

# PRUŽANJE USLUGE VIRTUALNE INERCIJE POMOĆU BATERIJSKIH SPREMNIKA ENERGIJE

---

**Bosnić, Edvin**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:129501>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-26**



*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**TEHNIČKI FAKULTET**  
Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad  
**PRUŽANJE USLUGE VIRTUALNE INERCIJE POMOĆU**  
**BATERIJSKIH SPREMNIKA ENERGIJE**

Rijeka, rujan 2022.

Edvin Bosnić  
0069077721

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**TEHNIČKI FAKULTET**  
Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad  
**PRUŽANJE USLUGE VIRTUALNE INERCIJE POMOĆU**  
**BATERIJSKIH SPREMNIKA ENERGIJE**

Mentor: Prof. dr. sc. Dubravko Franković  
Komentor: Doc. dr. sc. Tomislav Plavšić

Rijeka, rujan 2022.

Edvin Bosnić  
0069077721

Rijeka, 21. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**  
Predmet: **Vođenje elektroenergetskog sustava**  
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Edvin Bosnić (0069077721)**  
Studij: **Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike**  
Modul: **Elektroenergetika**

Zadatak: **Pružanje usluge virtualne inercije pomoću baterijskih spremnika energije /  
Virtual inertia provision by battery energy storage systems**

### Opis zadatka:

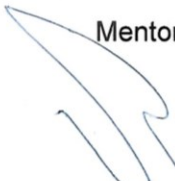
Priključenjem sve većeg broja izvora električne energije putem inverterskih tehnologija te smanjenjem udjela klasičnih sinkronih generatora, značajno se mijenjaju prilike u postojećim mrežama, koje gube prirodnu inerciju, inherentnu velikim sinkronim strojevima. Takvo stanje opasno je za stabilnost elektroenergetskog sustava te dugoročno nije održivo. U radu je potrebno opisati tehnološka rješenja kojima se omogućuje stvaranje virtualne inercije u elektroenergetskom sustavu. Objasniti primjenu baterijskih spremnika energije kao pružatelja usluge virtualne inercije. Objasniti nadomjesni model baterijskog spremnika energije za potrebe simulacije virtualne inercije te ispitati njegov utjecaj na simulacijskom modelu.

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

*Edvin Bosnić*


Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. dr. sc. Dubravko Franković

  
\_\_\_\_\_  
Doc. dr. sc. Tomislav Plavšić (komentor)

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. dr. sc. Viktor Sučić

## IZJAVA

Sukladno članku 8. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta u Rijeci od 1. veljače 2020., izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad prema zadatku preuzetom dana 21. ožujka 2022.

Rijeka, 20. rujna 2022

*Edvin Bosnić*

---

Edvin Bosnić

## **ZAHVALA**

*Zahvaljujem se mentoru Prof. dr. sc. Dubravku Frankoviću na iskazanom povjerenju i pomoći tijekom izrade diplomskog rada. Ujedno, htio bih se iskreno zahvaliti na ugodnoj i kvalitetnoj suradnji tijekom cjelokupnog studija.*

*Zahvaljujem se komentoru Doc. dr. sc. Tomislavu Plavšiću na konstruktivnim kritikama i savjetima koje su unaprijedile moj rad.*

*Zahvaljujem se svim asistentima i profesorima na fakultetu koji su na bilo koji način dali svoj doprinos i učinili moj boravak na studiju ugodnijim.*

*Zahvaljujem se prijateljima koji su učinili cijeli period studiranja zanimljivijim i bez kojih studij ne bi imao isto značenje. Iskreno hvala za svu pomoć, strpljenje i vrijeme koje su izdvojili za mene.*

*Veliko hvala mojoj djevojci Heleni Pejnović koja je uvijek bila uz mene i pružala mi podršku onda kada je to bilo najpotrebnije.*

*Na kraju bih se najviše htio zahvaliti svojoj obitelji za svu podršku pruženu u životu i tijekom studiranja. Hvala Vam na iskazanom povjerenju i vječnom osloncu u kojeg se uvijek mogu pouzdati.*

*Hvala Vam!*

*Edvin Bosnić*

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. POHRANA ELEKTRIČNE ENERGIJE .....	2
2.1. Obnovljivi izvori energije .....	2
2.2. Vrste sustava za pohranu električne energije .....	3
2.2.1. Mehanički sustavi.....	4
2.2.2. Električni sustavi .....	7
2.2.3. Elektrokemijski sustavi .....	10
2.2.4. Kemijski sustavi .....	13
2.2.5. Termički sustavi .....	14
2.3. Karakteristike sustava za pohranu električne energije .....	15
2.4. Sigurnosna razmatranja i procjena rizika kod BSEE .....	17
2.4.1. Sigurnosna razmatranja .....	17
2.4.2. Potencijalne opasnosti za BSEE .....	18
2.4.3. Procjena rizika kod BSEE .....	21
3. STABILNOST ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA.....	25
3.1. Vrste stabilnosti elektroenergetskog sustava.....	25
3.1.1. Kutna stabilnost.....	26
3.1.2. Naponska stabilnost.....	27
3.2. Regulacija frekvencije u elektroenergetskom sustavu .....	28
3.2.1. Primarna regulacija.....	29
3.2.2. Sekundarna regulacija .....	30
3.2.3. Tercijarna regulacija.....	32
4. TEHNOLOŠKA RJEŠENJA ZA STVARANJE VIRTUALNE INERCIJE.....	33
4.1. Obilježja inercije u EES-u.....	33
4.2. Uvod u virtualnu inerciju .....	35
4.2.1. Koncept virtualne inercije .....	38

4.3. Klasifikacija tehnoloških rješenja za implementaciju virtualne inercije.....	40
4.3.1. Sustavi temeljeni na modelu sinkronog generatora (sinkronverteri) .....	41
4.3.2. Sustavi temeljeni na jednadžbi njihanja .....	44
4.3.3. Sustavi temeljeni na karakterističnom odzivu snaga-frekvencija .....	45
4.3.4. Sustavi temeljeni na „proporcionalnom“ pristupu (eng. Droop-based approach).....	48
4.3.5. Ostali sustavi za implementaciju virtualne inercije.....	49
5. NADOMJESNI MODEL BSEE .....	52
5.1. Struktura modela baterije unutar BSEE .....	52
5.2. Struktura modela BSEE .....	55
6. SIMULACIJA VIRTUALNE INERCIJE S BSEE .....	60
6.1. Simulacija virtualne inercije u EES-u .....	60
6.1.1. Simulacija inercije sustava bez BSEE.....	62
6.1.2. Simulacija inercije sustava s BSEE.....	64
7. ZAKLJUČAK .....	66
LITERATURA.....	67
POPIS SLIKA .....	69
POPIS TABLICA.....	71
SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI.....	72
ABSTRACT AND KEYWORDS.....	73
PRILOG .....	74



## 1. UVOD

Kod razvijanja modernog elektroenergetskog sustava važna stavka je očuvanje okoliša i razvijanje sustava za iskorištavanje obnovljivih izvora energije (OIE). Obnovljivi izvori energije poput fotonaponskih elektrana i vjetroelektrana počinju sve više prodirati u EES, te tako EES proizvodi mješovitu električnu energiju zamjenjujući tradicionalne izvore energije kao što su ugljen i nuklearna energija.

Integracija OIE u EES uzrokuje da u sustavu u kojemu tradicionalno dominiraju rotacijski generatori, napreduje prema sustavu u kojemu dominiraju inverteri, odnosno inverterska tehnologija. Fotonaponski sustavi i većinski dio modernih vjetroagregata su povezani na EES preko invertera.

Problemi koji se javljaju u sustavima s dominantnom inverterskom tehnologijom je manjak inercije, odnosno brzina promjene frekvencije pri poremećajima što negativno utječe na stabilnost EES-a. Postojeće mreže gube svoju prirodnu inerciju koja je inherentna velikim sinkronim strojevima, te tako prilikom poremećajnih prilika, elektroenergetska mreža je podložnija većim promjenama kod frekvencije. Nestabilnost frekvencije i njena velika odstupanja od nazivne vrijednosti, mogu negativno utjecati na stabilnost EES-a, i samim time takav način rada nije dugoročno održiv.

Kao potencijalno rješenje problema s nedostatkom prirodne inercije nameće se rješenje implementacije virtualne inercije u EES. U nastavku su pružena tehnološka rješenja za implementaciju virtualne inercije, te su opisani pripadajući pristupi svake od njih.

U ovom diplomskom radu obrađena je simulacija utjecaja baterijskog spremnika energije na nadomjesni model mreže. Cilj ispitivanja je povećavanje inercije sustava pomoću virtualne inercije koju pruža baterijski sustav za pohranu energije. Program koji se koristi za računalnu simulaciju, je PowerFactory od tvrtke DlgSILENT.

## 2. POHRANA ELEKTRIČNE ENERGIJE

### 2.1. Obnovljivi izvori energije

Električna energija je prijelazni pojavni oblik energije odnosno predstavlja tranzijent u procesu pretvaranja potencijalne električne energije u neki drugi koristan oblik energije kao što su potencijalna, kinetička, svjetlosna energija ili mehanički rad.

Postoje konvencionalni i nekonvencionalni oblici energije gdje se njihova daljnja podjela može razvrstati u obnovljive i neobnovljive izvore energije. U tablici 2.1. prikazana je podjela primarnih oblika energije, neobnovljivi i obnovljivi izvori energija.

Tablica 2.1. Podjela energije s obzirom na obnovljivost izvora [1]

PRIMARNI OBLICI ENERGIJE	
OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE	NEOBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE
energija vjetra	zemni plin
biomasa	ugljen
sunčeva energija	nuklearna goriva
energija mora	sirova nafta
vodne snage	uljni škriljci
geotermalna energija	treset

Obnovljive izvore energije karakterizira njihovo prirodno obnavljanje čija se energija ne može iscrpiti kroz neki vremenski period, a neobnovljivi izvori energije su oni koji se njihovom potrošnjom zalihe smanjuju i kroz određeno vrijeme se mogu potpuno iscrpiti. [1]

## 2.2. Vrste sustava za pohranu električne energije

Sustavi za pohranu električne energije razlikuju se u odnosu na oblik energije koji se koristi.

U tablici 2.2. prikazana je podjela sustava za pohranu električne energije u odnosu na korišteni oblik energije, a u nastavku je opisano nekoliko sustava za pohranu električne energije.

Tablica 2.2. Podjela sustava za pohranu električne energije [2]

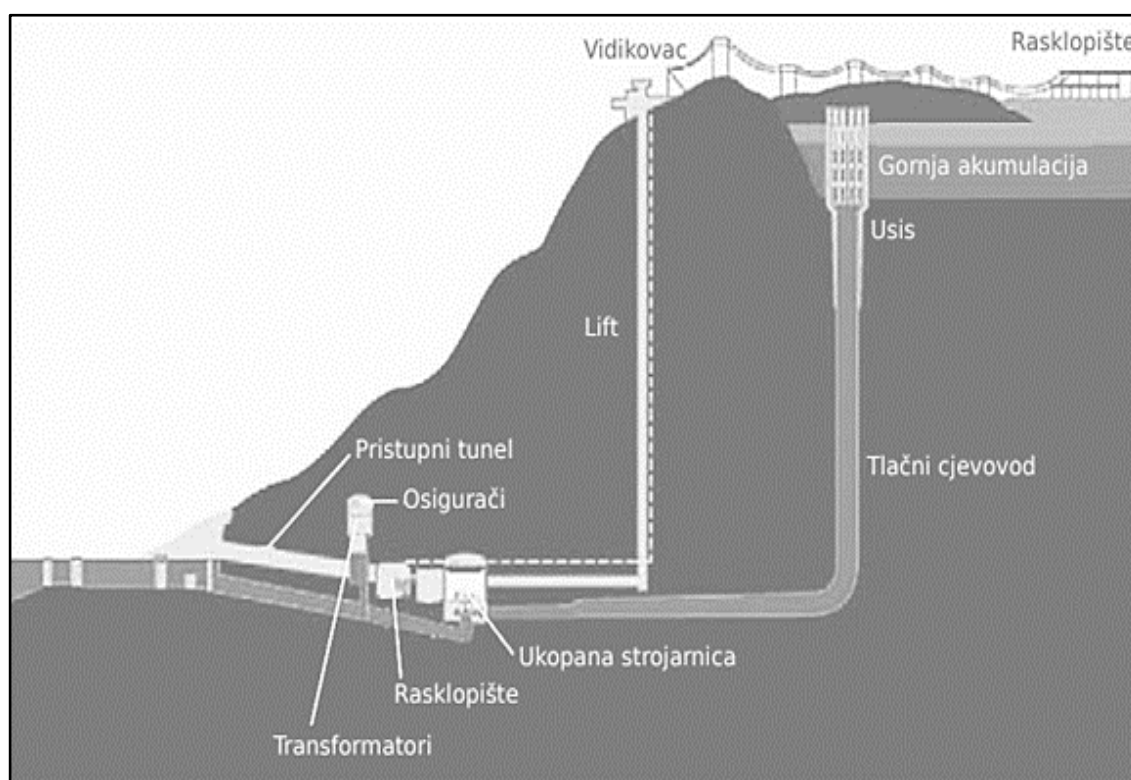
Sustavi za pohranu električne energije				
Mehanički	Elektrokemijski	Električni	Kemijski	Termički
<ul style="list-style-type: none"><li>• Crpno - akumulacijske hidroelektrane (eng. PHS)</li><li>• Komprimirani zrak (eng. CAES)</li><li>• Zamašnjak (eng. FES)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Sekundarne baterije (eng. LA/NiCd/NiMH/Li/NaS)</li><li>• Protočne baterije (eng. Redox/Hybrid flow)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Superkondenzator (eng. DLC)</li><li>• Supravodljivi magnetski svitak (eng. SMES)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Vodik (eng. Electrolyser/Fuel cell/SNG)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Osjetljiva pohrana topline (eng. Molten salt/ A-CAES)</li><li>• Latentna pohrana</li></ul>

Sintetički prirodni plin i hidrogen su sekundarni prijenosnici energije, te mogu biti korišteni za pohranjivanje električne energije pomoću elektrolize vode gdje se proizvede hidrogen. Ako bi išli korak dalje može se proizvesti i metan prema potrebi. Struja se generira u gorivim ćelijama tako da se oksidiraju hidrogen i metan. [2]

Opisana kombinacija procesa elektroliza - gorive ćelije spadaju pod elektrokemijske sustave za pohranu električne energije. Pod kemijske sustave za primjer se može dati slučaj gdje se struja generira u plinovima ili u plinskoj turbini. Kod toplinskih sustava za pohranu električne energije u većini slučajeva nemamo direktni ulaz struje u takve sustave, ali uz pomoć toplinskih sustava ukupna energija obnovljivih izvora energije može biti povećana te se struja može proizvesti po potrebi. [2]

### 2.2.1. Mehanički sustavi

Kod mehaničkih sustava najčešće se spominju crpno-akumulacijske hidroelektrane, komprimirani zrak i zamašnjak. Prva crpno-akumulacijska hidroelektrana koristila se u Italiji i Švicarskoj 1890-ih. Reverzibilne turbine/pumpe sa motorima/generatorima su već bile dostupne do 1933 godine. Crpno-akumulacijske hidroelektrane (eng. Pumped hydro storage) koriste dva rezervoara s vodom koji su na različitim uzvisinama kako bi prilikom malog opterećenja došlo do pumpanja vode iz rezervoara niže uzvisine u rezervoar više odnosno dolazi do „punjenja“. U slučaju kada je to potrebno, voda iz gornjeg rezervoara teče u donji te tako se napaja turbina s generatorom koja proizvodi električnu energiju, odnosno dolazi do „pražnjenja“. Primjer gdje bi se crpno-akumulacijska hidroelektrana mogla postaviti su visoke brane. [2]



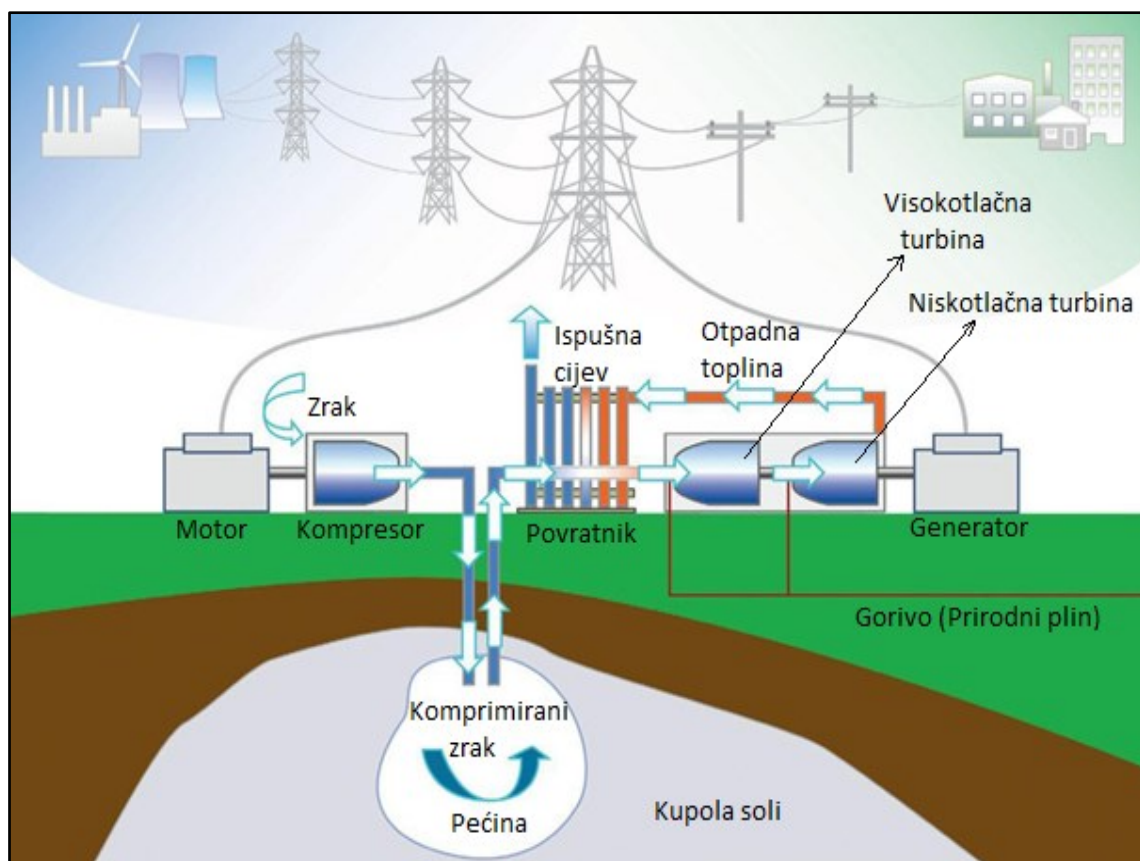
Slika 2.1. Shema reverzibilne (pumpno akumulacijske) hidroelektrane [3]

Važno je dodatno naglasiti te iz drugačijeg kuta opisati rad reverzibilne hidroelektrane. Znači kod reverzibilnih hidroelektrana turbina može raditi kao pumpa. U onom trenutku kada imamo jeftinu električnu energiju, umjesto da se koristi hidroelektrana za dobivanje električne energije, mi ju možemo koristiti za rad u modu pumpe i onda iz donjeg jezera dovodimo vodu u gornju akumulaciju. U suprotnom slučaju rotor radi u modu turbine.

Mana ovakvog sustava je kada rotor radi kao turbina i kao pumpa pa zbog toga ima nizak stupanj djelovanja. Efektivnost crpno-akumulacijskih hidroelektrana je u intervalu između 70% do 85% te ovise o topografskim uvjetima što im je ujedno glavni nedostatak. S druge strane prednost im je što imaju dug vijek trajanja. Prosječno vrijeme koje je potrebno za pražnjenje kod reverzibilnih hidroelektrana je u rasponu od nekoliko sati do nekoliko dana. [2]

Sustav pohrane električne energije pomoću komprimiranog zraka je tehnologija koja je poznata i koristi se još od 19. stoljeća u različitim industrijskim primjenama. Zrak se koristi kao medij zbog svoje dostupnosti. Pomoću električne energije se komprimira zrak pa se pohranjuje u podzemnu strukturu ili u nadzemnom sustavu cijevi ili spremnika. Komprimirani zrak se miješa s prirodnim plinom te izgara se i širi u modificiranoj plinskoj turbini, onda kada je potrebno. [2]

Tipična mjesta za pohranu mogu biti pećine odnosno špilje i napušteni rudnici, a prikaz sustava za pohranu energije komprimiranim zrakom je prikazan na slici 2.2. ispod.



