010191.
- [11] 'What is thermal energy storage? – 5 benefits you must know | Danfoss'. Accessed: May 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.danfoss.com/en/about-danfoss/insights-for-tomorrow/integrated-energy-systems/thermal-energy-storage/>
- [12] G. Alva, Y. Lin, and G. Fang, 'An overview of thermal energy storage systems', *Energy*, vol. 144, pp. 341–378, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2017.12.037.
- [13] G. Genta, *Kinetic energy storage - Theory and practice of advanced flywheel systems*. Elsevier, 1985.

- [14] K. Xu, Y. Guo, G. Lei, and J. Zhu, 'A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies', *Energies*, vol. 16, no. 18. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), Sep. 01, 2023. doi: 10.3390/en16186462.
- [15] B. Bolund, H. Bernhoff, and M. Leijon, 'Flywheel energy and power storage systems', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, no. 2. pp. 235–258, Feb. 2007. doi: 10.1016/j.rser.2005.01.004.
- [16] S. Choudhury, 'Flywheel energy storage systems: A critical review on technologies, applications, and future prospects', *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 9. John Wiley and Sons Ltd, Sep. 01, 2021. doi: 10.1002/2050-7038.13024.
- [17] R. Takarli *et al.*, 'A Comprehensive Review on Flywheel Energy Storage Systems: Survey on Electrical Machines, Power Electronics Converters, and Control Systems', *IEEE Access*, vol. 11. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 81224–81255, 2023. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3301148.
- [18] X. Nguyen and A. Hoang, 'The Flywheel Energy Storage System: An Effective Solution to Accumulate Renewable Energy', in *6th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, Coimbatore: IEEE, 2020.
- [19] E. A. Basmaji, 'Flywheel Energy Storage System'. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/332061263>
- [20] A. Cuculić, 'Autorizirana predavanja s kolegija Brodske elektroenergetske mreže, Skladišta energije', *Pomorski fakultet u Rijeci - Merlin 23/24*, 2024.
- [21] A. G. Olabi, T. Wilberforce, M. A. Abdelkareem, and M. Ramadan, 'Critical review of flywheel energy storage system', *Energies*, vol. 14, no. 8. MDPI AG, Apr. 02, 2021. doi: 10.3390/en14082159.
- [22] H. Darrelmann, '30-2 3-3 100% 4 b Comparison of High Power Short Time Flywheel Storage Systems'.
- [23] A. A. K. Arani, H. Karami, G. B. Gharehpetian, and M. S. A. Hejazi, 'Review of Flywheel Energy Storage Systems structures and applications in power systems and microgrids', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69. Elsevier Ltd, pp. 9–18, Mar. 01, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2016.11.166.
- [24] M. A. Awadallah and B. Venkatesh, 'Energy storage in flywheels: An overview', *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 38, no. 2, pp. 183–193, Mar. 2015, doi: 10.1109/CJECE.2015.2420995.
- [25] K. R. Pullen, 'The Status and Future of Flywheel Energy Storage', *Joule*, vol. 3, no. 6. Cell Press, pp. 1394–1399, Jun. 19, 2019. doi: 10.1016/j.joule.2019.04.006.
- [26] V. Kale and M. Secanell, 'A comparative study between optimal metal and composite rotors for flywheel energy storage systems', *Energy Reports*, vol. 4, pp. 576–585, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.egyr.2018.09.003.