Slika 2.2. Sustav za pohranu energije komprimiranim zrakom [2]

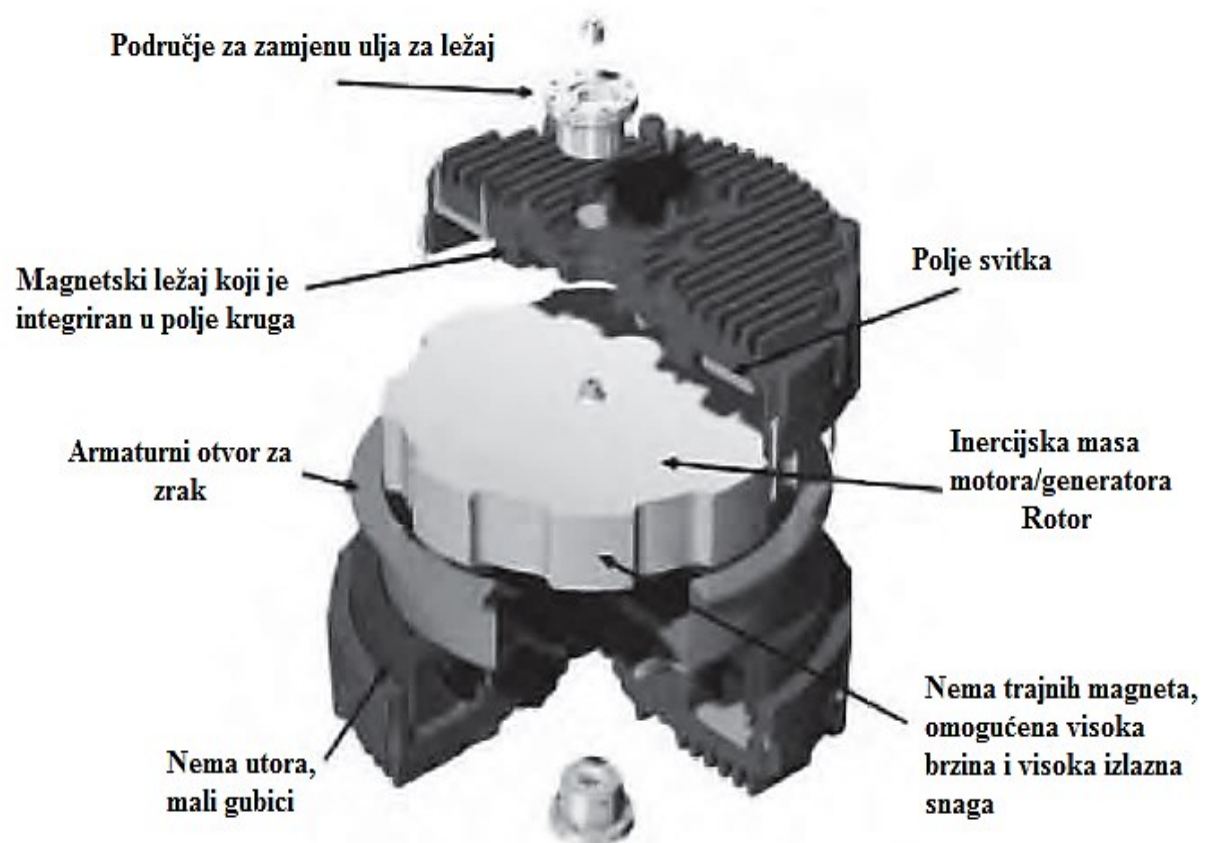
Prednost sustava sa komprimiranim zrakom je veliki kapacitet, a nedostaci su ovisnost o specifičnom (ograničenom) geografskom položaju, te niska učinkovitost [2].

Kod mehaničkog sustava za pohranu električne energije treba spomenuti i sustav pohrane sa zamašnjakom. Ubrzani rotor Kod zamašnjaka rotacijska energija je pohranjena u ubrzanom rotoru masivno rotirajućeg cilindra. Prvi zamašnjaci bili su dostupni oko 1970-ih. [2]

Glavne komponente kod zamašnjaka su :

- cilindar/rotirajuće tijelo,
- ležajevi i
- uređaj za prijenos (motor/generator koji se montiran na statoru).

Energija u zamašnjaku je održana tako da se drži rotacijsko tijelo pri konstantnoj brzini, a ako dođe do ubrzanja to znači da je više električne energije pohranjeno. Uređaji za prijenos mogu poslužiti i za dovodenje i odvođenje energije. Odnosno, kada se smanjuje rotacijska brzina zamašnjaka, pomoću prijenosnog uređaja se odvodi električna energija. Zamašnjak ubrzava tada kada se električna energija dovodi sa prijenosnim uređajem. [2]

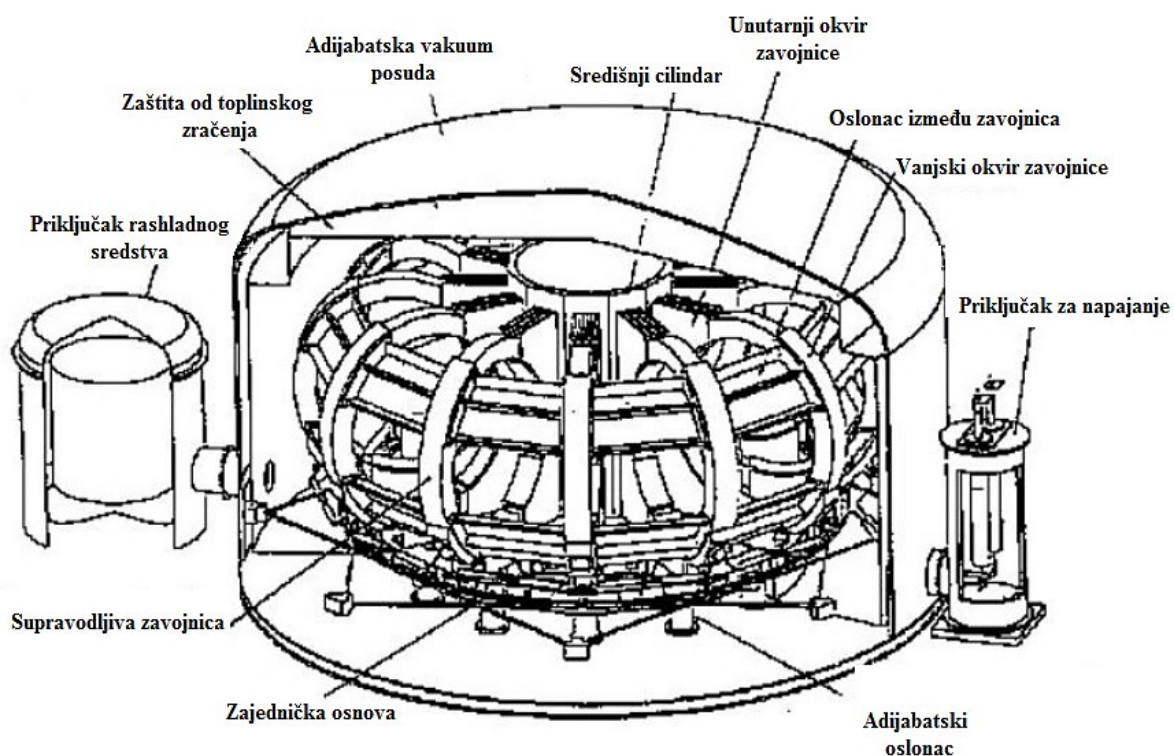


Slika 2.3. Zamašnjak [2]

## 2.2.2. Električni sustavi

Pod električne sustave spomenuti će se super kondenzatori te supravodljivi magnetski svitak. Što se tiče supravodljivog magnetskog svitka njegov princip rada je baziran na principu elektrodinamike, a energija se pohranjuje u magnetskom polju. [2]

Magnetsko polje je produkt toka istosmjerne struje u supravodljivom svitku kod kojeg je temperatura niža od njegove kritične temperature supravodljivosti. Temperatura od 4°K je bila ključna za otkrivanje supravodljivosti prije 100 godina. [2]



Slika 2.4. Supravodljivi magnetski svitak [4]

Prednosti sustava za supravodljivim magnetskim svitkom [2] :

- brzi vremenski odziv (gotovo trenutna dostupnost tražene snage),
- velika povratna učinkovitost (iznosi 85% - 90%) i
- velika snaga (raspoloživost u vrlo kratkom roku).



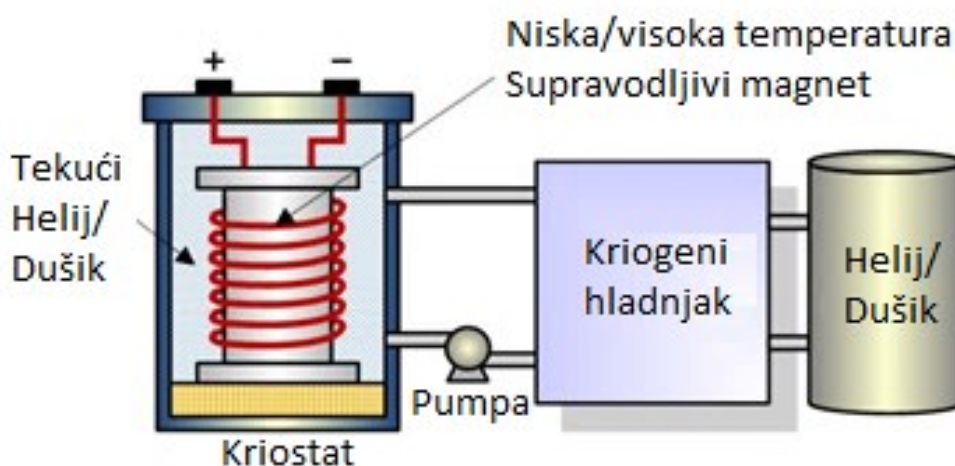
S materijalima za izradu supravodljivog magnetskog svitka današnjice, supravodiči mogu raditi i na temperaturama oko 100°K. Za dobivene rezultate za postizanje supravodiča s visokim kritičnim temperaturama zaslužni su velika količina istraživanja utrošena u to i malo sreće. [2]

Općenito visokotemperaturni supravodiči po definiciji su supravodiči gdje je temperatura supravodljivog prijelaza iznad 30 K, a temperatura koja se nalazi u kontekstu visokotemperaturne supravodljivosti mora ispunjavati sljedeće uvjete :

- Temperatura iznad točke vrenja tekućeg dušika (77 K),
- Omjer  $T_C/T_F$  je veći nego u konvencionalnim supravodičima i
- Da je visoka temperatura, temperatura iznad 30 K koja je kroz povijest uzeta kao gornja granica koju je teoretski predviđala BCS teorija.

Materijali koji se koriste kod visoke temperature se često koriste upravo zbog više prijelazne temperature i veće otpornosti supravodljivosti na magnetska polja. Što se tiče supravodljivog magnetskog svitka i njegovog načina za pohranu, postoje glavne i dodatne komponente. Pod glavnu komponentu koja se ističe u ovom sustavu je supravodljiva zavojnica odnosno zavojnica koja je izrađena od supravodljivih materijala. Što se tiče dodatnih komponenti pod taj dio spadaju rashladni sustav i njeno napajanje. [2]

Ukupna pouzdanost ovakvog sustava temelji se na sustavnom rashlađivanju, a sve dok sustav hlađenja radi, energija se može pohraniti na neodređeno vrijeme. Ako bi se javila potreba za dugoročno pohranjivanje električne energije, tada je u ovom sustavu ono ograničeno s energetske potrebama rashladnog sustava. [2]

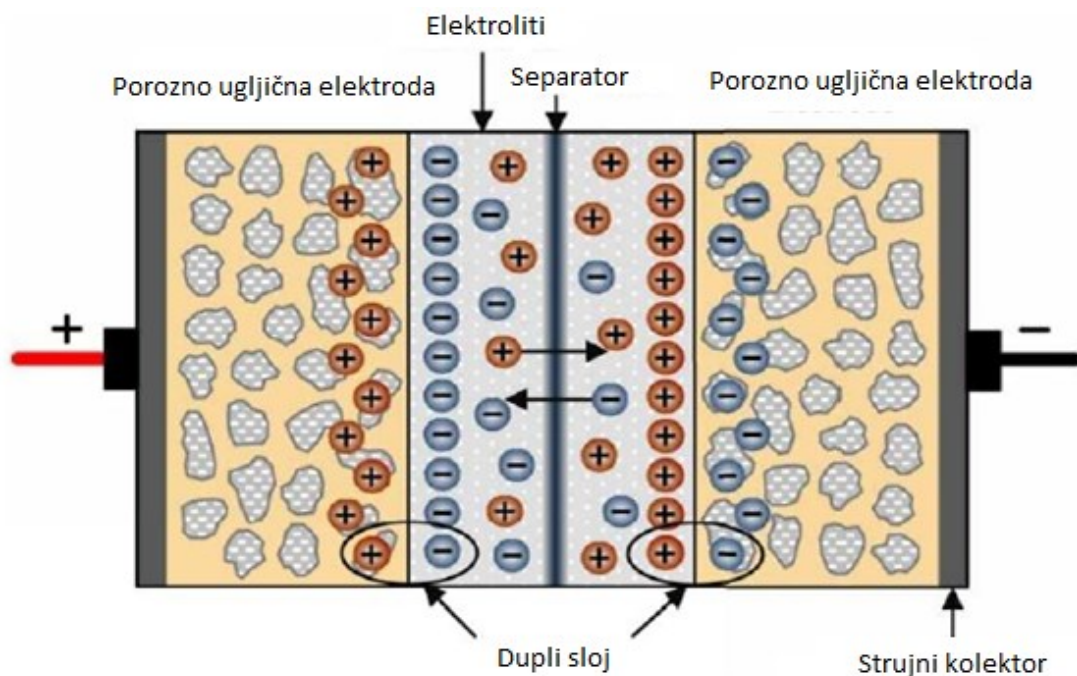


Slika 2.5. Sustav za pohranu el. energije pomoću supravodljivog magnetskog svitka [5]



Sustavi s više od 10 MW većinom se koriste kod detektora čestica kod eksperimentalne fizike nuklearne fuzije i visoke energije, a kada je riječ o manjim sustavima oni se koriste većinom kod kontrole kvalitete električne energije u proizvodnim pogonima. [2]

Super kondenzatori su druga vrsta kod električkih sustava za pohranu. Oni su elektrokemijski kondenzatori s dvostrukim slojem, te je to tehnologija koja je poznata već 60 godina. Ovakvi kondenzatori imaju gotovo neograničenu stabilnost ciklusa te ih karakterizira velika snaga a s time i veća mogućnost pohrane električne energije u usporedbi s tipičnim kondenzatorima. [2]



Slika 2.6. Slika simetričnog sustava za pohranu energije pomoću superkondenzatora [5]

U budućnosti se vidi veliki potencijal u razvoju superkondenzatora jer bi se mogla razviti veća kapacitivnost i energetska gustoća u usporedbi s postojećim konvencionalnim kondenzatorima, a gdje se postiže i dizajn kompaktne strukture. [2]

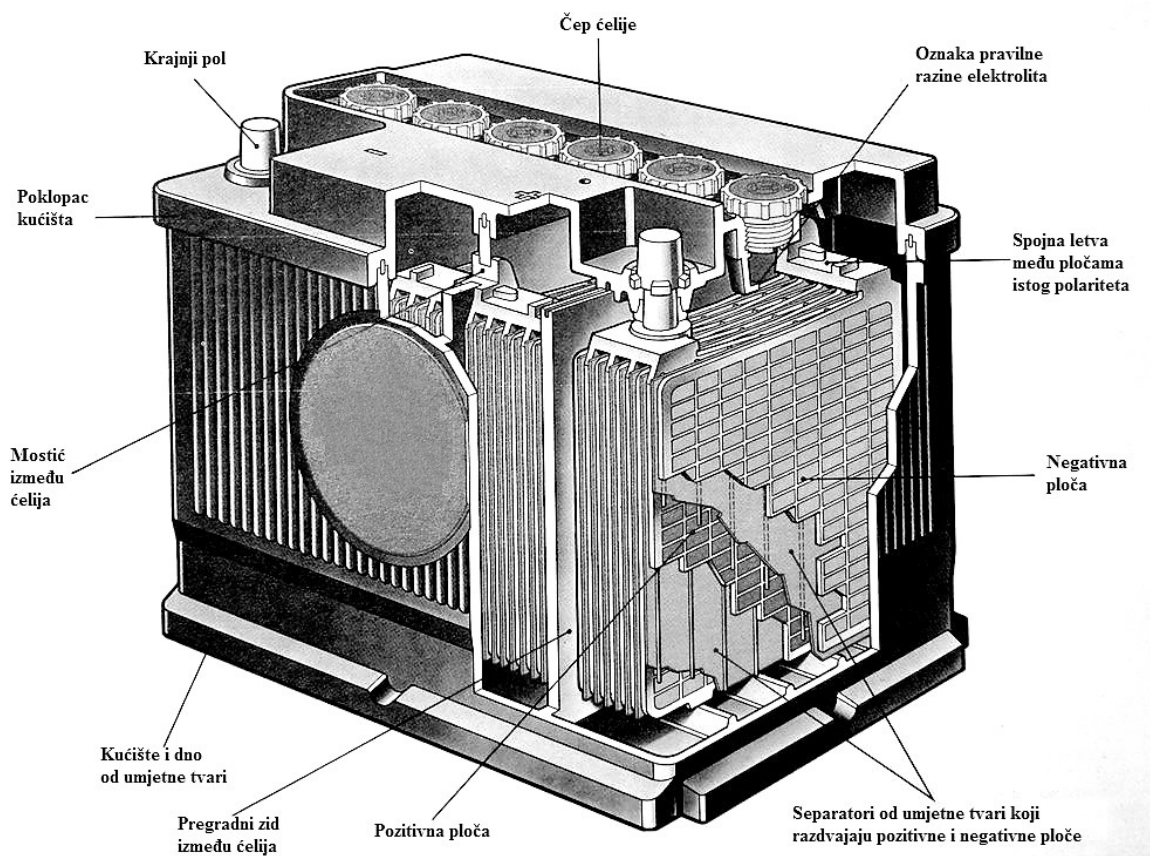
Prednosti sustava za pohranu energije pomoću superkondenzatora:

- visoka vrijednost kapacitivnosti (nekoliko tisuća farada [F] ),
- mogućnost brzog punjenja i pražnjenja (razlog tome je mali unutarnji otpor),
- vrlo izdržljiv, pouzdan i dugi vijek trajanja,
- nema posebnog održavanja,
- funkcionalnost u širokom spektru temperatura i u različitim uvjetima (vruće, hladno i vlažno)

### 2.2.3. Elektrokemijski sustavi

Kod elektrokemijskih sustava postoje razne vrste baterija poput redoks protočnih, hibridnih protočnih, natrij-sumpor baterija i ostalih. U nastavku su opisane neke češće korištene baterije kao što su: olovno-kiselinska baterija, nikal-kadmij i nikal – metalno hidridna baterija i litij-ionske baterija, te one zapravo predstavljaju par primjera sekundarnih baterija

Najkorištenije baterije u svijetu su olovno-kiselinske baterije (LA), te su u komercijalnoj upotrebi od oko 1890. godine. Tipično se koriste kod sustava za nužna napajanja, samostalnih sustava s fotonaponom, sustava baterija za ublažavanje izlazne fluktuacije iz energije vjetra i kao akumulatori u vozilima. Uporaba ovih baterija je i mobilna i stacionarna, gdje stacionarne baterije moraju biti izvedene s puno većom kvalitetom. Prosjek njihovog rada je između 6 i 15 godina gdje je životni vijek definiran kroz 1500 ciklusa na 80% dubine pražnjenja s 80-90% kružne učinkovitosti. Kod ovih baterija tehnologija je dobro istražena te se nude dobre cijene. Iako su za stacionarne baterije troškovi i dalje puno veći od troškova akumulatora, masovnom proizvodnjom olovno-kiselinskih baterija za stacionarne sustave se može dovesti do pada cijena. [2]

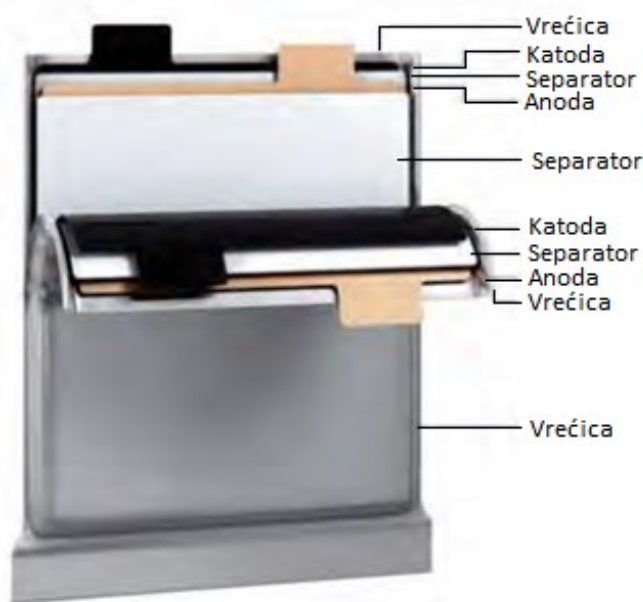


Slika 2.7. Primjer olovno kiselinskog akumulatora [6]

Prednosti olovno-kiselinskih baterija predstavlja omjer cijene i performansi, punjenje na principu jednostavne tehnologije i laka reciklaža, a nedostaci su smanjeni korisni kapacitet prilikom pražnjenja veće količine energije, te niža gustoća energije i korištenje olova.

Nikal-kadmij i nikal-metal hidrid baterije (NiCd, NiMH) u usporedbi s olovno kiselinskim baterijama imaju veći broj ciklusa i veću gustoću energije. Promatrajući s tehničkog stajališta, ove baterije su jedine koje imaju sposobnost rada i pri niskoj temperaturi ( $-20^{\circ}\text{C}$  do  $-40^{\circ}\text{C}$ ). Kod većih sustava Ni-Cd baterija princip rada je kao i kod olovno kiselinskih baterija, ali zbog kadmija koji je toksičan ovakav tip baterije koristi se samo kod stacionarnih primjena u Europi, a već od 2006. godine su postale zabranjene za korištenje. Zamjenu za nikal-kadmij baterije predstavljaju nikal-metal hibrid baterije koje su u komercijalnoj upotrebi od oko 1995. godine. Sadrže pozitivne karakteristike nikal-kadmij baterija s jednom iznimkom kod maksimalne vrijednosti nazivne snage gdje je ona manja za deset puta u odnosu na Ni-Cd i LA baterije. Što se tiče energetske gustoće kod nikal-metal hibrid baterije ona je znatno veća u odnosu na nikal-kadmij baterije. [2]

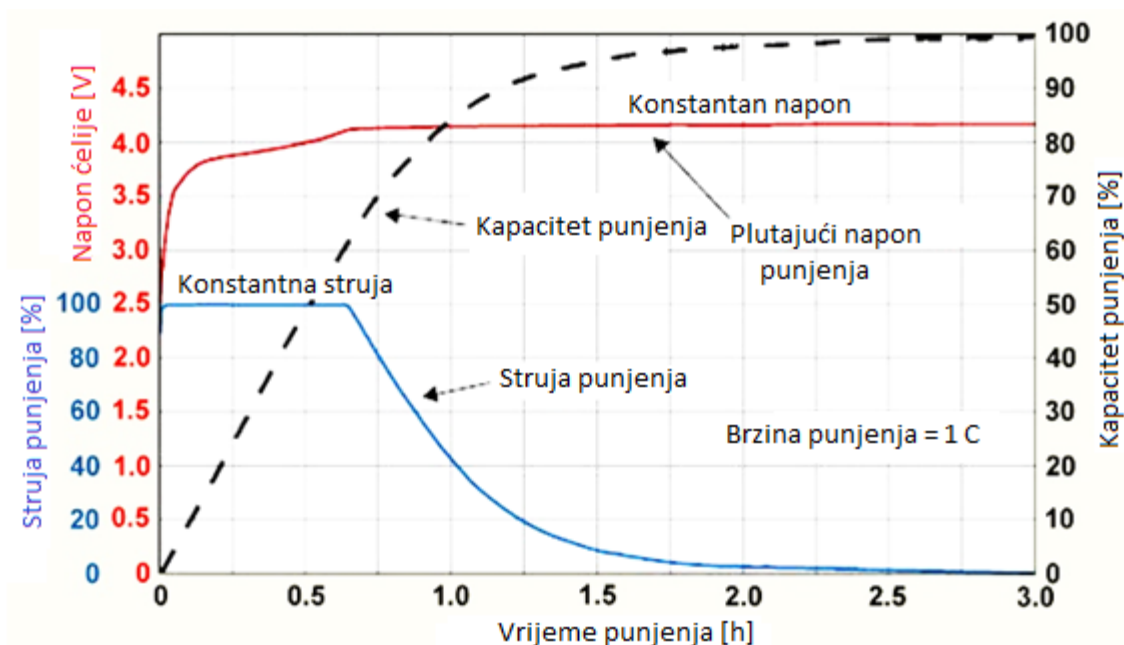
Litij-ionske baterije imaju znatno veću energetska učinkovitost od nikal-kadmij i nikal-metal hidrid baterija, drugim riječima za isto vrijeme rada su potrebne mnogo manje i lakše baterije. Kod NiCD i NiMH baterija potrebno je punjenje kada je baterija prazna da ne dođe do smanjenja njihovog kapaciteta, te prilikom njihovog nekorištenja baterije se prazne same od sebe. Prilikom skladištenja Litij-ionskih baterija dolazi do sporijeg pražnjenja, te za razliku od baterija na bazi nikla neće se isprazniti ako se ne koriste.