- [27] J. Wu, Z. Xu, F. Zhang, and N. Tong, 'Electromagnetic design of high-speed permanent magnet synchronous motor for flywheel energy storage system', in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Jun. 2021. doi: 10.1088/1742-6596/1887/1/012044.
- [28] R. Peña-Alzola, R. Sebastián, J. Quesada, and A. Colmenar, 'Review of flywheel based energy storage systems', in *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, IEEE, 2011. doi: 10.1109/PowerEng.2011.6036455.
- [29] W. Gengji and W. Ping, 'Rotor Loss Analysis of PMSM in Flywheel Energy Storage System as Uninterruptable Power Supply', *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 7, Oct. 2016, doi: 10.1109/TASC.2016.2594826.
- [30] W. Gengji, Q. Qinglei, W. Ping, and W. Xiaoyuan, 'Analysis of the rotor loss in a high speed permanent magnet motor for flywheel energy storage system', in *18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2015, p. 2169. doi: 10.1109/ICEMS.2015.7385376.
- [31] J. Wu, J. Wen, and H. Sun, 'A new energy storage system based on flywheel', in *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Calgary: IEEE, 2009. doi: 10.1109/PES.2009.5275460.
- [32] S. M. Mousavi G, F. Faraji, A. Majazi, and K. Al-Haddad, 'A comprehensive review of Flywheel Energy Storage System technology', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67. Elsevier Ltd, pp. 477–490, Jan. 01, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2016.09.060.
- [33] B. Toulas, 'Magnetic Bearings - The mechanical engineer's guide - EngineeringClicks'. Accessed: Mar. 28, 2024. [Online]. Available: <https://www.engineeringclicks.com/magnetic-bearing/>
- [34] A. V. Filatov and E. H. Maslen, 'Passive Magnetic Bearing for Flywheel Energy Storage Systems', 2001.
- [35] G. G. Sotelo, R. De Andrade, and A. C. Ferreira, 'Magnetic bearing sets for a flywheel system', in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Jun. 2007, pp. 2150–2153. doi: 10.1109/TASC.2007.899268.
- [36] G. G. Sotelo, E. Rodriguez, F. S. Costa, J. G. Oliveira, J. De Santiago, and R. M. Stephan, 'Tests with a hybrid bearing for a flywheel energy storage system', *Supercond Sci Technol*, vol. 29, no. 9, Aug. 2016, doi: 10.1088/0953-2048/29/9/095016.
- [37] Y. P. Siwakoti, M. Forouzesh, and N. Ha Pham, 'Power electronics converters-an overview', in *Control of Power Electronic Converters and Systems*, Elsevier, 2018, pp. 3–29. doi: 10.1016/B978-0-12-805245-7.00001-9.
- [38] R. Östergård, 'Flywheel energy storage a conceptual study', 2011. [Online]. Available: <http://www.teknat.uu.se/student>
- [39] G. Cimuca, S. Breban, M. M. Radulescu, C. Saudemont, and B. Robyns, 'Design and control strategies of an induction-machine-based flywheel energy storage system associated to a variable-speed wind generator', *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, no. 2, pp. 526–534, Jun. 2010, doi: 10.1109/TEC.2010.2045925.

- [40] S. Samineni, B. K. Johnson, H. L. Hess, and J. D. Law, 'Modeling and Analysis of a Flywheel Energy Storage System with a Power Converter Interface'.
- [41] A. Cuculić, 'Autorizirana predavanja s kolegija Energetska Elektronika', *Pomorski fakultet u Rijeci - Merlin* 22/23, 2022.
- [42] M. E. Amiryar and K. R. Pullen, 'Analysis of standby losses and charging cycles in flywheel energy storage systems', *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 17, Sep. 2020, doi: 10.3390/en13174441.
- [43] 'Efficiency, Losses, and Thermal Management'. Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.monolithicpower.com/en/power-electronics/ac-ac-converters/efficiency-losses-and-thermal-management>
- [44] 'What is Flywheel Energy Storage? | Linqip'. Accessed: Apr. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.linqip.com/blog/flywheel-energy-storage-system/>
- [45] R. Vor Dem Esche, 'Safety of Flywheel Storage Systems', 2016.
- [46] 'Is it again time for the flywheel-based energy storage systems? - EDN Asia'. Accessed: Apr. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.ednasia.com/is-it-again-time-for-the-flywheel-based-energy-storage-systems/>
- [47] Dānīshgāh-i Shahīd Bihīštū and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *2019 Iranian Conference on Renewable Energy & Distributed Generation (ICREDG)*.
- [48] F. Goris and E. Severson, 'A Review of Flywheel Energy Storage Systems for Grid Application', in *IECON - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Washington D.C.: IEEE, 2018. doi: 10.1109/IECON.2018.8591842.
- [49] A. Cuculić, 'Autorizirana predavanja s kolegija Brodski električni sustavi - Izvori električne energije na brodu', *Pomorski fakultet u Rijeci - Merlin* 20/21.
- [50] A. Cuculić, 'Autorizirana predavanja s kolegija Električni poriv broda - Konceptija i eksploatacijske prednosti električne propulzije', *Pomorski fakultet u Rijeci - Merlin* 21/22.
- [51] X. Chunling and Z. Conghui, 'Research on the Ship Electric Propulsion System Network Power Quality with Flywheel Energy Storage', *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Mar. 2010, doi: 10.1109/APPEEC.2010.5448784.
- [52] J. Herdzik, 'CHALLENGES OF SHIP PROPULSION SYSTEMS DURING DP OPERATIONS', *Journal of KONES Powertrain and Transport*, vol. 19, no. 2, 2012, doi: 10.5604/12314005.1137920.
- [53] S. Santoso and S. Kulkarni, 'Impact of Pulse Loads on Electric Ship Power System: With and Without Flywheel Energy Storage Systems', *IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, Apr. 2009, doi: 10.1109/ESTS.2009.4906568.
- [54] J. Feng, W. Gongbao, F. Lijun, W. Gang, and X. Zhen, 'Applying Flywheel Energy Storage System to Integrated Power System for Power Quality and Stability Enhancement', *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Aug. 2011, doi: 10.1109/ICEMS.2011.6073645.

- [55] K. Birudula Anil, M. Chandrasekar, and T. Chelliah, 'Fuel Minimization in Diesel-Electric Tugboat Considering Flywheel Energy Storage System', *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, Jun. 2018, doi: 10.1109/ITEC-AP.2018.8433279.
- [56] K. H. Chua, H. L. Bong, Y. S. Lim, J. Wong, and L. Wang, 'The State-of-the-Arts of Peak Shaving Technologies: A Review', *International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE)*, p. 173, Oct. 2020, doi: 10.1109/ICSGCE49177.2020.9275637.
- [57] S. Karrari, M. Noe, and J. Geisbuesch, 'High-speed Flywheel Energy Storage System (FESS) for Voltage and Frequency Support in Low Voltage Distribution Networks', *IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Sep. 2018, doi: 10.1109/IEPS.2018.8559521.
- [58] C. Huynh, P. McMullen, A. Filatov, S. Imani, H. A. Toliyat, and S. Talebi, 'FLYWHEEL ENERGY STORAGE SYSTEM FOR NAVAL APPLICATIONS', in *ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air*, Power for Land, 2006. doi: 10.1115/GT2006-90270.
- [59] J. Yang, 'Hybrid energy storage systems : Capacity optimization and environmental implication of hybrid energy storage systems in renewable power systems', Doctoral Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2022.
- [60] J. Hou, J. Sun, and H. Hofmann, 'Control development and performance evaluation for battery/flywheel hybrid energy storage solutions to mitigate load fluctuations in all-electric ship propulsion systems', *Appl Energy*, vol. 212, pp. 919–930, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.12.098.
- [61] D. R. Brown and W. D. Chvala, 'Flywheel energy storage: An alternative to batteries for ups systems', *Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineering*, vol. 102, no. 5, pp. 7–26, 2005, doi: 10.1080/01998590509509440.
- [62] J. McGroarty, J. Schmeller, R. Hockney, S. Member, and M. Polimeno, 'Flywheel Energy Storage System for Electric Start and an All-Electric Ship', in *IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, 2005. doi: 10.1109/ESTS.2005.1524706.
- [63] R. Sebastián and R. Peña-Alzola, 'Control and simulation of a flywheel energy storage for a wind diesel power system', *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 64, pp. 1049–1056, 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.08.017.
- [64] X. Li, N. Erd, and A. Binder, 'Evaluation of Flywheel Energy Storage Systems for Residential Photovoltaic Installations', in *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Capri: IEEE, 2016. doi: 10.1109/SPEEDAM.2016.7525914.
- [65] F. Braghin, 'Flywheel energy storage for vehicle applications', Master Thesis, Politecnico Milano, Milan, 2016.
- [66] A. Dhand and K. Pullen, 'Characterization of flywheel energy storage system for hybrid vehicles', in *SAE Technical Papers*, SAE International, 2014. doi: 10.4271/2014-01-1796.