Slika 2.8. Li-ion baterija prizmatog oblika [2]

Učinkovitost Li-ion baterija je u rasponu od 95 - 98% i one mogu postići razna vremena pražnjenja u rasponu od sekunde pa do tjedna što ih čini fleksibilnijim tehnologijama za pohranu, odnosno univerzalnim tehnologijama. Standardne ćelije imaju 5000 punih ciklusa, te u odnosu o materijalu elektrode moguće su i veće stope ciklusa.

Litij-ionske baterije imaju visoku cijenu i zbog toga se za primjenjivanje u sustavima gdje je potražnja za kratkim vremenom pražnjenja, mogu natjecati s olovno-kiselinskim baterijama. Primjer takve potražnje je kod rezerve za primarnu regulaciju.[2]



Slika 2.9. Primjer krivulje punjenja jedne Li-ion baterije [9]

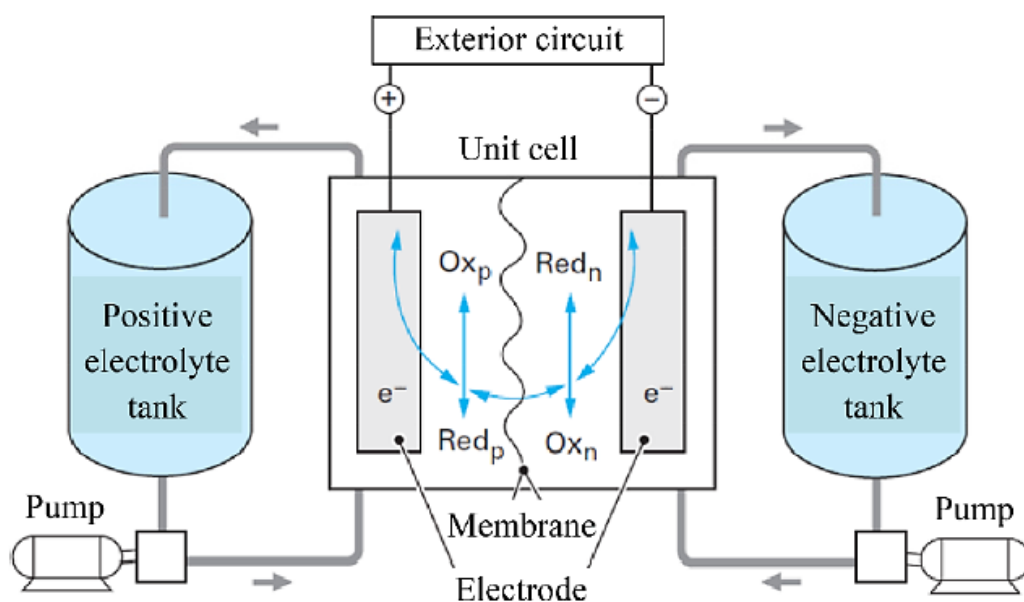
Kod tehnologije Li-ion baterija javljaju se određeni problemi s sigurnošću. Litij-ionske baterije imaju ugrađenu jedinicu za nadzor u svrhu izbjegavanja prekomjernog punjenja i pražnjenja. Prekomjerna punjenja i pražnjenja mogu nepovoljno djelovati jer većina metal-oksidnih elektroda imaju toplinsku nestabilnost, te postoji mogućnost razgrađivanja pri većim temperaturama. Dalje može doći do oslobađanja kisika i može doći do termičkog pobjega.

Pomoću jedinice za nadzor smanjuje se taj rizik. Osim navedenog nadzora, najčešće postoji i ravnotežni naponski krug koji služi za nadziranje naponskih razina svake pojedine ćelije s ciljem sprječavanja naponskog odstupanja između njih. Litij-ionska tehnologija se još uvijek razvija i ima značajan potencijal za daljnje napredovanje.

## 2.2.4. Kemijski sustavi

Za primjer kemijskih sustava može se uzeti skladištenje energije pomoću vodika (eng. Hydrogen storage). Kod skladištenja energije pomoću vodika koristi se elektrolizer. Tijekom perioda pohrane elektrolizer razdvaja vodu na kisik i vodik prema jednadžbi  $2\text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ . Taj plin je onda pohranjen u tekućem, komprimiranom ili čvrstom obliku, gdje postoje tri različita načina implementacije energije u mrežu iz vodika [10]:

- Napajanje gorivne ćelije, pretpostavlja se da će vodik biti obrađen kako bi se postigla određena razina njegove čistoće,
- Sinteza prirodnog plina s procesom metanizacije, pomoću direktnog umetanja u postojeću plinsku mrežu, ili da se koristi za napajanje klasičnog plinskog postrojenja za proizvodnju električne energije.
- Direktno korištenje vodika u specijalno dizajniranom plinskom postrojenju namijenjeno za ovu svrhu.



Slika 2.10. Princip rada baterije s sustavom za cirkulaciju elektrolita [10]

S obzirom na vrlo visoku energetska gustoću i na mogućnost pohrane velike količine energije, tehnologija skladištenja energije pomoću vodika je od velikog interesa. S druge strane postoje i određeni nedostaci koji prate ovu tehnologiju a to su niska efikasnost procesa (oko 30% najviše), visoki troškovi, ograničena snaga, kratki životni vijek elektrokemijskih komponenata i činjenica da vodik predstavlja specifična sigurnosna pitanja. [10]

### 2.2.5. Termički sustavi

Kod termičkih sustava za pohranu energije postoje dva pristupa:

- Osjetljiva pohrana topline (eng. sensitive-heat storage),
- Latentna pohrana topline (eng. latent-heat storage).

Osjetljiva pohrana topline funkcionira na jednostavnom fizikalnom principu koji se sastoji od punjenja i pražnjenja količine energije u materijalu i uzrokujući variranje njegove temperature. Količina pohranjene energije je dakle direktno proporcionalna masi korištenog materijala, njegovoj kalorijskom kapacitetu i temperaturnoj varijaciji. [10]

Više od pola stoljeća, kemijska industrija je koristila otopljene soli kombiniranjem funkcije premještanja i pohrane fluida. Široku primjenu ima i korištenje osjetljivo-toplinske pohrane s čvrstim materijalima. Ovakvi toplinski regeneratori korišteni su kod industrije stakla i metala koji koriste vatrootpornu keramiku, beton ili fluidizirane slojeve pijeska u solarnim tornjevima. [10] Iako ima veću energetska gustoću, latentno skladištenje (tekućina-para) je teško iskoristiti zbog prevelikog volumena koji zauzima parna faza.

Na drugoj razini, latentna toplina (tekućina-kruto), gdje je kapacitet pohranjivanja niži, ali još uvijek mnogo veći od onog kod osjetljive topline, detljano je proučavana za pohranjivanje u širokom temperaturnom rasponu.

U ispitivanom temperaturnom području (reda 650°C) mogu se koristiti samo anorganske soli, ali ostaje za procjenu cikličke stabilnosti njihovih svojstava. [10]

### 2.3. Karakteristike sustava za pohranu električne energije

Postoje različite tehnologije spremnika električne energije koje isto tako imaju različite karakteristike gdje je za svaku nešto specifično. U odnosu na to, potrebno je odabrati tehnologiju koja bi najviše odgovarala za određeni slučaj kako bi se mogao iskoristiti maksimalni potencijal, te kako bi odabrana tehnologija bila prikladna za obavljanje određenih funkcija u elektroenergetskom sustavu. U tablici 2.3. su pregledno prikazane neke od tehnologija za pohranu energije sa svojim osnovnim karakteristikama. [11]

Tablica 2.3. Prikaz tehnologija spremnika električne energije [11]

Tehnologija	Snaga [MW]	Gustoća energije [Wh/dm <sup>3</sup> ]	Vrijeme pražnjenja	Vrijeme odziva	Samopražnjenje	Učinkovitost [%]
Crpno – akumulacijske hidroelektrane	100 – 3000	0,2 – 2	1-24 h+	min	malo	70 – 85
Sustavi pohrane energije komprimiranim zrakom	do 300	2 – 6	1-24 h+	min	malo	40 – 70
Pohrana energije pomoću zamašnjaka	0,1 – 20	20 – 80	1 s – 15 min	sek	veliko	85 – 95
Baterijski sustavi za pohranu električne energije	0 – 50	20 – 400	1 min – 24h+	ms	malo – umjereno	60 – 80
Proizvodnja i skladištenje vodika (gorivni članci)	do 60	600	1 min – 24h+	sek	malo	30 – 40
Superkondenzator	0 - 0,3	10 – 20	1 ms – 1 min	ms	veliko	84 – 97
Toplinski sustavi za pohranu energije	0,1 - 250	80 - 250	1 h – 10 h	minute	veliko - umjereno	30 - 60

BSEE predstavljaju neizostavnu stavku u modernijim distribucijskim sustavima. Od usluga baterijskih sustava koje mogu pružiti, mogu profitirati svi subjekti koji su prisutni na toj distribucijskoj mreži, naravno uz njihovo promišljeno dimenzioniranje i lociranje. [11]

Tablica 2.4. Usluge koje baterijski sustav pohrane može pružiti distribucijskom sustavu [11]

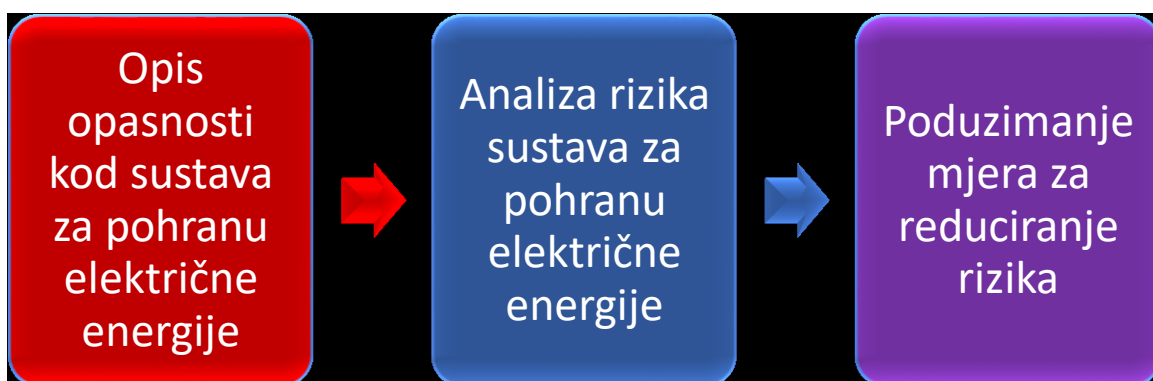
<b>Usluga BSEE</b>	<b>Napomena</b>
<b>Upravljanje zagušenjem</b>	Ako imamo normalan pogon, BSEE ima mogućnost rasterećenja elementa ili dijela mreže. S time postiže se smanjenje opterećenja elemenata mreže, te se odgađa potreba za ulaganjima u mrežu. Dolazi do povećavanja iskoristivosti postojeće mreže.
<b>Doprinos regulaciji napona</b>	Po potrebi se upravlja s usmjerivačem s djelatnom i jalovom snagom. Razlog tome je održavanje napona u zadanim granicama. Tako dolazi do povećavanja sposobnosti prihvaćanja OIE gdje se smanjuje broj isključivanja zbog prenapona.
<b>Povećanje kvalitete napona i pouzdanosti</b>	Ograničavanje prekida napajanja ili uskraćivanje trajanja, mogućnosti brzog odziva na događanja u mrežama, korisnikovo napajanje izvanrednoj vrsti pogona (otočni rad, mobilni izvor napajanja), privremene mjere do uspostavljanja novog uklopljenog stanja.
<b>Crni start</b>	Pomoću BSEE se može omogućiti aktivna rezerva snage i energije u mreži, te se može koristiti kod uspostave rada prijenosne i distribucijske mreže. Osiguranje povratka elektrane na mrežu nakon havarije.
<b>Otočni pogon</b>	Korištenje BSEE može pomoći kod kontroliranog otočnog pogona gdje se na taj način osigurava napajanje potrošača prilikom dužih poremećaja.



## 2.4. Sigurnosna razmatranja i procjena rizika kod BSEE

### 2.4.1. Sigurnosna razmatranja

IEC62933 - 5 - 1 je dokument koji opisuje sigurnosna razmatranja baterijskih spremnika u elektroenergetskom sustavu. Pristup koji je korišten u ovom dokumentu je prikazan na slici 2.11. gdje se opisuje na vrlo jednostavan način u tri generalna koraka kako se provode određena sigurnosna razmatranja. [12]



*Slika 2.11. Generalni opis pristupa sigurnosnim razmatranjima [12]*

Prvi dio je opis opasnosti kod sustava za pohranu električne energije gdje se opisuju različite potencijalne opasnosti koje su povezane sa spremnikom električne energije koje su fokusirane na vrstu sustava, lokaciju, veličinu i kako može utjecati i kako na njega može utjecati njegovo okruženje. Drugi dio je analiza rizika sustava za pohranu električne energije koji opisuje provođenje procjene rizika za sve stavke koje su navedene i opisane u prvom dijelu.

Treći dio opisuje mjere koje je potrebno implementirati da bi se reducirao rizik. Mjere koje se implementiraju su bazirane na procjenama iz drugog dijela gdje se analizira rizik sustava. [12]

## 2.4.2. Potencijalne opasnosti za BSEE

Potencijalne opasnosti kod sustava za pohranu električne energije su :

- električke,
- mehaničke i
- ostalo (eksplozije, požari, električno, magnetsko i elektromagnetsko polje, temperaturna opasnost, kemijska, nepovoljni uvjeti rada ).

Što se tiče električnih opasnosti, struja putuje kroz zatvoren strujni krug, normalno kroz vodič. Ali ponekad ljudsko tijelo (u neposrednoj blizini), voda pa čak i zrak mogu biti vodiči struje, te nenamjerno mogu postati dio električnog kruga. [12]

Prijenos električne energije se događa kada su u kontaktu dva ili više električnih kontakata i ljudsko tijelo između dijela tijela i vodljivog dijela opreme i između nekog drugog dijela tijela i zemlje, vode ili nekog drugog vodljivog dijela opreme. [12]

Kada osoba doživi električni udar, struja struji između dijelova tijela ili kroz tijelo u zemlju. Ovisno o magnitudi, trajanju, obliku vala i o frekvenciji struje, utjecaj na tijelo čovjeka varira između primjetnih i neprimjetnih, sve do bolnih i onih koji mogu ozlijediti. Najčešća posljedica električnog udara su opekline, ali električni udar također može uzrokovati fibrilaciju ventrikula. Pored električnih udara može se dogoditi električni bljesak gdje dođe do svojevrsne eksplozije prilikom kratkog spoja, što može dovesti do ozljeda a ujedno i do požara.

Mogu se dogoditi opekline koje se uzrokovane požarom kada vatra zahvati odjeću prilikom električnog luka. Granice električnog bljeska moraju se odrediti kako bi se uspostavio određeni stupanj zaštite po kojemu se određuje potrebna zaštitna oprema za osoblje koji su uključeni u održavanje i druge poslove, odnosno koji su vezani za bilo kakvu opremu koja je pod naponom.

Statički elektricitet može također uzrokovati šokove te se ujedno može isprazniti na neki objekt ali sa ozbiljnim posljedicama, gdje se na nekom dijelu objekta skuplja visoki stupanj elektriciteta uzrokovan trenjem. Ovakve stvari se mogu dogoditi jednostavno kroz rukovanje sa plastičnim cijevima, materijalima ili tijekom normalnih radnji gumenastih pogona i remenja kod strojeva što se često može pronaći u postrojenjima. Treba ujedno napomenuti da električne opasnosti mogu također nastati kroz neprimjerenju proceduri gašenja požara. [12]

Mehaničke opasnosti opisuju pojavu prijenosa kinetičke energije u dio tijela kada dođe u kontakt sa nekim dijelom postrojenja odnosno sa nekim dijelom opreme. Kinetička energija je funkcija relativnog gibanja između nekog dijela tijela i dijelova opreme koji su dohvatiljivi, uključujući i dijelove koji mogu odletiti prilikom neke greške u postrojenju. [12]

Neki primjeri izvora kinetičke energije :

- kretanje tijela u odnosu na oštre rubove i kuteve,
- djelomično kretanje zbog rotacije ili kretanja drugih dijelova,
- djelomično kretanje zbog labavosti ili eksplozije,
- kretanje (pomicanje) opreme zbog nestabilnosti,
- pomicanje opreme prilikom raznog montiranja na zid ili strop,
- pokretanje opreme zbog pogrešnog upravljanja,
- djelomično pomicanje zbog baterijske eksplozije,
- kretanje opreme zbog nestabilnosti ili kvara kolica ili postolja,
- pomicanje (premještanje) opreme zbog mehaničkih vibracija ,
- pomicanje prilikom interakcije opreme sa prirodnim rizicima (poplava, potres).

Pod mehaničku traumu uključujemo trenje, tlak, abrazivnost, razderivost i kontuzije (ozljede) koji mogu uzrokovati manje ili više ozbiljne povrede. [12]

Eksplozijske opasnosti podrazumijevaju ubranu ekspanziju plinova koji rezultiraju rapidnom kretanju tlaka ili udarnom valu. Eksplozije su klasificirane u odnosu na prirodu sustava odnosno na njenu transformaciju, i uobičajeno eksplozije fizičke i kemijske vrste su ugašene. [12]

Kemijska eksplozija može nastati zbog pribjegivanja egzotermne kemijske reakcije ili razgradnje nestabilne tvari. Potencijalne opasnosti koje su povezane sa eksplozivnom atmosferom oslabljaju se kada se zapale učinkovitim izvorom paljenja. [12]

Kod općenitih eksplozija krutih tvari, tekućina ili plinova, dijelimo ih na dve vrste a to su brzo sagorijevajuće i eksplozijske. Eksplozije ugrožavaju živote i zdravlje onih koji su izloženi, kao rezultat nekontroliranih efekata plamena i tlaka, prisutnosti štetnih reakcija produkata i ostalih.

Opasnost od požara nastaje kada gorivi materijali, oksidanti i energija zapaljivosti su prisutni u dovoljnim količinama na istom mjestu u isto vrijeme. Gorivi materijali mogu biti u čvrstom, tekućem i plinovitom stanju organske ili anorganske prirode. Potrebno je odrediti koji izvor paljenja postoji i koji može nastati.

Mogući izvori zapaljivanja mogu proizaći pod utjecajem :

- toplinske energije,
- električne energije,
- mehaničke energije i
- kemijske energije.

Kod potencijalnih opasnosti treba spomenuti nezadovoljavajuće uvjete rada. Radno mjesto i uvjeti trebaju biti prilagođeni riziku ozljeda mišićno-koštanih poremećaja koji ovise o poziciji posla, koliko često se odrađuju određeni zadatci, stupanj potrebnog truda i koliko dugo traje zadatak koji je potrebno odraditi. [12]

Faktori rizika koji mogu dovesti do razvijanja mišićno-koštanih poremećaja uključuju :

- korištenje prekomjerne sile prilikom dizanja teških objekata, guranja ili povlačenja teškog tereta. Ručno lijevanje materijala, održavanje kontrole opreme ili alata.
- izvođenje istih ili sličnih zadataka konstantno. Izvođenje istog pokreta ili serije pokreta konstantno ili ponekad kroz duži period vremena.
- rad u neugodnim položajima ili provođenje velike količine vremena u istom položaju i
- pritisak na tijelo ili dio tijela kao npr. ruke, od neki tvrdi ili oštri rub, ili korištenje ruke umjesto čekića. [12]

### 2.4.3. Procjena rizika kod BSEE

Kako bi se mogla odraditi procjena rizika elektroenergetskog sustava potrebno je kvalitetno opisati taj sustav. [12]

Generalne karakteristike prilikom procjene rizika su :

- vrsta, snaga, energija, ocjena trajanja prema kalendaru ili ciklusu starenja (vijek trajanja, broj ciklusa za trajanje),
- vrsta primjene,
- sadržaj opasnih materijala (spojevi, fizičko stanje, jednadžbe, podatci o sigurnosti),
- generalne funkcije, funkcije programiranja, funkcije zaštite,
- funkcija samotestiranja, daljinsko upravljanje, prisutnost osoblja,
- pomoćni uređaji koji su dio sustava,
- poduzete mjere za osiguravanje sigurnosti dizajna i pouzdanosti sustava,
- dostupne mjere za ublažavanje rizika,
- operacijski parametri,
- poznavanje opasnosti povezanih s komponentama elektroenergetskog sustava i
- upute za korištenje.