- [67] 'Kinetic Energy Recovery System for the Automotive Industry'. Accessed: May 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9503>
- [68] E. Tegler, 'Why did the flywheel hybrid system never catch on for road cars?', Ars Technica. Accessed: May 14, 2024. [Online]. Available: <https://arstechnica.com/cars/2021/02/whatever-happened-to-williams-f1s-flywheel-hybrid-idea/>

KAZALO KRATICA

Kratika	Puni naziv na stranom jeziku	Tumačenje na hrvatskom jeziku
SE	/	Skladište energije
CAES	eng. <i>Compressed Air Energy Storage</i>	Skladište energije sa komprimiranim zrakom
PHES	eng. <i>Pumped Hydro Energy Storage</i>	Reverzibilne hidroelektrane
PE	eng. <i>Potential Energy</i>	Potencijalna energija
BESS	eng. <i>Battery Energy Storage System</i>	Baterijski sustav pohrane energije
NiCd	eng. <i>Nickel-Cadmium</i>	Nikal-Kadmij baterija
NaS	eng. <i>Sodium-Sulfur</i>	Natrij-Sumporna baterija
LiIon	eng. <i>Lithium-Ion</i>	Litij-Ionska baterija
TSE	/	Toplinsko skladište energije
SMES	eng. <i>Superconducting Magnetic Energy Storage</i>	Skladište energije na bazi supervodljivih zavojnica
SES	eng. <i>Supercapacitor Energy Storage</i>	Skladište energije na bazi superkondenzatora
PMSM	eng. <i>Permanent Magnet Synchronous Machine</i>	Motor sa permanentnim magnetima
ee	/	električna energija
NdFeB	eng. <i>Neodymium-Iron-Boron magnets</i>	Neodimijski magneti
SmCo	eng. <i>Samarium-Cobalt magnet</i>	Samarijum-Cobalt magneti
DQ	eng. <i>Direct Quadrature</i>	Direktno-kvadrturni referentni okvir
PWM	eng. <i>Pulse Width Modulation</i>	Širinsko-impulsna modulacija
DFIM	eng. <i>Double Fed Induction Machine</i>	Asinkroni motor sa dupliranim napajanjem
FOC	eng. <i>Field Orientated Control</i>	Vektorska kontrola
BLDC	eng. <i>Brushless Direct Current</i>	Istosmjerni motor bez četkica
SynRM	eng. <i>Synchronous Reluctance Machine</i>	Sinkrono-reluktantni motor
SRM	eng. <i>Switched Reluctance Machine</i>	Prekidačko-reluktantni motor

PMB, AMB, SMB	eng. <i>Passive, Active, Superconducting Magnetic Bearing</i>	Pasivni, aktivni, supervodljivi magnetski ležaj
THD	eng. <i>Total Harmonic Distortion</i>	Ukupno harmoničko izobličenje mreže
AC, DC	eng. <i>Alternate, Direct Current</i>	Izmjenična i istosmjerna struja
BTB	eng. <i>Back to Back</i>	Topologija energetskih pretvarača
NPC	eng. <i>Neutral Point Clamped</i>	Topologija energetskih pretvarača sa diodnim zatezanjem
DMC, IMC	eng. <i>Direct, Indirect Matrix Converter</i>	Direktni i indirektni matrični pretvarač
SCR, GTO, MCT	eng. <i>Silicon Controlled Rectifier, Gate turn-Off Thyristor, Metal-oxide semiconductor Controlled Thyristor</i>	Poluupravljivi tiristorski energetski ventil
IGBT	eng. <i>Integrated Gate Bipolar Transistor</i>	Upravljivi tranzistorski energetski ventil
MOSFET	eng. <i>Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>	Unipolarni tranzistor
BJT	eng. <i>Bipolar Junction Transistor</i>	Bipolarni tranzistor
VFD	eng. <i>Variable Frequency Drive</i>	Frekvencijski pretvarači
DTC	eng. <i>Direct Torque Control</i>	Direktno upravljanje momentom
U/f	eng. <i>Voltage/frequency scalar control</i>	Skalarna U/f kontrola (napon/frekvencija)
UPS	eng. <i>Uninterruptible Power Supply</i>	Sustav besprekidnog napajanja
AVR	eng. <i>Automatic Voltage Regulator</i>	Regulator napona
EE	/	elektroenergetski
PMS	eng. <i>Power Management System</i>	Sustav upravljanja električnom energijom
UC	eng. <i>Ultra Capacitor</i>	Superkondenzator
DG	eng. <i>Diesel Generator</i>	Dizel generator
KERS	eng. <i>Kinetic Energy Recovery System</i>	Sustav regenerativnog kočenja u Formuli 1