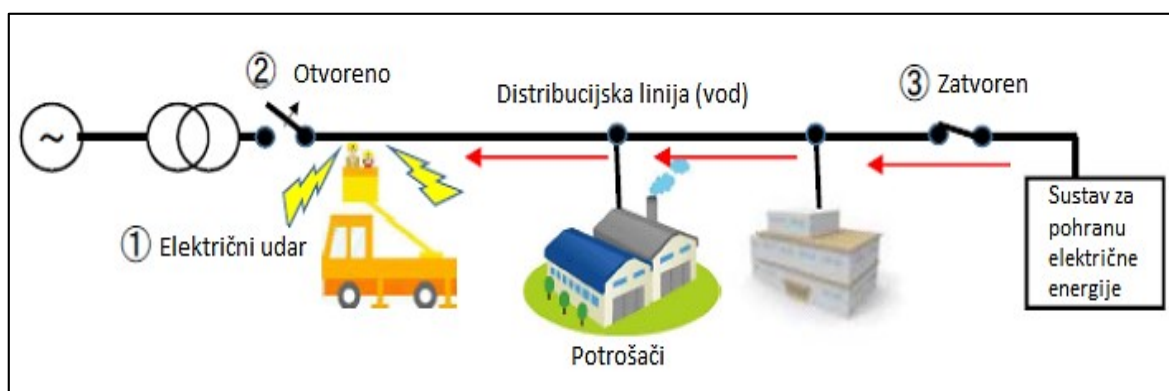
Specifične karakteristike su osnovne vrste elektroenergetskih sustava prema obliku energije.

Dijelimo ih na mehaničku, elektrokemijsku, toplinsku i kemijsku energiju:

- Mehanička :
  - Reverzibilne hidroelektrane (PHS)
  - Zamašnjak (FES)
  - Komprimirani zrak (CAES)
- Elektrokemijska
  - Sekundarne baterije
  - Protočne baterije
- Toplinska
- Kemijska :
  - Hidrogen

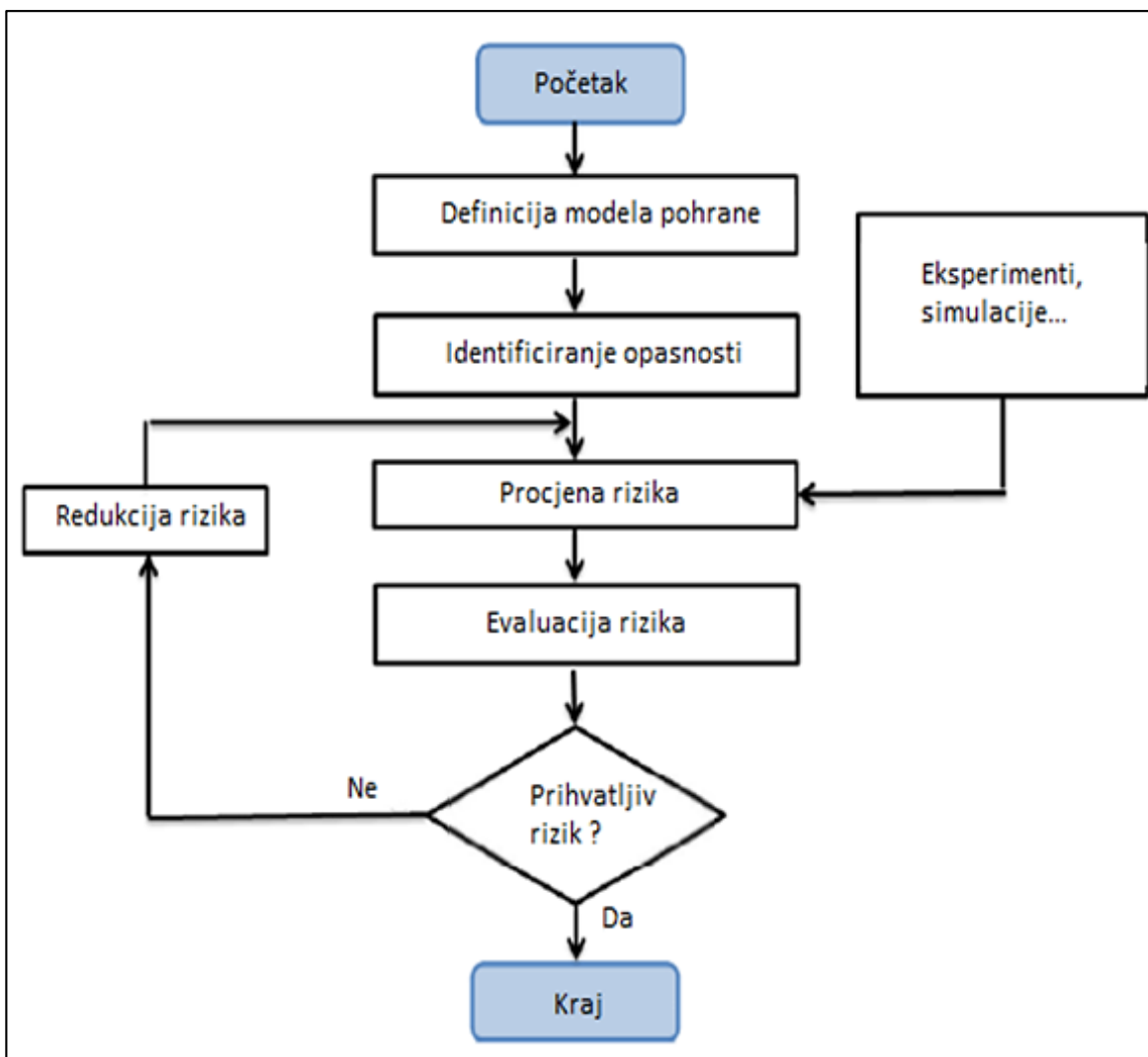
Kako bi se opisali uvjeti pohrane kod spremnika električne energije u obzir se uzimaju:

- Vrste mreža gdje elektroenergetski sustav uključuje bilo koju vrstu mreže spojenu na spremnik energije gdje oboje mogu pohranjivati električnu energiju s mreže ili s bilo kojeg drugog izvora, i pružati električnu energiju mreži. Pod mreže spadaju :
  - prijenosne mreže,
  - distribucijske mreže,
  - komercijalne mreže,
  - industrijske mreže,
  - stambene mreže i
  - otočne mreže.
- vrste primjena,
- lokacija,
- osjetljivi elementi,
- posebne odredbe za sustave za pohranu električne energije,
- izvori vanjske opasnosti (pokretni objekti poput vozila, prirodni izvori...),
- rad bez nadzora i
- otočni pogon gdje se nenamjerno dolazi do napona na dijelovima sustava koji ne bi trebali biti pod naponom zato što je sustav ugašen ili prekinut s prekidačima.



Slika 2.12. Otočni pogon (rad) sustava za pohranu električne energije [12]

Nužno potrebni zahtjevi kako bi se reducirao rizik kod BSEE su definirani u nastavku gdje se nužne mjere radi prevencije mogućih nesreća kod BSEE moraju pratiti. Cilj preventivskih mjera osim sprječavanja nesreća, je njihovo maksimalno limitiranje odnosno reduciranje. Što ujedno znači da za sve moguće scenarije koji imaju veliku razinu posljedica potrebno je predložiti reduciranje rizika u odnosu na sliku 2.13. [12]



Slika 2.13. Općenita procedura kod evaluacije i reduciranja rizika [12]

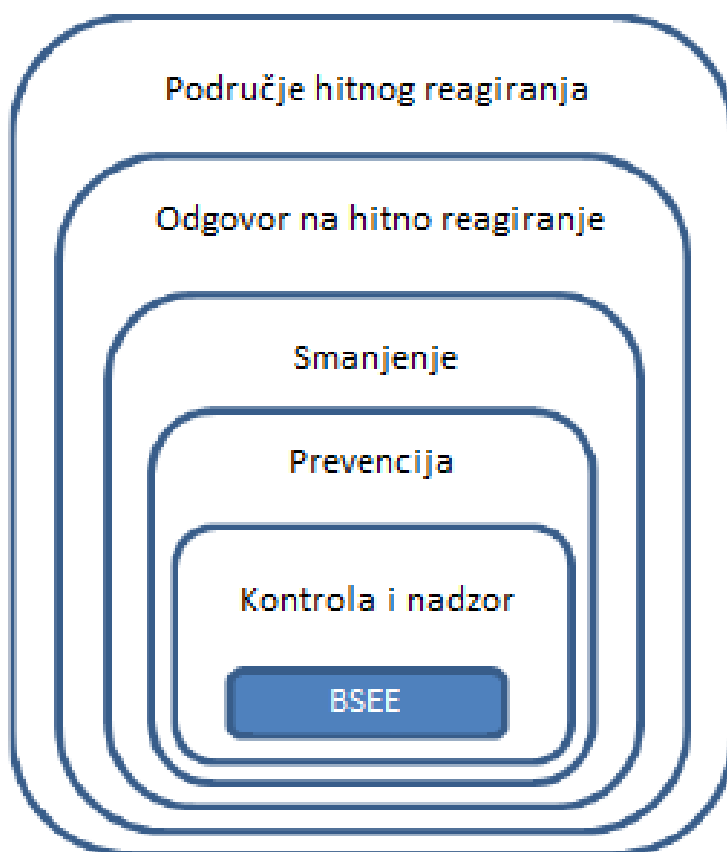
Scenariji koji su razmatrani u analizi rizika bi trebali uključiti katastrofalan vanjski utjecaj na sustav s strane prirodnih katastrofa i sa strane socijalnog odnosno ljudskog utjecaja.

Prirodne katastrofe uključuje sve vrste prirodnih opasnosti, od kojih su neke sezonske, a neke su neočekivane prirode kao što je potres, poplava i cunami.

Što se tiče druge strane katastrofe, socijalni odnosno ljudski utjecaj uključuje razne sabotaze od jedne osobe ili bilo kakvo socijalno ometanje, sve do terorizma. [12]

Kada se dogodi opasnost tada bi se trebale razmotriti mjere gdje se kontrolira širenje štete po slojevima od smanjenja do prevencije.

Reagirane na hitne slućajeve u postrojenju i u podrućju oko postrojenja trebaju biti planirani i pripremljeni unaprijed kako bi se minimaliziralo širenje opasnosti.



*Slika 2.14. Mjere za reduciranje rizika i opasnosti [12]*

Zahtjevi za reduciranje rizika mogu se sveukupno obuhvatiti kao :

- Generalne mjere za reduciranje rizika koje se vide na slici 2.13.,
- Preventivne mjere za slućaj ozljeđivanja susjednih stanovnika,
- Preventivne mjere zbog ozljede radnika i stanovnika kao što su zaštita od elektrićnih, mehanićkih, eksplozijskih, zapaljivih opasnosti. Pod to spadaju još i opasnosti od visokih temperatura, raznih kemijskih tvari pa sve do loših uvjeta rada i
- Projektiranje i dizajniranje dobre nadstrujne zaštite.



### 3. STABILNOST ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA

#### 3.1. Vrste stabilnosti elektroenergetskog sustava

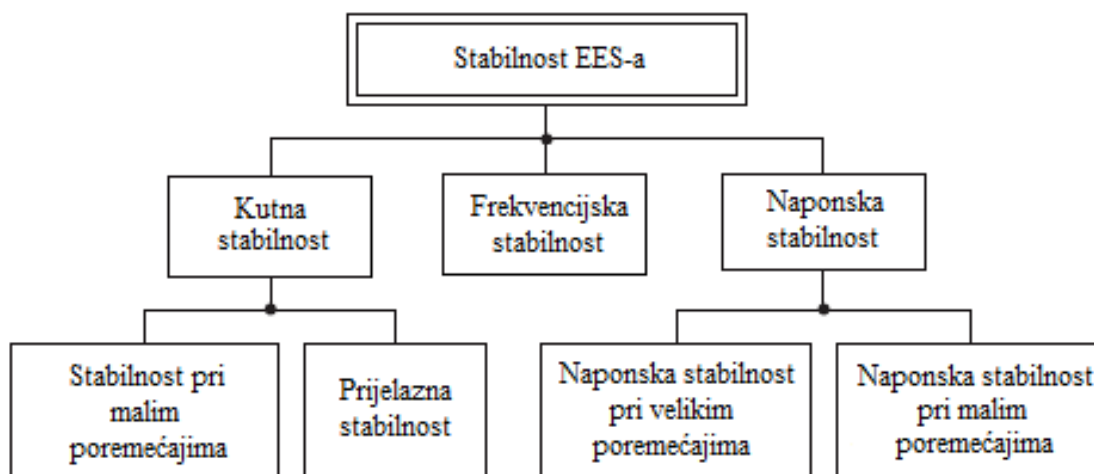
Stabilnost elektroenergetskog sustava podrazumijeva sposobnost ponovnog uspostavljanja ravnotežnog stanja nakon fizičkog poremećaja. Tri veličine se ističu kod ispravnog rada elektroenergetskog sustava: kutevi čvornih napona  $\delta$ , koji se nazivaju i kutovi snage ili opterećenja, frekvencija  $f$  i veličine čvornih napona  $V$ . [13]

Navedene veličine su posebno važne s stajališta definiranja i klasifikacije stabilnosti elektroenergetskog sustava. Stoga se stabilnost elektroenergetskog sustava može podijeliti (slika 3.1.) na: kutnu stabilnost, frekvencijsku stabilnost i naponsku stabilnost.

S obzirom da su elektroenergetski sustavi nelinearni, njihova stabilnost ovisi i o početnim uvjetima i veličini poremećaja. Prema tome, stabilnost kuta i napona može se podijeliti na stabilnost malih i velikih poremećaja. [13].

Stabilnost EES-a uglavnom je povezana s elektromehaničkim fenomenima, te na njega također utječu i brzi elektromagnetski fenomeni, te spori termodinamički fenomeni. [13]

Stoga, ovisno o vrsti fenomena, može se govoriti o kratkoročnoj stabilnosti i dugoročnoj stabilnosti. U nastavku su opisani kutna i naponska stabilnost.



Slika 3.1. Klasifikacija stabilnosti EES-a [13]

### 3.1.1. Kutna stabilnost

Stabilnost kuta rotora je sposobnost međusobno povezanih sinkronih strojeva koji rade u elektroenergetskom sustavu da ostanu u stanju sinkronizma. Dva sinkrona generatora koji rade paralelno i isporučuju aktivnu snagu opterećenju ovise o kutu rotora generatora (podjela opterećenja između alternatora ovisi o kutu rotora). [14]

Tijekom normalnog rada generatora, magnetsko polje rotora i magnetsko polje statora vrte se istom brzinom, međutim postojat će kutni razmak između magnetskog polja rotora i magnetskog polja statora koji ovisi o izlaznom električnom momentu (snazi) generatora. [14]

Povećanje brzine primarnog pokretača (turbine) rezultirat će pomicanjem kuta rotora u novi položaj u odnosu na rotirajuće magnetsko polje statora. S druge strane, smanjenje mehaničkog zakretnog momenta rezultirat će smanjenjem kuta rotora u odnosu na polje statora. U stanju ravnoteže bit će ravnoteža između ulaznog mehaničkog momenta i izlaznog električnog momenta svakog stroja (generatora) u elektroenergetskom sustavu, a brzina strojeva će ostati ista. Ako je ravnoteža narušena tada je brzina stroja promijenjena, tj. rotor stroja će se ubrzati ili usporiti. [14]

Ako se jedan od međusobno povezanih generatora privremeno kreće brže u odnosu na drugi stroj, kut rotora stroja će napredovati u odnosu na spori stroj. To rezultira povećanjem opterećenja koje isporučuje brži generator, a smanjenjem opterećenja isporučenog sporim strojem. Time se smanjuje razlika u brzini između dva generatora, a također i kutni razmak između sporog i brzog generatora. Povećavanje razlike kuta iza određene točke rezultirati će smanjivanjem prijenosa snage bržim strojem. Ovo će dodatno povećati kutno odvajanje, te također ovakav slučaj može dovesti do nestabilnosti i na taj način sinkroni generatori ispadaju iz sinkronizma. [14]

Klasifikacija nestabilnosti kuta rotora može se podijeliti na stabilnost kuta rotora malog poremećaja i stabilnost kuta rotora pri velikim poremećajima (prijelazna stabilnost).

Stabilnost kuta rotora pri malim poremećajima (malog signala) sposobnost je elektroenergetskog sustava da održi sinkronizam pri malim poremećajima. Ako su promjene u varijablama sustava uzrokovane poremećajem dovoljno male da se ponašanje sustava može proučavati pomoću linearnih aproksimacija jednadžbi sustava, tada se poremećaj naziva malim poremećajem. Nestabilnost se javlja zbog nedovoljnog prigušnog momenta. [15]

Stabilnost kuta rotora pri velikim poremećajima (prijelazna stabilnost) je sposobnost elektroenergetskog sustava da održi sinkronizam pri velikim poremećajima. Ako su promjene u varijablama sustava uzrokovane poremećajem dovoljno velike da čine linearnu aproksimaciju jednadžbi sustava neprihvatljivim, tada se poremećaj naziva velikim poremećajem. Nestabilnost se javlja zbog nedovoljnog momenta sinkronizacije. Nestabilnost se javlja zbog nedovoljnog prigušnog momenta. [15]

### 3.1.2. Naponska stabilnost

Stabilnost napona je sposobnost održavanja stabilnih napona na svim sabirnicama nakon što su bili podvrgnuti poremećaju iz danog početnog radnog stanja. To ovisi o sposobnosti održavanja/uspostavljanja ravnoteže između potražnje opterećenja i opskrbe opterećenja iz elektroenergetskog sustava. Kolaps napona odnosi se na proces gdje niz događaja koji prate nestabilnost napona, dovode do nestanka struje ili neuobičajeno niskih napona u značajnom dijelu elektroenergetskog sustava. [15]

Pad napona također može biti rezultat nestabilnosti kuta rotora. Kada se kut razdvajanja rotora između dvije grupe strojeva približi  $180^\circ$ , naponi u srednjim točkama (električni centar) padaju na nisku vrijednost. Stabilnost napona ima podjelu na dvije klase: stabilnost napona pri velikim poremećajima i stabilnost napona pri malim poremećajima. [15]

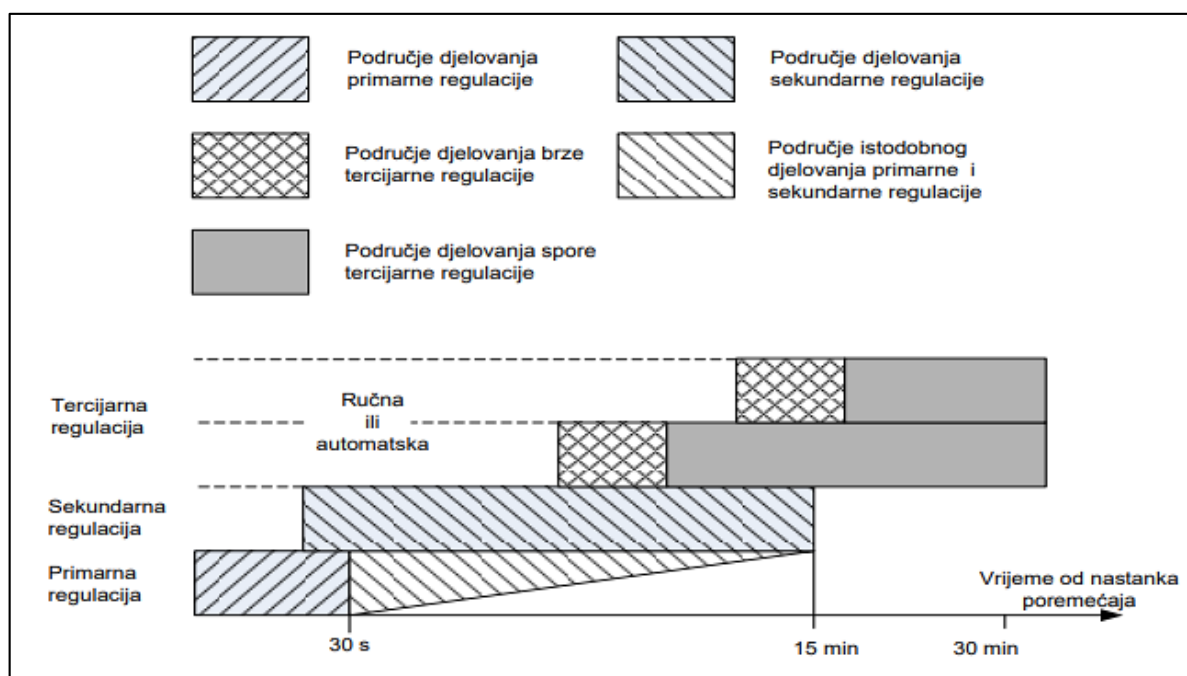
Stabilnost napona pri velikim poremećajima odnosi se na sposobnost sustava da održe stabilne napone nakon većih smetnji poput grešaka u sustavu, gubitka proizvodnje ili nepredviđenih događaja u krugu. Za procjenu se koristi nelinearna simulacija.

Stabilnost napona pri malim poremećajima odnosi se na sposobnost sustava da održavaju stabilne napone nakon što se dogode manje smetnje kao što su inkrementalne promjene u opterećenju sustava. Za procjenu se koriste i linearizirani modeli i nelinearna simulacija. [15]

Izvješće IEEE/CIGRE jasno navodi da se razlika između stabilnosti kuta rotora i stabilnosti napona ne temelji na slaboj sprezi između varijacija u veličinama aktivne snage/kuta i jalove snage/napona. Za visoko opterećene sustave ova je veza jaka. Razlika se temelji na suprotnoj sili, koja doživljava stalnu neravnotežu, i varijabli elektroenergetskog sustava (kut rotora ili veličina napona) u kojoj je posljedica nestabilnost očita. [15]

### 3.2. Regulacija frekvencije u elektroenergetskom sustavu

Održavanje i regulacija frekvencije predstavljaju važnu stavku kod stabilnosti elektroenergetskog sustava. Kada se u EES-u dogodi kvar ili poremećaj tada dolazi do odstupanja veličina, karakterističnih vrijednosti, izvan granica koje su dopuštene. Da bi osigurali povratak veličina unutar granica koje su dozvoljene, koristi se regulacija u EES-u. [16]



Slika 3.2. Razine regulacije frekvencije [17]

Kod elektroenergetskog sustava frekvencija predstavlja mjerilo za ravnotežu između proizvodnje i potrošnje. Dok je snaga proizvodnje i potrošnje jednaka frekvencija će imati istu vrijednost. Ukoliko se dogodi da nisu jednake, dolazi do pada ili rasta frekvencije sve do trenutka dok se ne uspostavi ravnoteža mreže. Regulacija frekvencije izvodi se uz pomoć regulacijske pričuve koja predstavlja nekorišteni, raspoloživi kapacitet djelatne snage.