POPIS SLIKA

Slika 1 - PHESS skladište energije	5
Slika 2 - BESS tehnologija	7
Slika 3 - Vrste toplinskih skladišta energije	9
Slika 4 - Usporedba skladišta energije (gustoća energije i snage)	11
Slika 5 - Usporedba skladišta energije (specifična energija i snaga)	12
Slika 6 - Usporedba skladišta energije (izlazna snaga i vrijeme pražnjenja)	12
Slika 7 - Usporedba skladišta energije (efikasnost i životni vijek)	13
Slika 8 - Blok dijagram FESS-a	15
Slika 9 - Dijagram snage, kutne brzine i energije u ovisnosti o vremenu	17
Slika 10 - Kućište zamašnjaka.....	21
Slika 11 - Koeficijent K i geometrijski oblik zamašnjaka.....	25
Slika 12 - Presijek PMSM	29
Slika 13 - FESS sa DFIM motorom.....	31
Slika 14 - Reluktantni motori	32
Slika 15 - Ležaj sa pasivnim magnetima	34
Slika 16 - Ležajevi s aktivnim magnetima	35
Slika 17 - Upravljanje AMB ležajevima	36
Slika 18 - Blok shema energetskog pretvarača.....	38
Slika 19 - BTB energetski pretvarač.....	40
Slika 20 - Gubici u FESS sustavu.....	42
Slika 21 - Dinamički odziv napona i frekvencije pri uključanju potrošača velike snage....	48
Slika 22 - Dinamički odziv frekvencije generatora, napona i struje mreže te brzine vrtnje zamašnjaka.....	49
Slika 23 - Grafički prikaz pada napona prilikom iznenadnog uključanja potrošača	50
Slika 24 - Grafički prikaz pada napona prilikom studije statičke stabilnosti	51
Slika 25 - Grafički prikaz pada napona prilikom studije tranzijentne stabilnosti	52
Slika 26 - UPS sustav	55
Slika 27 - Pokrivanje kratkoročnih potreba za energijom pomoću FESS-a.....	56
Slika 28 - Graf promjene aktivne snage unutar mikromeže	57
Slika 29 - Integrirani FESS unutar fotonaponske instalacije.....	58
Slika 30 - KERS sustav	60

Slika 31 - Regenerativno kočenje unutar željezničkog prometa	61
--	----

POPIS TABLICA

Tablica 1 - Parametri Fess-a	19
Tablica 2 - Karakteristike sporih i brzih zamašnjaka	20
Tablica 3 - Parametri materijala	27
Tablica 4 - Parametri električnih strojeva.....	28

POPIS FORMULA

Jednadžba kinetičke energije pohranjene na zamašnjaku (1).....	17
Jednadžba momenta inercije rotora zamašnjaka (2).....	18
Proširena jednadžba kinetičke energije pohranjene na zamašnjaku (3).....	18
Proširena jednadžba momenta inercije rotora zamašnjaka (4).....	23
Aproksimacija rada zamašnjaka (5).....	24
Jednadžba vlačne čvrstoće materijala za rotor (6).....	24
Maksimalna specifična energija na zamašnjaku (7).....	25
Maksimalna gustoća energije na zamašnjaku (8).....	26