Regulacijske pričuve se klasificiraju u rotirajuće i ne rotirajuće pričuve. S razlikom maksimalne moguće i trenutne radne snage dobije se rotirajuća pričuva, te ona zapravo predstavlja elektranu, agregat, regulacijsko područje ili interkonekciju. Pogonski agregati koji u kratkom vremenskom razdoblju (do 10 min) imaju mogućnost povećavanja snage na zahtijevanu razinu čine rotirajuću pričuvu. Pričuva koja je ne rotirajuća sastoji se od agregata koji nisu u pogonu odnosno nisu priključeni na mrežu, ali ukoliko je to potrebno kroz određeno vrijeme mogu biti dostupni.

Postoje tri vrste regulacije:

- primarna regulacija,
- sekundarna regulacija i
- tercijarna regulacija.

### 3.2.1. Primarna regulacija

U elektroenergetskoj mreži nastaju određena odstupanja frekvencije od nazivne ili zadane vrijednosti zbog neravnoteže između proizvodnje i potrošnje u mreži koja je sinkrono povezana. Nakon što dođe do odstupanja frekvencije počinju djelovati turbinski regulatori brzine vrtnje koji su obuhvaćeni s primarnom regulacijom frekvencije. [16]

Prilikom pogona u interkonekciji, vlastito regulacijsko područje ima obvezu davati doprinos zadanoj rezervi primarnog reguliranja interkonekcije. Doprinos mora biti u skladu s udjelom proizvodnje regulacijskog područja unutar ukupne proizvodnje svih regulacijskih područja interkonekcije.

Kod otočnog rada EES-a ili dijela EES-a koji je odvojen primarna regulacija frekvencije mora biti u mogućnosti da korigira maksimalnu trenutnu razliku između proizvodnje i potrošnje u onoj vrijednosti snage koja je najveća aktivna proizvodna jedinica u EES-u, te ujedno mora osigurati da trenutna vrijednost frekvencije prilikom poremećaja ne padne ispod 49.20 Hz. Vrijeme djelovanja primarne regulacije je nekoliko sekundi od trenutka kad je poremećaj nastao. [16]

Što se tiče rezerve primarne regulacije vremenski raspon aktivacije iznosa 0-50% rezerve mora se aktivirati unutar 15 sekundi, a iznos od 50-100% unutar maksimalnog vremena aktiviranja. Maksimalno vrijeme aktiviranja ima linearnu promjenu do maksimalno 30 sekundi. Prilikom promjene frekvencije iznosa  $\pm 200$  mHz ili više, cjelokupna rezerva primarne regulacije se treba aktivirati (u privremenom stacionarnom stanju). [16]

U Hrvatskoj je primarna regulacija frekvencije obavezna, te je svaka proizvodna jedinica snage veće od 30 MW i hidro proizvodna jedinica veća od 10 MW mora biti osposobljena za primarnu regulaciju frekvencije. [17]

### 3.2.2. Sekundarna regulacija

Sekundarna regulacija ima zadataku da kompenzira poremećaje koji su uzrokovali odstupanje frekvencije. Ona mora promijeniti snagu proizvodnje samo u dijelu mreže gdje je poremećaj nastao te na taj način vratiti sustav u stanje u kojemu je bio prije nego što se poremećaj dogodio, odnosno frekvencija se vraća na nazivnu vrijednost (zadana vrijednost). Sekundarna regulacija postiže snagu promjene proizvodnje jednaku neravnoteži snage koja je uzrok poremećaja, ali je suprotno usmjerena. U sekundarnu regulaciju su uključene regulacijske elektrane. [16]

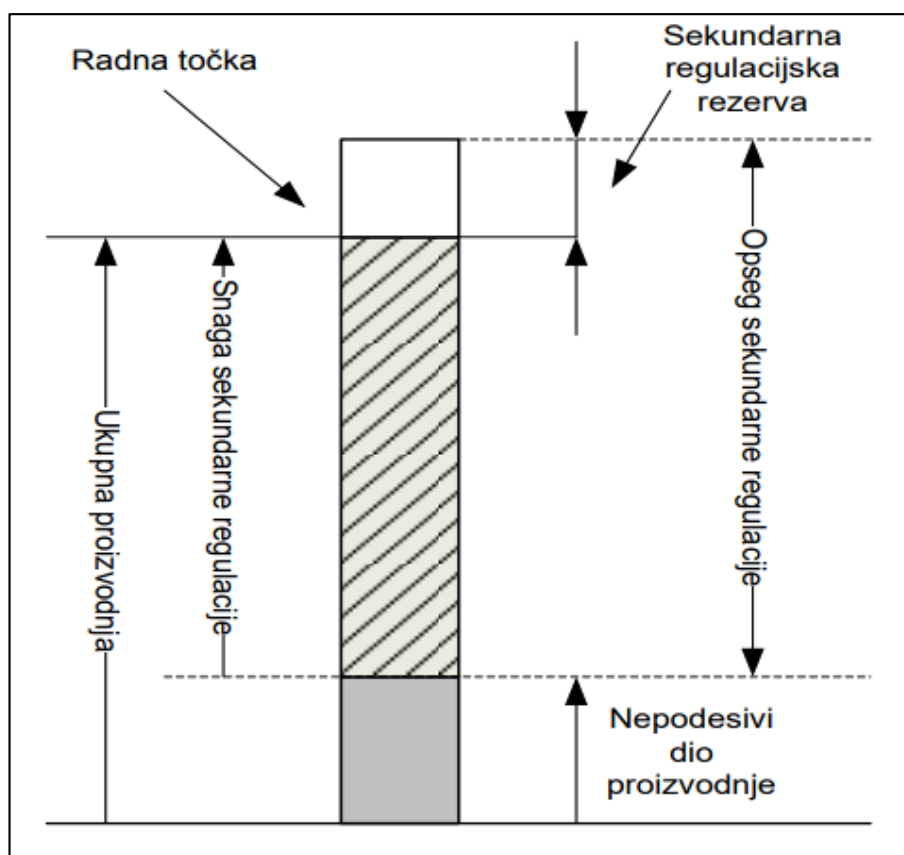
$$R_S = \sqrt{aL_{max} + b^2} - b \quad (3.1)$$

gdje je:

$R_S$  - sekundarna regulacijska rezerva

$L_{MAX}$  - maksimalno planirano opterećenje za određeno razdoblje

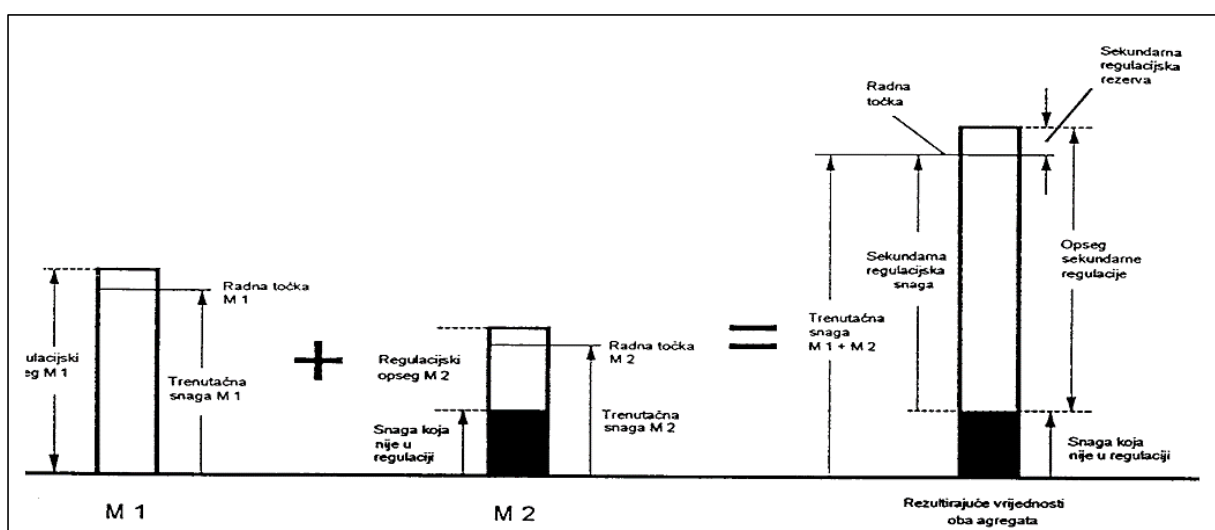
$a, b$  - iskustveni parametri



Slika 3.3. Prikaz opsega sekundarne regulacije [17]

Neka regulacijska područja koja se nalaze unutar interkonekcije nisu u mogućnosti proizvoditi snagu koja je dovoljna da bi se pokrila vlastita proizvodnja. Također s druge strane postoje i druga regulacijska područja koja imaju višak proizvodnje snage.

U odnosu proizvodnju i potrošnju u regulacijskom području, moguće je unaprijed predvidjeti da li se u tom području može proizvesti više ili manje potrebne snage. Ako područje nema dovoljnu snagu za pokrivanje vlastite potrošnje, ugovara se razmjena potrošnje s područjima koja imaju mogućnost proizvodnje više nego što im je potrebno. Kod agregata u sekundarnoj regulaciji imamo radne točke i regulacijske opsege pri proporcionalnoj raspodjeli sekundarne regulacijske snage na dva agregata M 1 i M 2. [16, 17]



Slika 3.4. Angažman agregata u sekundarnoj regulaciji [17]

S obzirom na istodobnu regulaciju snage razmjene područja i frekvencije interkonekcije, sekundarna regulacija se naziva još i sekundarna regulacija frekvencije i djelatne snage razmjene. Sekundarna regulacija može vršiti samo regulaciju frekvencije interkonekcije ili samo snagu razmjene ukoliko postoji potreba za time, ali je u rijeđoj upotrebi kao takva. [16]

Djelovanje sekundarne regulacije može se opisati na način gdje se prvo pomoću algoritma proračunava koja je potrebna promjena vlastite proizvodnje da bi frekvencija elektroenergetskog sustava i snaga razmjene regulacijskog područja održale se na vrijednostima koje su ugovorene. Ukoliko je slučaj da se u regulacijskom području nalazi više od jedne regulacijske elektrane, tada treba napraviti proračun iznosa željene promjene proizvodnje djelatne snage i nakon tog napraviti prikladan raspored snage između njih. [16]

### 3.2.3. Tercijarna regulacija

Pod tercijarnu regulaciju spada svaka ručna ili automatska korekcija planiranog rada jedinice proizvodnje, a cilj joj je da osigura potrebne pričuve kod sekundarne regulacije. Tercijarna regulacija koristi rezervu djelatne snage u elektranama, a nju aktivira operator prijenosnog sustava ručno prilikom aktivacije sekundarne regulacije u svrhu oslobodjenja rezerve sekundarne regulacije. [16]

Tercijarna regulacija se postiže:

- uključanjem elektrana ,
- upravljanjem potrošnjom,
- promjenom plana razmjene i
- preraspodjelom snage regulacijskih elektrana.

Regulacijske pričuve kod tercijarne regulacije mogu se podijeliti na brzu i sporu, gdje se brza (minutna pričuva) tercijarna regulacijska pričuva koristi za svrhu osiguravanja sekundarne regulacijske pričuve. Ukoliko se dogodi ispad najveće jedinice proizvodnje unutar sustava, tercijarna pričuva mora je moći pokriti, te ona ne mora biti osigurana s strane vlastitih sredstava područja regulacije nego se ugovara i s ostalim područjima regulacije koji se nalaze u interkonekciji. [16]

Kod optimiziranja tokova snaga u mreži i proizvodnje u sustavu koristi se spora tercijarna pričuva. Također može poslužiti u svrhu smanjenja mrežnih zagušenja, a to se obavlja preraspodjelom proizvodnje u regulacijskom području. [16]

Tercijarna regulacija prati rad sekundarne regulacije na način da se nadzire raspoloživa regulacijska pričuva kod sekundarne regulacije. Ukoliko se javi potreba za vraćanjem sekundarne regulacijske pričuve unutar nekog zadanog opsega dolazi do aktivacije tercijarne pričuve. U tom slučaju se mora paziti da se poštuju ekonomski i sigurnosni kriteriji. [16]



## 4. TEHNOLOŠKA RJEŠENJA ZA STVARANJE VIRTUALNE INERCIJE

### 4.1. Obilježja inercije u EES-u

Početak nastanka poremećaja označava početak inercijskog odziva, prije nego što je proradila primarna regulacija frekvencije. Uvodni dio obilježja inercije u EES-u daje uvid u inercijski odziv sinkronog generatora gdje veliku ulogu igra inercijska konstanta. Rotacijske mase kod sinkronog generatora pohranjuju kinetičku energiju  $E_{kin}$  prema jednadžbi (4.1):

$$E_{kin} = \frac{1}{2} J \omega_r^2 \quad (4.1)$$

gdje je:

$E_{kin}$  - kinetička energija

$J$  - moment tromosti

$\omega_r$  - nazivna rotacijska frekvencija stroja

Moment tromosti  $J$  predstavlja mjeru otpora nekog objekta na promjenu u njegovom rotacijskom gibanju. U elektroenergetskim sustavima najčešće se koristi konstanta tromosti  $H$  umjesto momenta tromosti  $J$ . [19]

Konstanta tromosti generatora  $H$  određuje vremenski interval tijekom kojeg električni generator može isporučiti svoju nazivnu snagu koristeći samo kinetičku energiju koja je pohranjena u njegovim rotirajućim masama. [19] Prema jednadžbi (4.2) definirana je konstanta tromosti  $H$ :

$$H = \frac{E_{kin}}{S_r} = \frac{1}{2} \frac{J \omega_r^2}{S_r} \quad (4.2)$$

gdje je:

$H$  – konstanta tromosti

$S_r$  – nazivna snaga

$\omega_r$  – nazivna rotacijska frekvencija stroja

$J$  – moment tromosti

Rad koji je predstavljen u [20] daje pregled konstanti tromosti  $H$  konvencionalnih elektrana koje su predložene posljednjih desetljeća, a vrijednosti se kreću između 2 i 10s. [19]

U elektroenergetskim sustavima, kretanje svake grupe turbogeneratorskog izražava se prema jednačbi (4.3), gdje  $T_m$  predstavlja mehanički moment turbine, a  $T_e$  predstavlja elektromagnetski moment generatora[19]:

$$2 H \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e \quad (4.3)$$

gdje je:

$T_m$  – mehanički moment turbine

$T_e$  – elektromagnetski moment generatora

Kako je  $P = T \cdot \omega$  i uzevši u obzir početni uvjet kao 0, dobije se:

$$P = P_0 + \Delta P = (T_0 + \Delta T) \cdot (\omega_{r0} + \Delta\omega_r) \quad (4.4)$$

gdje je  $\Delta P = \Delta P_m - \Delta P_e$  i  $\Delta T = \Delta T_m - \Delta T_e$ , štoviše za male varijacije:

$$\Delta P \simeq T_0 \cdot \Delta\omega_r + \Delta T \cdot \omega_{r0} \quad (4.5)$$

za slučaj stacionarnog stanja:

$$T_{m0} = T_{e0}, \quad \omega_{r0} = 1 \text{ pu}. \quad (4.6)$$

Za posljedicu, s obzirom na male varijacije oko stacionarnog stanja, jednačba (4.3) se može zaspisati kao jednačba (4.7):

$$2 H \frac{d\Delta\omega_r}{dt} = \Delta P_m - \Delta P_e \quad (4.7)$$

Neka električna opterećenja spojena na mrežu također ovise o frekvenciji, gdje rade kao izvor opterećenja pri frekvencijskim odstupanjima. Na taj način se električna snaga tih opterećenja može izraziti kao:

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D \cdot \Delta\omega_r \quad (4.8)$$

gdje  $\Delta P_L$  predstavlja promjenu snage tih opterećenja neovisno o odstupanjima frekvencije, a  $D$  predstavlja faktor prigušenja (odziv teret - frekvencija). Naknadnim uključivanjem faktora prigušenja u jednadžbu (4.7), modificirana je jednadžba (4.9) koja predstavlja jednadžbu njihanja (eng. swing equation) i predstavlja gibanje sinkronog generatora:

$$2 H \frac{d\Delta\omega_r}{dt} = \Delta P_m - (\Delta P_L + D \cdot \Delta\omega_r). \quad (4.9)$$

Da bi se jednadžba njihanja (4.9) primjenila kod elektroenergetskog sustava, svi sinkroni generatori su grupirani u ekvivalentnoj rotirajućoj masi. To se provodi određivanjem ekvivalentne konstante tromosti  $H_{eq}$  takvih generatora:

$$H_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^{SG} H_i \cdot S_{B,i}}{S_B} \quad (4.10)$$

gdje je:

$H_i$  – Konstanta tromosti (inercijska konstanta)

$S_{b,i}$  - Nazivna snaga i-tog generatora

SG – ukupan broj sinkronih generatora priključenih na mrežu

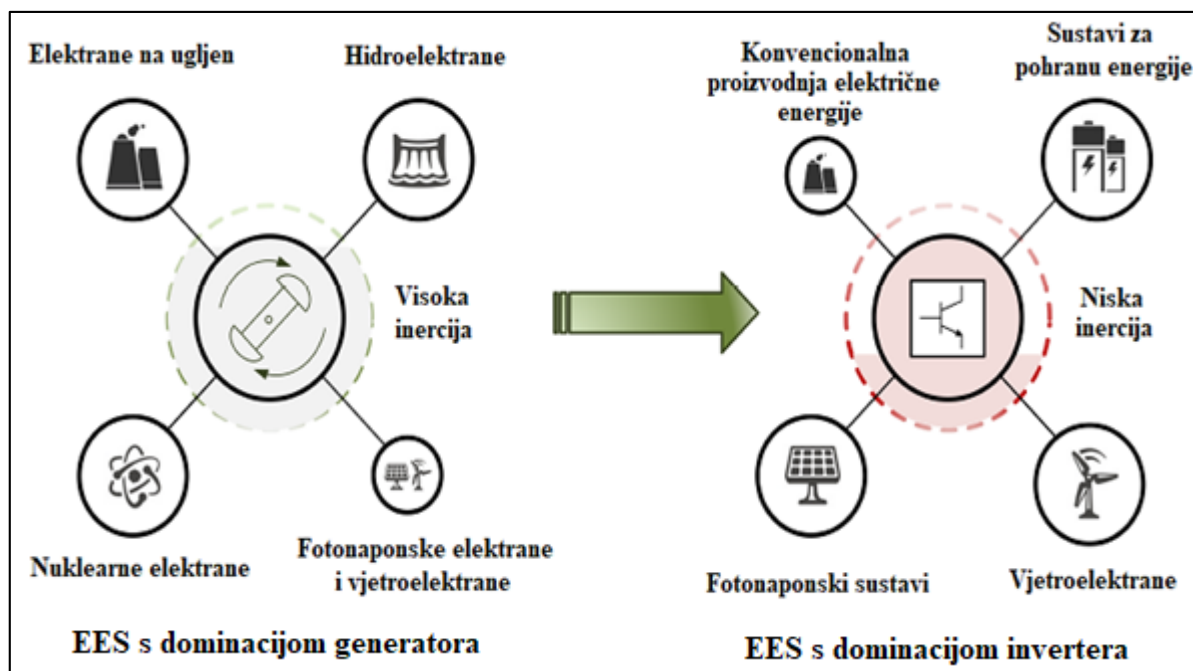
SB – nazivna snaga elektroenergetskog sustava

Na isti način kao za prethodni slučaj, smanjuju se opterećenja na ekvivalentna s faktorom prigušenja  $D_{eq}$ . Ako je elektroenergetski sustav koji se analizira stabilan, netočna vrijednost  $D_{eq}$  neće imati značajan utjecaj kod ispitivanja. Međutim, u situacijama gdje se javljaju određene smetnje vrijednost  $D_{eq}$  može biti veliki doprinos. S obzirom da pogoni promjenjive frekvencije postaju sve češći, očekuje se smanjenje ekvivalentnog faktora prigušenja. [19]

## 4.2. Uvod u virtualnu inerciju

Sve većom integracijom obnovljivih izvora energije kao što su fotonaponske ili vjetroelektrane, postupno u mreži dolazi do dominacije mješovite proizvodnje električne energije, zamjenjujući već tradicionalne načine izvora kao što su ugljen i nuklearna energija. S takvim razvojem situacije elektroenergetska mreža ide prema tome da sve više i više dominiraju inverteri, za razliku od tradicionalnih rotacijskih generatora. [21]

Iako postoje prednosti kao što je čišća električna energija što se tiče OIE, proizvodnja električne energije na taj način ne daje nikakav mehanički inercijski odziv. Razlog tome je što su OIE poput fotonaponskih elektrana ili vjetroelektrana spojeni na mrežu pomoću invertera, te na taj način se ugrožava stabilnost frekvencije, a s time i sama sigurnost elektroenergetskog sustava. [21]



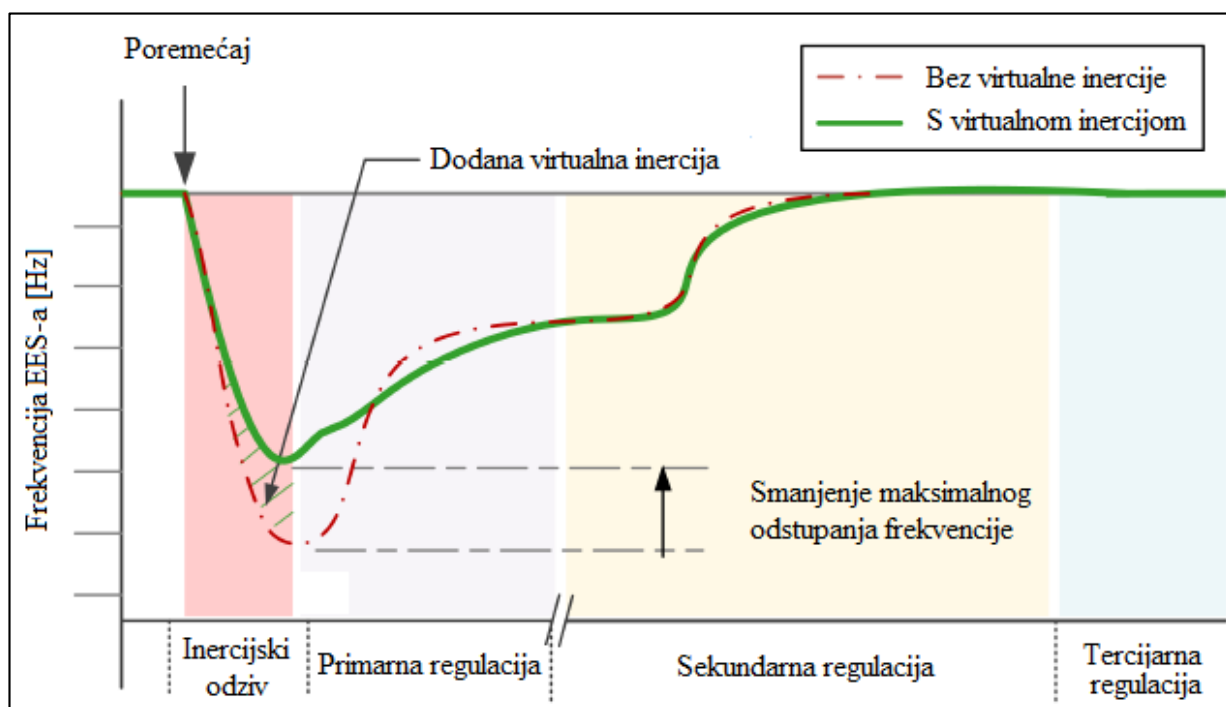
Slika 4.1. Evolucija prema EES-u s dominantnom inverterskom tehnologijom [21]

Kad god postoji neravnoteža između proizvodnje i potrošnje u elektroenergetskom sustavu, generatori ne mogu trenutno reagirati kako bi uravnotežili sustav. Kinetička energija pohranjena u rotorima odgovorna je za suzbijanje ove neravnoteže kroz inercijski odziv sve dok se ne aktivira primarna kontrola frekvencije. [21]

Kako se konvencionalni generatori zamjenjuju OIE, inercijski odziv također opada. To dovodi do povećanja brzine promjene frekvencije (eng. ROCOF) i najniže razine frekvencije (eng. frequency NADIR) u vrlo kratkom vremenu. Primarna regulacija frekvencije ne može odgovoriti unutar kratkog vremenskog okvira (obično manje od 10 s) da zaustavi promjenu frekvencije sustava. Ovo je razdoblje istaknuto crvenom bojom na slici. Sa slike je jasno da je u sustavima s nižom inercijom najniža vrijednost frekvencije znatno niža zajedno s visokim ROCOF-om. Takve situacije mogu dovesti do okidanja frekvencijskih releja i u najgorem slučaju, mogu dovesti do kaskadnih ispada. Rješenje za takve scenarije je dodavanje virtualne inercije u sustav. [21]

Osnovni zahtjevi virtualnog inercijskog sustava su da mora djelovati u vrlo kratkom vremenskom intervalu (obično manje od 10 s) i na autonoman način. Prikladno raspoređeni, virtualni inercijski sustavi poboljšali bi stabilnost sustava i omogućili veću integraciju obnovljivih izvora energije[21]

Kako bi se održala proizvodnja električne energije i ravnoteža opterećenja, različite kontrolne akcije implementiraju se u elektroenergetski sustav tijekom više vremenskih okvira kao što je prikazano na slici 4.2. Reakcija regulatora je primarna kontrolna radnja koja se odvija unutar prvih nekoliko sekundi (obično 10 –30 s) frekvencijskog događaja i ima za cilj smanjenje odstupanja frekvencije. Automatska regulacija proizvodnje sekundarna je regulacija koja se odvija u roku od nekoliko minuta (obično 10–30 min) i vraća frekvenciju sustava natrag na nominalnu vrijednost. Tercijarna regulacija je raspoređivanje pričuve kada se poduzimaju radnje kako bi se osigurali resursi za rješavanje sadašnjih ili budućih poremećaja u sustavu. [21]



Slika 4.2. Regulacija frekvencije kod poremećaja u mreži uz virtualnu tromost [21]

Varijacija frekvencije u elektroenergetskom sustavu nakon nekog događaja u mreži ili generalno frekvencijskog poremećaja, može se aproksimirati s jednadžbom njihanja na sljedeći način [21]:

$$P_{gen} - P_{load} = \frac{d(E_{K.E.})}{dt} = \frac{d\left(\frac{1}{2} J \omega_g^2\right)}{dt} \quad (4.11)$$

$$P_{gen} - P_{load} = J\omega_g \frac{d\omega_g}{dt} \quad (4.12)$$

gdje je:

$P_{gen}$  - proizvedena snaga

$P_{load}$  - potrebna snaga uključujući i gubitke

$J$  - ukupna inercija sustava

$\omega_g$  - frekvencija sustava

Inercijska konstanta (konstanta tromosti) elektroenergetskog sustava  $H$  je definirana kao kinetička energija koja je normalizirana na prividnu snagu  $S_g$  od spojenih generatora u EES-u:

$$H = \frac{J\omega_g^2}{2S_g} \quad (4.13)$$

Nadalje se jednadžba (4.12) može zapisati kao:

$$\frac{2H}{\omega_g} \frac{d\omega_g}{dt} = \frac{P_{gen} - P_{load}}{S_g} \quad (4.14)$$

Umjesto zapisa s kutnom frekvencijom izražene u rad/s, prethodna jednadžba se može zapisati kao frekvencija  $f$  [Hz]:

$$\frac{2H}{f} \frac{df}{dt} = \frac{P_{gen} - P_{load}}{S_g} \quad (4.15)$$

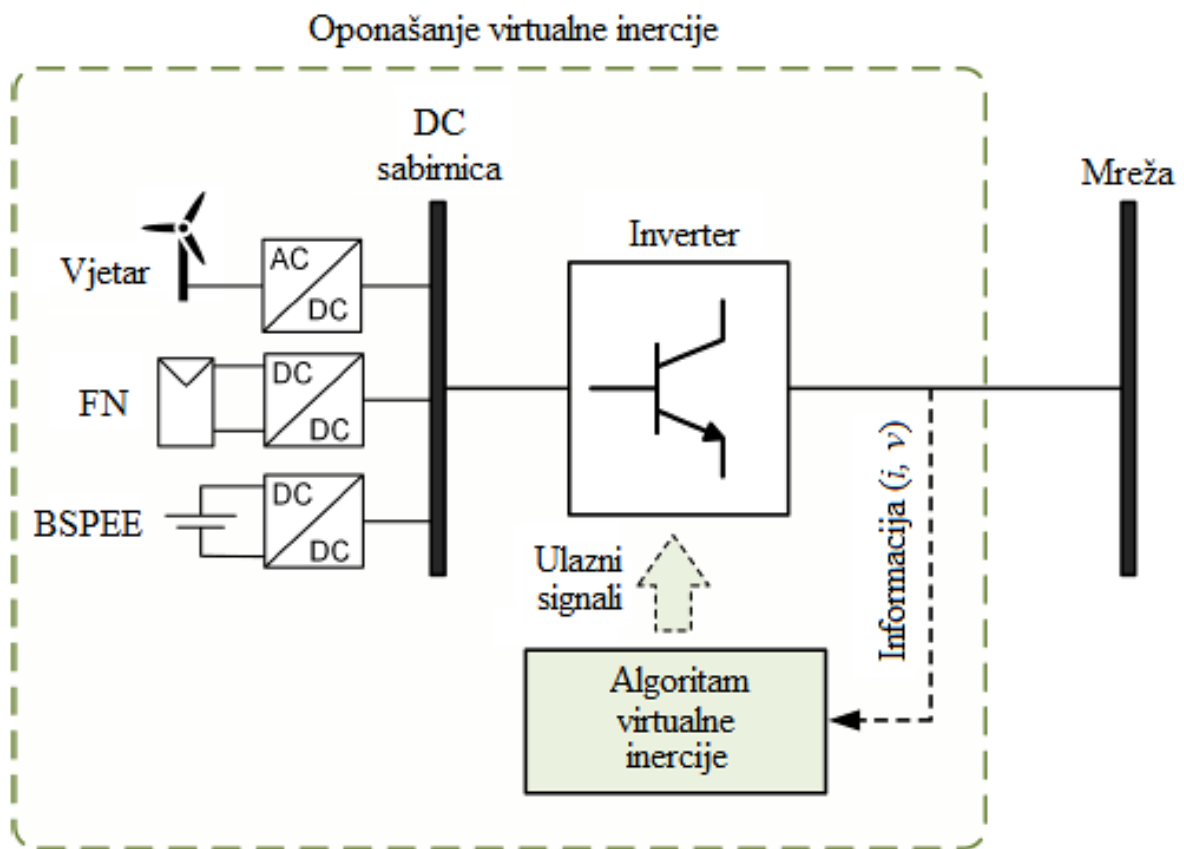
U prethodnoj formuli  $df/dt$  predstavlja brzinu promjene frekvencije sustava (eng. rate-of-change-of- frequency tj. ROCOF). S smanjenom inercijom, ROCOF sustava se povećava što uzrokuje veće (nagle) promjene u frekvenciji sustava za isti vremenski okvir. Što znači da s prodorom sve većeg broja OIE u EES, sustav će zahtijevati dodatnu inerciju da bi zadržao svoju stabilnost. [21]

#### 4.2.1. Koncept virtualne inercije

Virtualna inercija predstavlja kombinaciju upravljačkih algoritama, obnovljivih izvora energije, baterijskih sustava za pohranu energije i energetske elektronike koja oponaša inerciju

konvencionalnih sinkronih generatora. Na taj način se pokušava nadomjestiti nedostatak prirodne inercije EES-a koja se sve više gubi integracijom OIE u EES. Razlog tome je što inverterska tehnologija postaje sve dominantnija u EES-u, te se zamjenjuju klasični sinkroni generatori. [21]

Na slici 4.3. prikazan je koncept virtualne inercije, gdje je jezgra sustava virtualni inercijski algoritam. On predstavlja različite izvore energije, koji su povezani s mrežom preko pretvarača energetske elektronike, kao sinkrone generatore. Većina modernih vjetroturbina rade kao vjetroturbine s promjenjivom brzinom i spojene su preko back-to-back pretvarača, potpuno odvajajući inerciju od mreže. Slično tome, fotonaponski sustavi i ESS imaju DC-DC pretvarač i inverter na prednjem dijelu, te zato ne doprinose inercijskom odzivu [21]



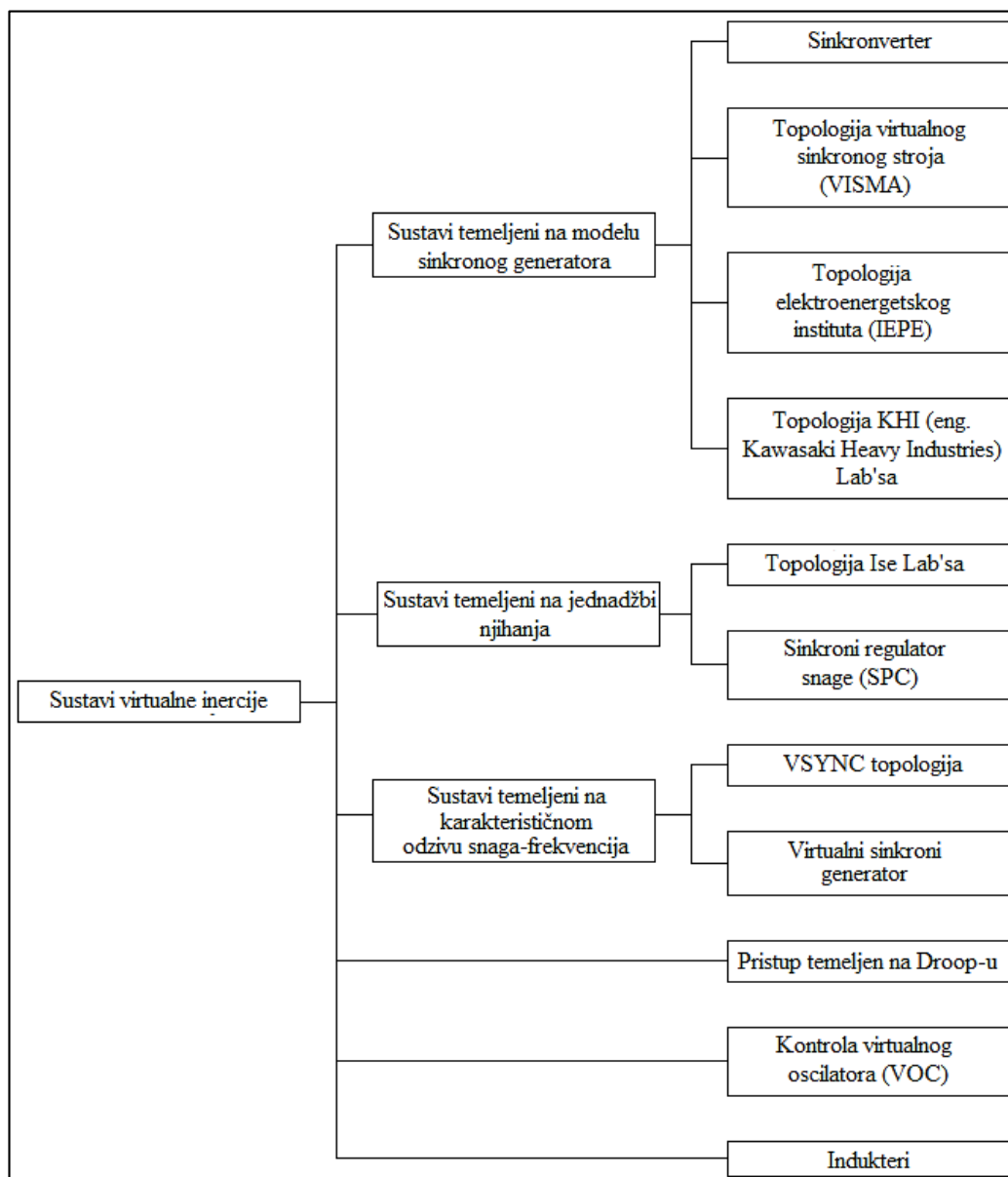
Slika 4.3. Koncept virtualne inercije [21]

Virtualni inercijski sustavi koji se temelje na strujnoj/naponskoj povratnoj vezi s izlaza invertera, generiraju odgovarajuće signale usmjeravanja kako bi te resurse predstavili kao SG-e s strane gledišta mreže. Iako su osnovni temeljni koncepti slični među raznim topologijama u literaturi, implementacija je prilično raznolika ovisno o primjeni i željenoj razini sofisticiranosti modela. [21]

Neke topologije pokušavaju oponašati točno ponašanje SG-a kroz detaljan matematički model koji predstavlja njihovu dinamiku. Drugi pristupi pokušavaju to pojednostaviti korištenjem samo jednadžbe njihanja za aproksimaciju ponašanja SG-a, dok drugi koriste pristup koji čini jedinice za distribuiranu proizvodnju električne energije osjetljivima na promjene frekvencije u elektroenergetskom sustavu.[21]

#### 4.3. Klasifikacija tehnoloških rješenja za implementaciju virtualne inercije

Klasifikacija tehnoloških rješenja za implementaciju virtualne inercije pružena je na slici 4.4. gdje je neka osnovna podjela prema sustavima na: modelu sinkronog generatora, jednadžbi njihanja, karakterističnom odzivu snaga-frekvencija i „proporcionalnom“ pristupu.



Slika 4.4. Klasifikacija topologija za implementaciju virtualne inercije [21]



#### 4.3.1. Sustavi temeljeni na modelu sinkronog generatora (sinkronverteri)

Topologija zasnovana na modelu sinkronog generatora je topologija za virtualnu emulaciju inercije temeljena na potpunom modeliranju dinamike sinkronog generatora (SG). Podjela topologija temeljenih na modelu sinkronih generatora je: sinkronverteri (eng. synchronverters), virtualni sinkroni stroj (tkzv. VISMA topologija), topologija instituta elektroenergetike (IEPE) i KHI topologija (Kawasaki Heavy industries Lab's Topology). U nastavku je izdvojena topologija s sinkronverterima. [21]

Sinkronverteri upravljaju s jedinicama distribuirane proizvodnje, koje se temelje na inverteru, te tako s gledišta mreže predstavljaju istu dinamiku kao da su SG-i. To se temelji na ideji da takva strategija omogućuje nastavak tradicionalnog rada elektroenergetskog sustava bez većih promjena u njoj pogonskoj strukturi. [21]

Mehanizam pada frekvencije se koristi za regulaciju izlazne snage iz invertera slično kao što sinkroni generator regulira svoju izlaznu snagu. Za objašnjavanje dinamike sinkronog generatora u ovom slučaju koriste se sljedeće osnovne jednačbe [21]:

$$T_e = M_f i_f \langle \mathbf{i}, \mathbf{s} \sin \theta \rangle \quad (4.16)$$

$$e = \dot{\theta} M_f i_f \mathbf{s} \sin \theta$$

$$Q = -\dot{\theta} M_f i_f \langle \mathbf{i}, \mathbf{c} \cos \theta \rangle \quad (4.17)$$

gdje je:

$T_e$  - elektromagnetski moment sinkronvertera

$M_f$  - veličina međusobnog induktiviteta između zavojnice polja i statora

$i_f$  - struja pobude polja

$\theta$  - kut između osi rotora i jedne od faze namota statora

$e$  - generirani napon praznog hoda

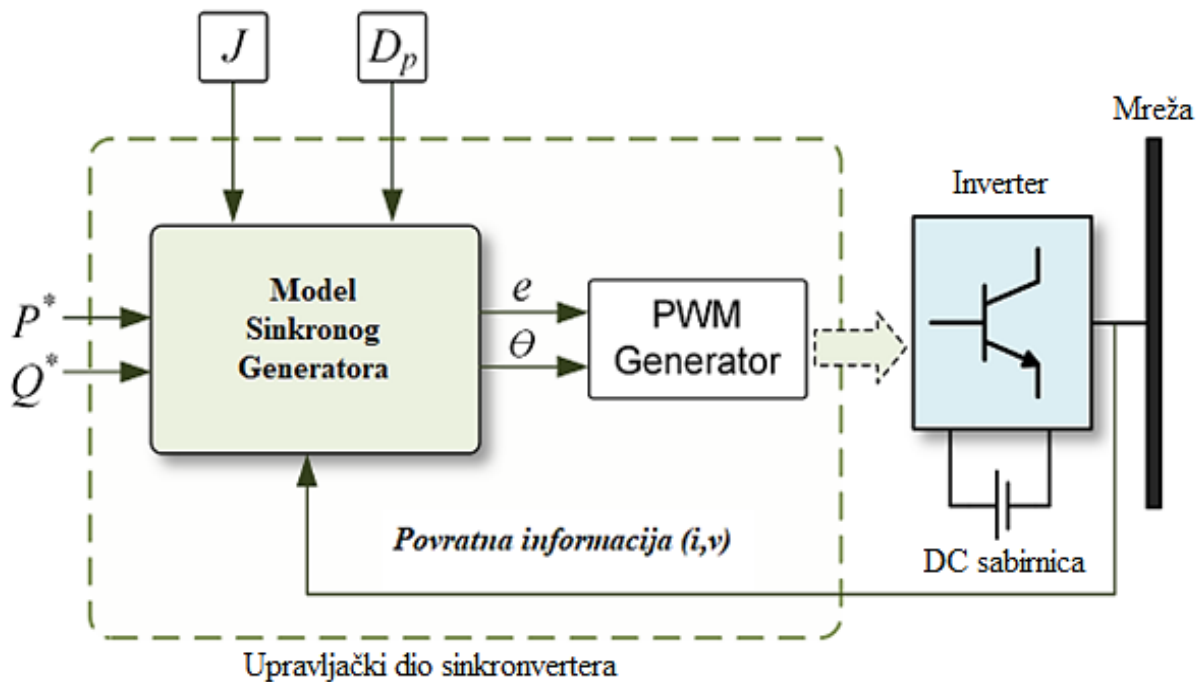
$Q$  - generirana jalova snaga

U jednačbama (4.16) i (4.17),  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  predstavlja standardni unutarnji produkt dvaju vektora u  $\mathbb{R}^3$ . Ujedno jednačbe od (4.16) do (4.17) prvo se diskretiziraju, a zatim se rješavaju u svakom ciklusu upravljanja u digitalnom regulatoru kako bi se generirali signali usmjeravanja za jedinicu distribuirane proizvodnje električne energije koja se razmatra. [21]

Trofazna struja statora  $i$ ,  $\sin$  i  $\cos$  su vektori definirani na sljedeći način:

$$\mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}; \widetilde{\sin\theta} = \begin{bmatrix} \sin\theta \\ \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}; \widetilde{\cos\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

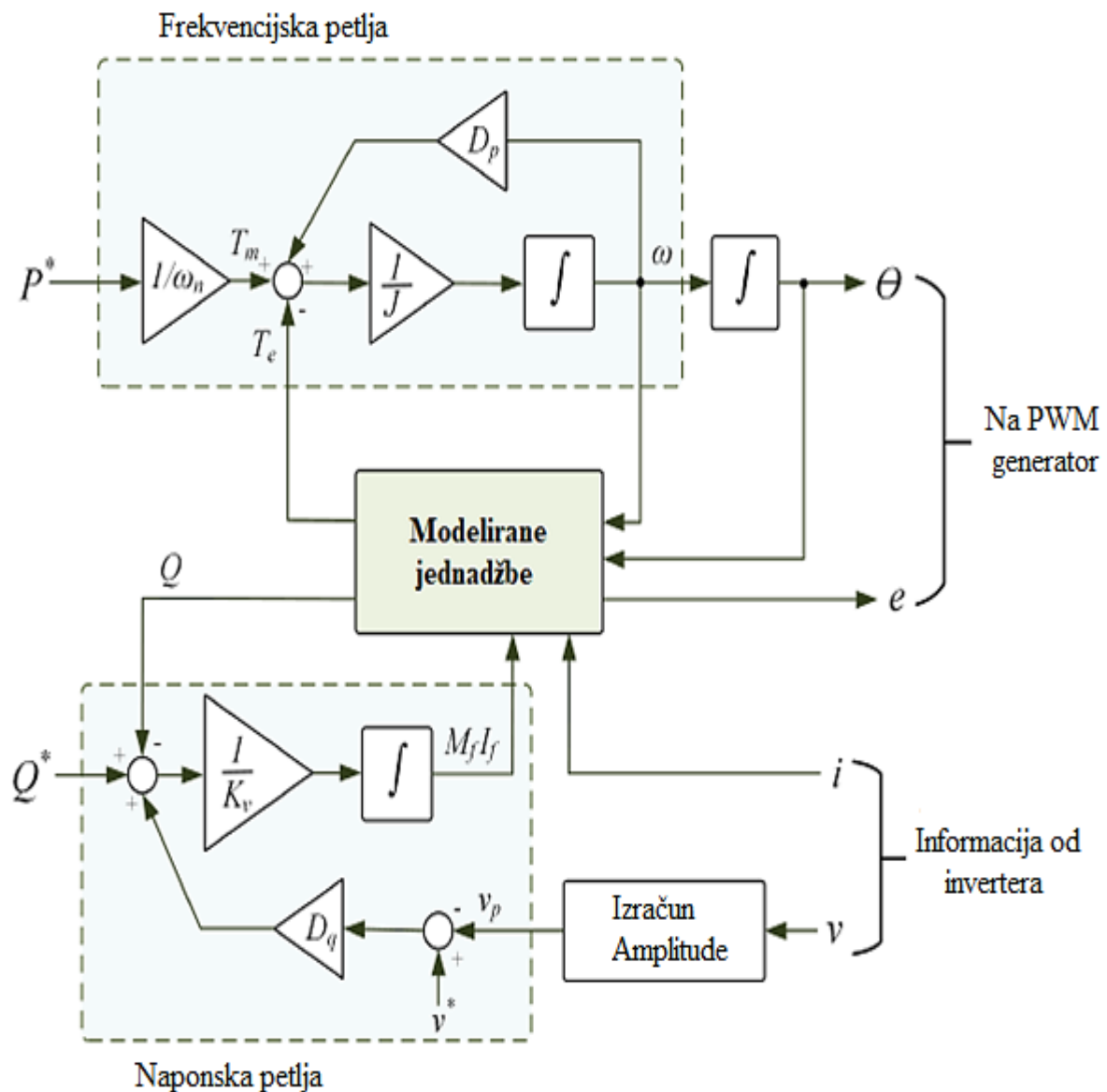
Slika 4.5. prikazuje osnovnu shemu principa rada sinkronvertera. Isprekidani okvir predstavlja upravljački dio sinkronvertera čiji su detalji pruženi na slici 4.6. Izlazna struja invertera ( $i$ ) i napon mreže ( $v$ ) povratni su signali koji se koriste za rješavanje diferencijalnih jednadžbi unutar regulatora. Željeni moment tromosti  $J$  i faktor prigušenja  $D_p$  mogu se odabrati po želji, a odabir ovih parametara je ključan s stajališta stabilnosti sustava. [21]



Slika 4.5. Generalna shema principa rada sinkronvertera [21]

Frekvencijske i naponske petlje, kao što je prikazano na slici 4.6., koriste se za generiranje upravljačkih ulaza — mehaničkog momenta,  $T_m$  i  $M_f I_f$ . U frekvencijskoj petlji,  $T_m$  se generira iz referentne djelatne snage  $P^*$  na temelju nazivne kutne frekvencije mreže  $\omega_n$ . Virtualna kutna frekvencija sinkronvertera  $\omega$  generirana je ovom petljom koja je integrirana za izračunavanje fazne naredbe  $\theta$  i koristi se za modulaciju širine impulsa (PWM). [21]

U naponskoj petlji razlika između referentnog napona ( $v^*$ ) i amplitude mrežnog napona ( $v$ ) množi se s konstantom pada napona  $D_q$ . Ovo se dodaje pogrešci između referentne jalove snage ( $Q^*$ ) i jalove snage ( $Q$ ) izračunate pomoću jednadžbe 4.17. Rezultirajući signal prolazi kroz integrator s pojačanjem od 1 kV za generiranje  $M_f I_f$ . Izlazi regulatora su  $e$  i  $\theta$  koji se koriste za generiranje PWM-a. Na slici 4.6. prikazan je detaljni kontrolni dijagram koji prikazuje jednadžbe modeliranja koje su prethodno spomenute od (4.16) do (4.17). [21]

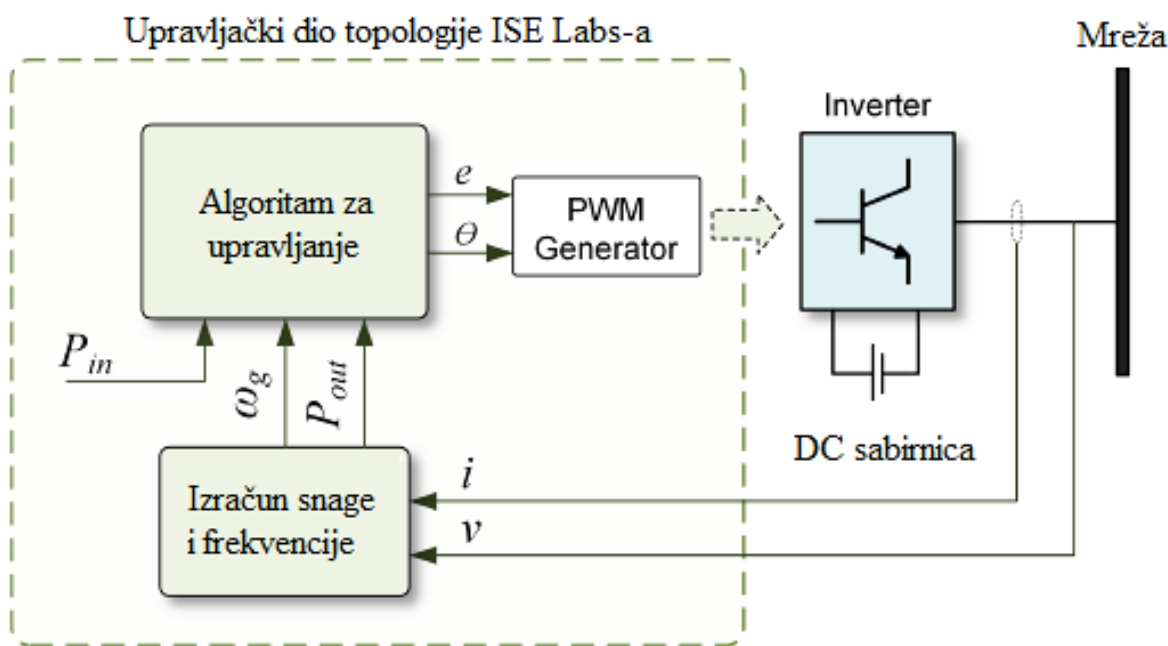


Slika 4.6. Dijagram jednadžbi modeliranja [21]

### 4.3.2. Sustavi temeljeni na jednadžbi njihanja

Topologija temeljena na jednadžbi njihanja (eng. swing equation) je topologija za virtualnu emulaciju inercije temeljena na jednadžbi njihanja SG-a. Stoga, umjesto potpunog modeliranja SG-a, modelirana je samo jednadžba njihanja kako bi se oponašala virtualna inercija. Topologija funkcionira na temelju mjerenja frekvencije mreže i izlazne aktivne snage invertera. U nastavku je za opis ovog sustava odabrana topologija ISE Lab's-a.[21]

Shematski dijagram topologije koji ilustrira princip rada prikazan je na slici 4.7. Regulator očitava izlaznu struju invertera ( $i$ ) i napon točke spajanja ( $v$ ), te izračunava mrežnu frekvenciju  $\omega_g$  i izlaznu aktivnu snagu pretvarača  $P_{out}$ . Ova dva parametra su ulazi u glavni blok upravljačkog algoritma zajedno s  $P_{in}$  koji je ulazna snaga primarnog pokretača. [21]



Slika 4.7. Generalna shema principa rada topologije ISE Labs-a [21]

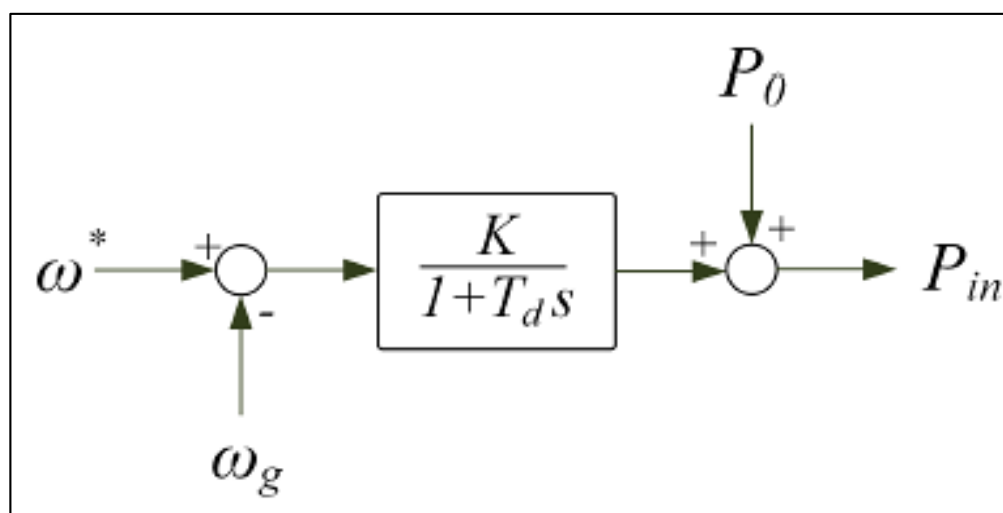
Unutar upravljačkog algoritma, jednadžba njihanja dana jednadžbom (4.19) rješava se svakim kontrolnim ciklusom, čime se generira fazna naredba  $\theta$  za PWM generator. Klasična jednadžba njihanja SG je:

$$P_{in} - P_{out} = J\omega_m \left( \frac{d\omega_m}{dt} \right) + D_p \Delta\omega \quad (4.19)$$

$$\Delta\omega = \omega_m - \omega_g.$$

$P_{in}$ ,  $P_{out}$ ,  $\omega_m$ ,  $\omega_g$ ,  $J$ ,  $D_p$ , predstavljaju ulaznu snagu, a izlaznu snagu invertera predstavljaju virtualna kutna frekvencija, mrežna/nazivna kutna frekvencija, moment tromosti i faktor prigušenja. [21]

Model regulatora, kao što je prikazano na slici 4.8. koristi se za izračunavanje ulazne snage  $P_{in}$  na temelju odstupanja frekvencije od referentne frekvencije  $\omega^*$ . Regulator je modeliran kao element kašnjenja prvog reda s pojačanjem  $K$  i vremenskom konstantom  $T_d$ .  $P_0$  predstavlja kontinuiranu referencu snage za jedinicu distribuirane proizvodnje. Kašnjenje u modelu regulatora dovodi do većeg ROCOF-a i kao posljedicu toga do viših najnižih vrijednosti frekvencije. [21]



Slika 4.8. Model turbinskog regulatora za računanje ulazne snage [21]

Slično kao kod sinkronvertora, derivacija frekvencije nije potrebna za implementaciju upravljačkog algoritma. Ovo je vrlo korisno jer je poznato da frekvencijske derivacije unose šum u sustav što otežava upravljanje sustavom. Osim toga, ova se topologija može koristiti za upravljanje jedinicama distribuirane proizvodnje energije kao i jedinicama za formiranje mreže. Međutim, problemi vezani uz numeričku nestabilnost i dalje ostaju, što uz nepravilno podešavanje parametara  $J$  i  $D_p$ , može dovesti do oscilatornog ponašanja sustava. [21]

#### 4.3.3. Sustavi temeljeni na karakterističnom odzivu snaga-frekvencija

Topologija zasnovana na odzivu frekvencije i snage je topologija za virtualnu inercijsku emulaciju koja se temelji na odgovoru na promjenu frekvencije. Ova topologija koristi mjerenje derivacije promjene frekvencije za oponašanje virtualne inercije. U nastavku je opisana topologija virtualnog sinkronog generatora (VSG). Glavna ideja koja stoji iza virtualnih sinkronih generatora (VSG) je oponašati karakteristike inercijalnog odziva SG u sustavu distribuiranih izvora (DI), a posebno

sposobnost da odgovori na promjene frekvencije. Ovo emulira otpuštanje/apsorpciju kinetičke energije slične onoj kod SG-a, predstavljajući tako jedinice DI kao dispečabilne izvore. [21]

U usporedbi s tradicionalnim „proporcionalnim“ regulatorima koji omogućuju samo regulaciju frekvencije, VSG pristup može osigurati dinamičku regulaciju frekvencije. Ova dinamička kontrola temelji se na derivatu mjerenja frekvencije i ponaša se slično kao inercijalno oslobađanje/apsorpcija snage od strane SG-a tijekom neravnoteže snage. Stoga je VSG dispatchable izvor struje koji regulira svoj izlaz na temelju promjena frekvencije sustava. Ovo je jedan od najjednostavnijih pristupa u implementaciji virtualne inercije u sustave DI budući da ne uključuje sve detaljne jednadžbe uključene u SG. Međutim, poznato je da rad više jedinica DI kao izvora struje dovodi do nestabilnosti. Izlazna snaga VSG pretvarača kontrolira se pomoću jednadžbe [21]:

$$P_{VSG} = K_D \Delta\omega + K_I \frac{d\Delta\omega}{dt} \quad (4.20)$$

gdje je:

$\frac{d\Delta\omega}{dt}$  - promjena kutne frekvencije i odgovarajuća brzina promjene

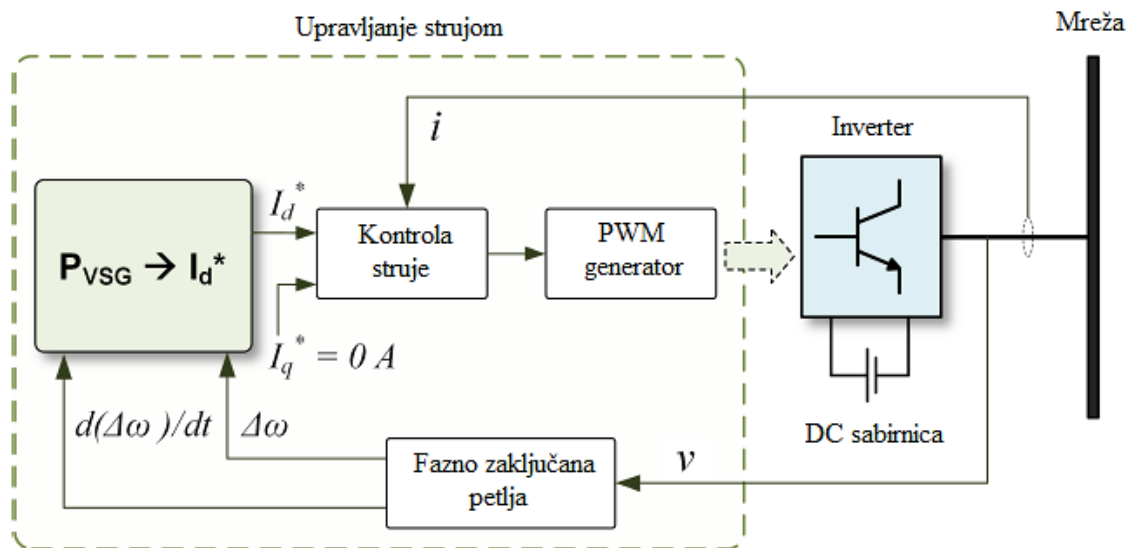
$K_d$  - konstanta prigušenja

$K_i$  - inercijska konstanta

$P_{VSG}$  - izlazna snaga VSG pretvarača

Konstanta prigušenja slična je padu frekvencije i pomaže vratiti frekvenciju na vrijednost stabilnog stanja i smanjiti najnižu frekvenciju. Inercijska konstanta zaustavlja ROCOF pružajući brz dinamički frekvencijski odziv na temelju frekvencijske derivacije. Ova značajka je posebno važna u izoliranoj mreži gdje početni ROCOF može biti vrlo visok, što dovodi do nepotrebnog okidanja zaštitnih releja.

VSG topologija ilustrirana je na slici 4.9. Fazno zaključana petlja (eng. PLL) se koristi za mjerenje promjene frekvencije sustava i ROCOF-a. Zatim se pomoću jednadžbe (PVSG GORE) izračunava referentna aktivna snaga za inverter. Reference struje se zatim generiraju za regulator struje na temelju ove referentne snage. [21]



Slika 4.9. Topologija virtualnog sinkronog generatora (VSG) [21]

Ovdje prikazana topologija pretpostavlja pristup strujnom upravljanju temeljen na izravnoj kvadraturi (d-q), ali se mogu koristiti bilo koje druge tehnike strujnog upravljanja. Za d-q upravljanje, referentna struja u d-osi se može izračunati kao [21]:

$$I_d^* = \frac{2}{3} \left( \frac{V_d P_{VSG} - V_q Q}{V_d^2 + V_q^2} \right) \quad (4.21)$$

gdje je:

$V_d$  - komponenta izmjerenog mrežnog napona  $v$  u d-osi

$V_q$  - komponenta izmjerenog mrežnog napona  $v$  u q-osi

$I_d$  - komponenta struje u d-osi

$I_q$  - komponenta struje u q-osi

$Q$  - jalova snaga

Referenca struje  $I_q$  na q-osi i jalova snaga  $Q$  postavljeni su na nulu jer se pretpostavlja da je samo aktivna snaga kontrolirana. Regulator struje na temelju povratne informacije o struji mreže generira gate-sigale za pogon invertera. Dakle, inverter se ponaša kao strujno upravljani inverter s izvorom napona. [21]

#### 4.3.4. Sustavi temeljeni na „proporcionalnom“ pristupu (eng. Droop-based approach)

Pristupi koji su do sada opisani pokušavaju oponašati ili približiti ponašanje SG-ova kako bi se poboljšao inercijski odziv energetskih sustava kojima dominira inverter. Za razliku od ovih tehnika, regulatori temeljeni na proporcionalnoj regulaciji frekvencije razvijeni su za autonomni rad izoliranih mikromrežnih sustava. Na temelju pretpostavke da je impedancija mreže induktivna, pad frekvencije implementiran je kao:

$$\omega_g = \omega^* - m_p(P_{out} - P_{in}) \quad (4.22)$$

gdje je:

$\omega^*$  - referentna frekvencija

$\omega_g$  - lokalna mrežna frekvencija

$P_{in}$  - referentno postavljena aktivna snaga

$P_{out}$  - izmjerena izlazna aktivna snaga iz jedinice DI

$m_p$  - pad aktivne snage

Slično tome, pad napona se implementira kao:

$$v_g = v^* - m_q(Q_{out} - Q_{in}) \quad (4.23)$$

gdje je:

$v^*$  - referentni napon

$v_g$  - lokalni napon mreže

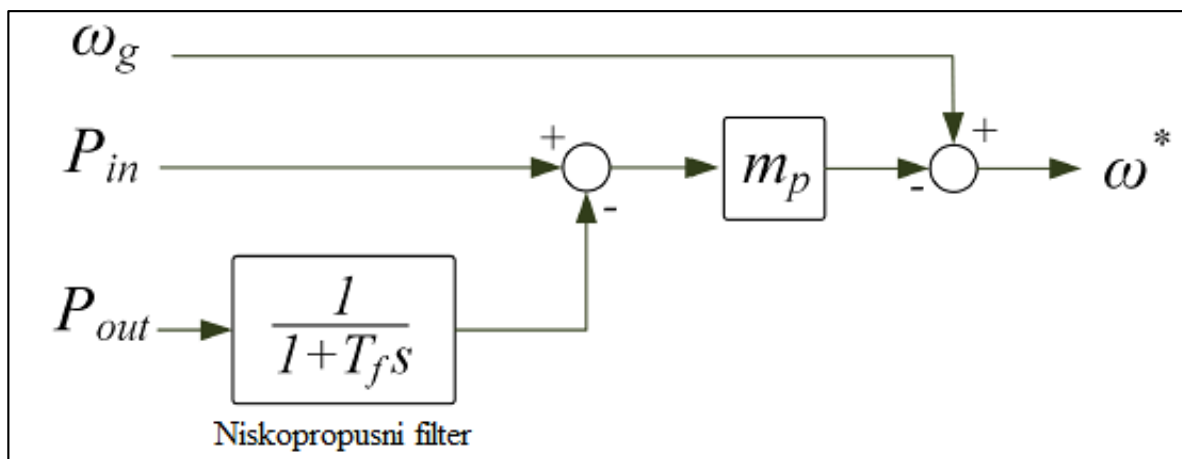
$Q_{in}$  - referentno postavljena jalova snaga

$Q_{out}$  - izmjerena izlazna jalova snaga iz jedinice DI

$m_q$  - pad jalove snage

Schema regulatora pada frekvencije na temelju jednadžbe (ona prva  $\omega_g$ ) prikazana je na slici 4.10. Često se koristi niskopropusni filter s vremenskom konstantom  $T_f$  kada se mjeri izlazna snaga za filtriranje visokofrekventnih komponenti iz invertera. Uporaba ovog filtra čini kontrolu temeljenu na padu približnom ponašanju virtualnih inercijskih sustava. [21]





Slika 4.10. Shema regulatora pada frekvencije [21]

#### 4.3.5. Ostali sustavi za implementaciju virtualne inercije

U nastavku su ukratko opisani ostali sustavi za implementaciju virtualne inercije. Neke od topologija koje se još spominju na slici 4.4. su virtualni sinkroni stroj (VISMA), topologija Instituta za elektroenergetiku (IEPE), topologija laboratorija Kawasaki Heavy Industries (KHI), sinkroni regulatori snage (SPC), virtualni oscilatori, induktori, itd. Osnovni koncept emulacije (oponašanja) inercije ostaje isti u svim ovim tehnikama. Topologija VISMA koristi matematički model SG-a temeljen na sinkronom referentnom okviru d-q. Ovaj model kada se implementira u digitalni upravljač invertera snage, replicira dinamiku SG-a. Trenutna mjerenja mrežnog napona koriste se za izračunavanje struja statora virtualnog stroja i te se struje implementiraju pristupom kontrole struje histereze pomoću invertera snage. Međutim, zabilježeni su problemi s numeričkom nestabilnošću kod VISMA modela. Kako bi se poboljšala robusnost predložen je trofazni model umjesto modela temeljenog na d-q. Ovo je posebno učinkovito u uvjetima nesimetričnog opterećenja ili brzim poremećajima u mreži. [21]

VISMA model implementiran kao izvor napona u literaturi se naziva IEPE-ova topologija. Umjesto korištenja napona kao ulaza kao kod VISMA topologije, IEPE-ova topologija koristi izlaznu struju DI-a kao ulaz i generira referentne napone za virtualni stroj. IEPE topologija je prikladnija za otočni rad, ali može biti teško riješiti prijelazne struje, posebno tijekom procesa sinkronizacije kada se radi u mrežnom načinu rada. [21]

U topologiji KHI, umjesto korištenja detaljnog dinamičkog modela SG-a, ekvivalentni model regulatora i automatskog regulatora napona (AVR) implementiran je u digitalni kontroler za generiranje amplitude napona i referentne faze za virtualni stroj. [21]

Druga popularna topologija za implementaciju virtualne inercije je SPC. Opća struktura upravljačkog algoritma slična je strukturi predloženoj u topologiji laboratorija Ise, ali umjesto da pretvarač radi kao sustav kontroliran naponom ili strujom, on implementira kaskadni sustav upravljanja s vanjskom naponskom petljom i unutarnju petlju upravljanja strujom pomoću virtualne admitancije. Općenito, takva kaskadna upravljačka struktura pruža svojstvenu prekostrujnu zaštitu tijekom teških prijelaznih radnih uvjeta. [21]

Kod drugih pristupa nedostaje princip otvorene petlje kao što su sinkronverteri ili topologija laboratorija Ise. SPC također izbjegava diskontinuitete koji se javljaju u rješavanju matematičkih modela, čineći tako sustav otpornijim na numeričke nestabilnosti. Međutim, struktura ugniježdene petlje podrazumijeva složenost u podešavanju parametara upravljačkog sustava. Nadalje, u svojoj srži, umjesto korištenja jednadžbe njihanja za emulaciju inercije, predlaže se model drugog reda s prekomjerno prigušenim odzivom. [21]

Indukcijski pretvarači jedna su od nedavno predloženih topologija koji pokušavaju oponašati ponašanje indukcijskih generatora umjesto SG-a. Ova metoda ima prednost automatske sinkronizacije bez PLL-a. Regulator statičkog sinkronog kompenzatora (STATCOM) koji se temelji na virtualnoj inerciji ponaša se kao sinkroni kondenzator. Virtualni inercijski kontroler korišten je za iskorištavanje činjenice da nije potreban PLL, čime se osigurava poboljšana regulacija napona u usporedbi s tradicionalnim STATCOM-ima s PLL jedinicama. [21]

Kontroler virtualnog oscilatora (VOC) je još jedan pristup gdje se, umjesto oponašanja sinkronih/indukcijskih generatora, nelinearni oscilator implementira unutar kontrolera za sinkronizaciju jedinica DI-a bez ikakvog oblika komunikacije. Ovaj pristup je posebno koristan za mrežu u kojoj uglavnom dominiraju DI, budući da je upravljač intrinzično sposoban održavati sinkronizam i dijeliti ukupno opterećenje sustava. [21]

U tablici 4.1. pružen je sažetak karakteristika osnovnih topologija za implementaciju virtualne inercije u EES, gdje su istaknute slabosti i osobine tih sustava.

Tablica 4.1. Sažetak osnovnih topologija za implementaciju virtualne inercije [21]

<b>Način kontrole (topologije)</b>	<b>Glavne značajke</b>	<b>Slabe točke</b>
<b>Model sinkronog generatora</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Precizna replika dinamike SG-a</li> <li>- Derivacija frekvencije nije potrebna</li> <li>- Fazno zaključana petlja (PLL) koristi se samo za sinkronizaciju</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Problemi s numeričkom nestabilnošću</li> <li>- Tipično implementacija izvora napona;</li> <li>- Nema prekostrujnu zaštitu</li> </ul>
<b>Jednadžba njihanja</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Jednostavniji od modela SG</li> <li>- Derivacija frekvencije nije potrebna</li> <li>- Fazno zaključana petlja se koristi samo za sinkronizaciju</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Oscilacije snage i frekvencije</li> <li>- Tipično implementacija izvora napona</li> <li>- Nema prekostrujnu zaštitu</li> </ul>
<b>Karakteristični odziv snaga-frekvencija</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Jednostavna implementacija</li> <li>- Tipična implementacija izvora struje; inherentna prekostrujna zaštita</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nestabilnost zbog fazno zaključane petlje</li> <li>- Potrebna derivacija frekvencije</li> <li>- Osjetljivost sustava na šum</li> </ul>
<b>„Proporcionalni“ pristup</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nema komunikacije</li> <li>- Sličan koncept tradicionalnoj kontroli pada u SG</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Spor prijelazni odziv</li> <li>- Nepravilno dijeljenje prijelazne aktivne snage</li> </ul>

## 5. NADOMJESNI MODEL BSEE

### 5.1. Struktura modela baterije unutar BSEE

Za potrebe simulacije, korišten je model BSEE koji je implementiran u PowerFactory programu. Sustav za pohranu baterije BSEE sastoji se od dva dijela. Prvo dio je za pohranu koji bi mogao pohraniti/povratiti energiju u elektrokemijskom procesu, a drugi dio je ispravljač/inverter koji bi mogao transformirati DC napon iz dijela za pohranu, u AC napon potreban za mrežu i obrnuto.[22]

Ispravljač/inverter se obično temelji na pretvaraču izvora napona s modulacijom širine impulsa (eng. PWM). Dio za pohranjivanje, u ovom slučaju punjive baterije, je element koji ovisi o stvarnoj primjeni. Problem s baterijama su velika raznolikost tehnologija, kao i raznolikost unutar jedne tehnologije. Stoga ne postoji jednostavan, točan model koji vrijedi za sve baterije. [22]

Dva su glavna izazova s modelima baterija. Prvi problem je dobiti model koji nije previše složen, ali da je dovoljno precizan, a drugi problem je dobiti parametre od proizvođača ili vlastite mjere potrebne za model. Samo model s odgovarajućim parametrima može dati dobre rezultate. [22]

Napon terminala i unutarnji otpor su funkcija nekoliko interno povezanih varijabli kao što su stanje napunjenosti baterije (SOC), starost i temperatura baterije. Stanje napunjenosti odgovara trenutnom stanju punjenja baterije. Baterija je potpuno napunjena ako je SOC jedan i nula ako je baterija je prazna. Ovisi o slučaju primjene koji će se model koristiti. Postoji važna jednadžba za kapacitet svih olovnih baterija, nazvana "Peukertov zakon" (5.1). Izražava kapacitet baterije u smislu brzine pražnjenja. Kako se brzina povećava, raspoloživi kapacitet baterije se smanjuje [22]:

$$C_p = I^k t \quad (5.1)$$

gdje je:

$C_p$  - Kapacitet prema „Peukert-u“, prilikom brzine pražnjenja od 1A

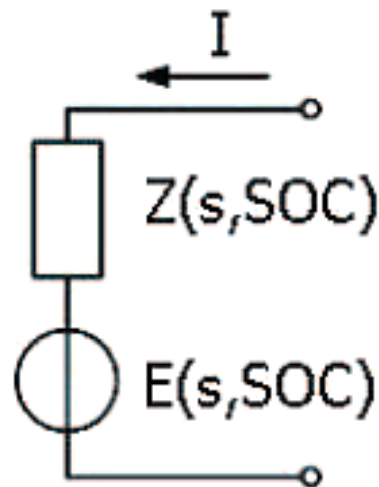
$I$  - Struja pražnjenja

$k$  - Peukert-ova konstanta

$t$  - Vrijeme pražnjenja

Za dobivanje jednostavnog, ali funkcionalnog modela uzete su u obzir određene pretpostavke. U početku se pretpostavlja da je baterija ispražnjena samo do 20%. U tom slučaju može se pretpostaviti da napon linearno ovisi o SOC. Osim toga, unutarnji otpor se pretpostavlja kao

konstantan jer ionako mora biti vrlo malen zbog primjene velike struje. Pretpostavlja se da je kapacitet baterije konstantan, to vrijedi ako je struja pražnjenja unaprijed poznata. Tako da se očekivani kapacitet može izračunati i umetnuti u podatke modela. [22]



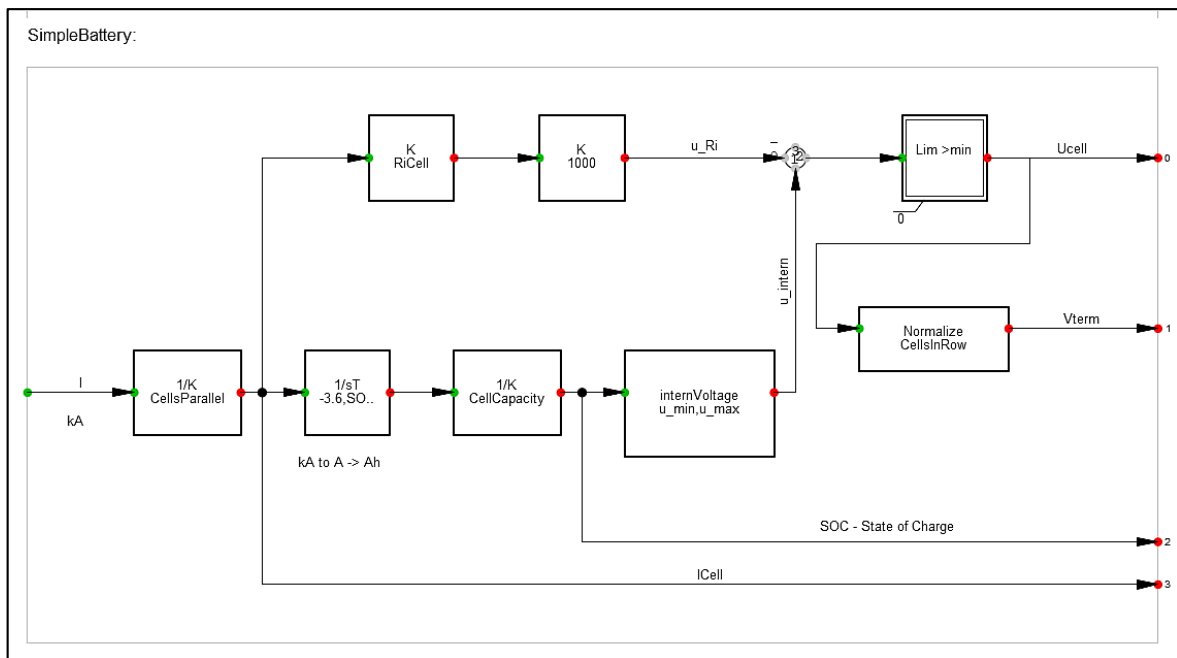
Slika 5.1. Ekvivalentan model jednostavnoj bateriji [22]

Jednadžba za jednostavni model (Slika 5.1.) s opisanim pretpostavkama dana je formulom (5.2), gdje se SOC izračunava pomoću integratora, računajući struju baterije. [22]

$$U_{DC} = U_{max} \cdot SOC + U_{min} \cdot (1 - SOC) - I \cdot Z_i \quad (5.2)$$

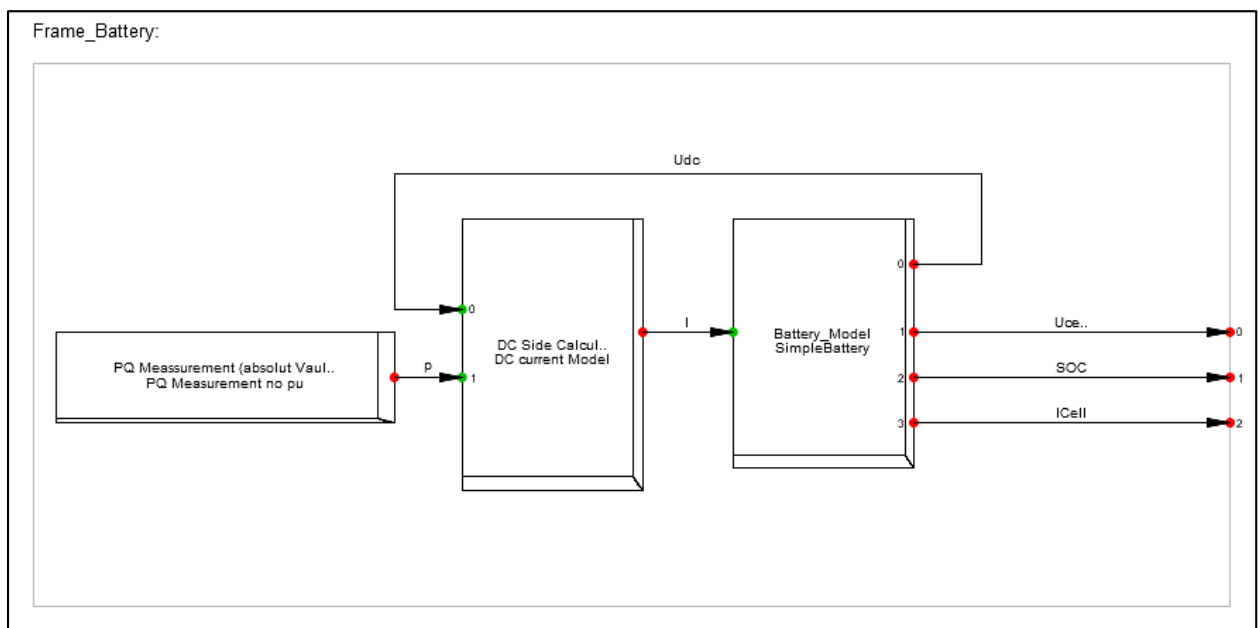
Implementacija modela baterije je napravljena u DSL-u (Slika 5.2). Samo je istosmjerna struja potrebna kao ulazni signal za model. Model daje vanjski istosmjerni napon, SOC i također napon istosmjerne ćelije koji bi mogao biti potreban za regulator punjenja. [22]

Na slici 5.2.,  $u_{min}$  predstavlja napon ćelije od ispražnjene ćelije, a  $u_{max}$  predstavlja napon ćelije potpuno pune ćelije.  $CellCapacity$  predstavlja kapacitet jedne ćelije za iskorištenu struju pražnjenja,  $CellsParallel$  predstavlja količinu paralelno spojenih ćelija, a  $CellsInRow$  je količina serijski spojenih ćelija.  $RiCell$  je unutarnji otpor po ćeliji (prosječna vrijednost),  $Unom$  je nazivni napon spojene DC sabirnice i  $SOC0$  predstavlja stanje napunjenosti na početku simulacije. [22]



Slika 5.2. Struktura modela baterije unutar BSEE [22]

Integrator ( $1/sT$ ) koji računa ulaznu struju i izlaz baterije treba početno stanje (SOC0). Ova vrijednost je dio parametara modela. Tijekom procesa inicijalizacije pretpostavlja se da se baterija ne puni (ili ne prazni). Dakle, razmjena aktivne snage BSEE je nula za tokove snaga. Za primjenu izlaznog napona modela baterije (Slika 5.2.) na izvor istosmjernog napona koristi se DSL okvir koji je prikazan na slici 5.3. [22]



Slika 5.3. Okvir u DSL-u za model baterije [22]

## 5.2. Struktura modela BSEE

Kod BSEE-a s pretvaračem temeljenim na IGBT-u (eng. insulated-gate bipolar transistor), postoje dva strujna parametra za kontrolu, jedan u d-osi i jedan u q-osi što je jednako stvarnoj i reaktivnoj snazi. Sa stvarnom izlaznom snagom moguće je kontrolirati frekvenciju mreže sa sinkronim generatorima. Pomoću jalove snage može se kontrolirati izmjenični napon. Izlazna jalova snaga BSEE nije vezana za kapacitet baterije, tako da se AC-napon može kontinuirano kontrolirati. Ali prividna snaga PWM-pretvarača je ograničena, a s time i jalova snaga [22]:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (5.3)$$

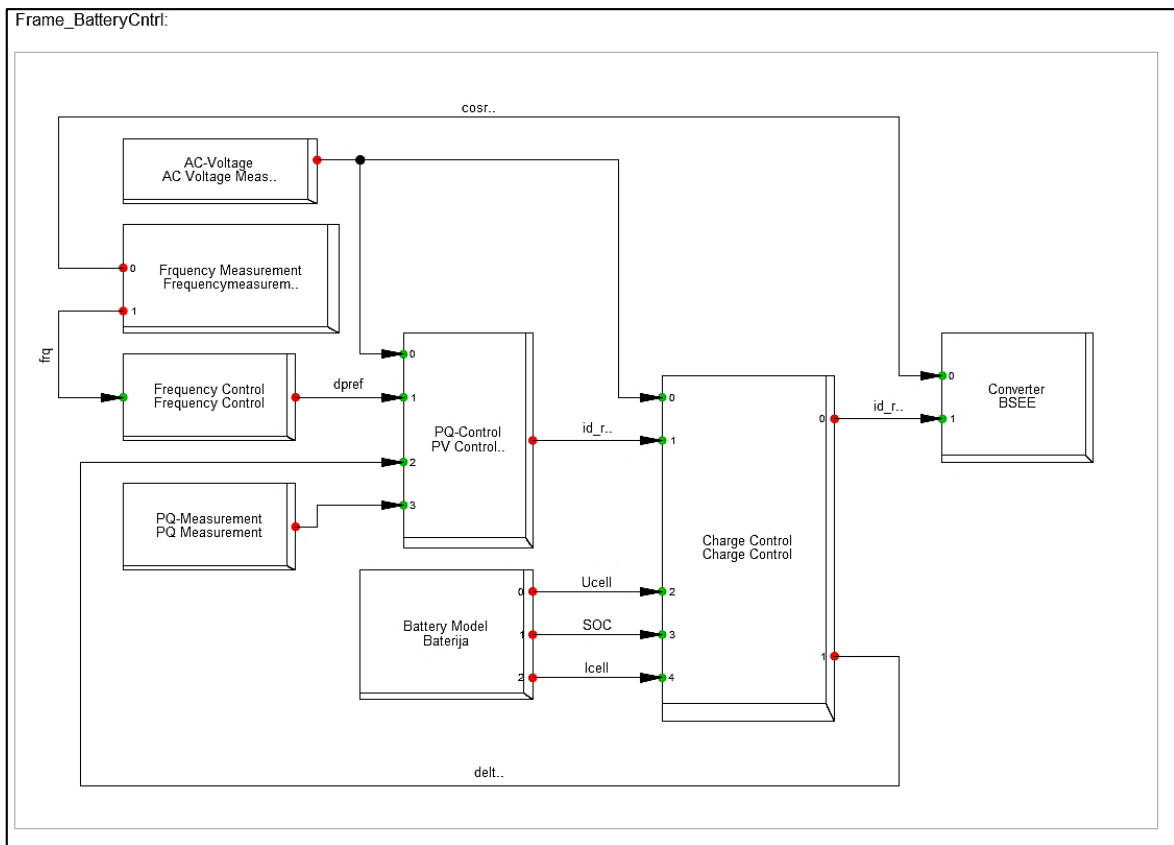
Rubni uvjeti koje je potrebno uzeti u obzir:

- BSEE bi mogao trošiti aktivnu snagu samo ako baterija nije potpuno napunjena ( $SOC < 1$ )
- BSEE može dati aktivnu snagu samo ako baterija nije ispražnjena ( $SOC > 0$ ).
- Bateriju treba ponovno napuniti ako je SOC ispod određene razine.
- Ukupni izlaz djelatne i jalove snage zajedno ne smije biti veći od prividne nazivne snage, prema (5.3). Stoga je potreban prioritet za djelatnu ili jalovu snagu.

Svi uvjeti mogu se ispuniti iz regulatora punjenja. Pretpostavljeno je da je SOC dostupan kao signal, dok u stvarnoj primjeni SOC se mora izračunati iz struje i napona baterije. Kada su svi zadaci i uvjeti za kontroler poznati, tada se prelazi na dizajn u DSL-u. Kako bi se bolje razjasnio dizajn u DSL-u, regulator se dijeli na 3 dijela [22]:

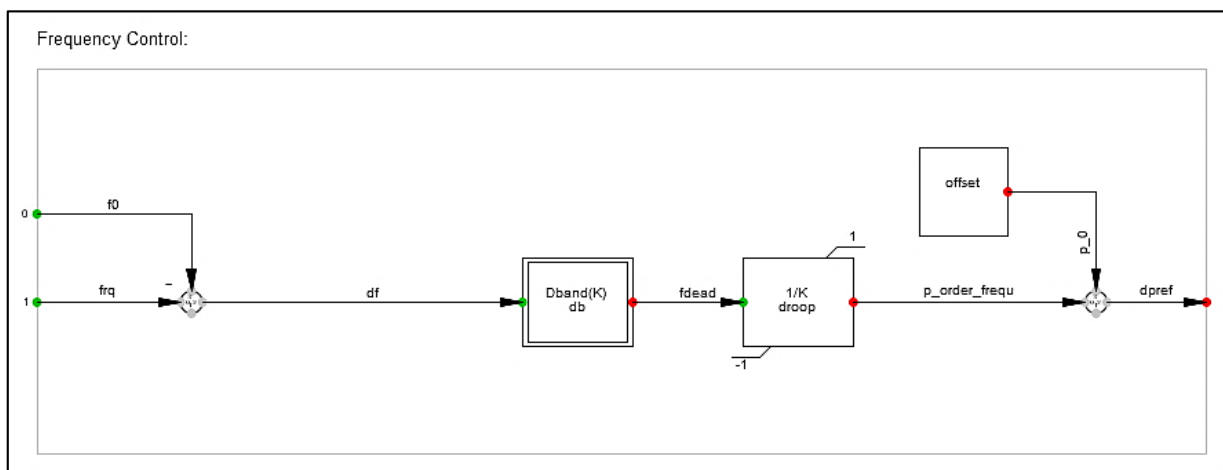
- Frekvencijski regulator (Frequency Control)
- Regulator aktivne/jalove snage (PQ-Control)
- Kontroler punjenja (Charge Control)

Zajedno s potrebnim mjernim uređajima dobiva se struktura prikazana na slici 5.4. Ova se struktura u PowerFactory-ju naziva okvir (eng. Frame). Okvir i DSL model su samo definicija (.BlkDef), poput vrste voda ili transformatora. Entitet okvira je kompozitni model (.ElmComp). Entitet DSL modela je uobičajeni model (.ElmDsl). [22]



Slika 5.4. Struktura modela BSEE unutar PowerFactory programa [22]

Regulator frekvencije je jednostavan proporcionalni regulator s malim mrtvim pojasom (eng. dead band), a njegov model prikazan je na slici 5.5. [22]



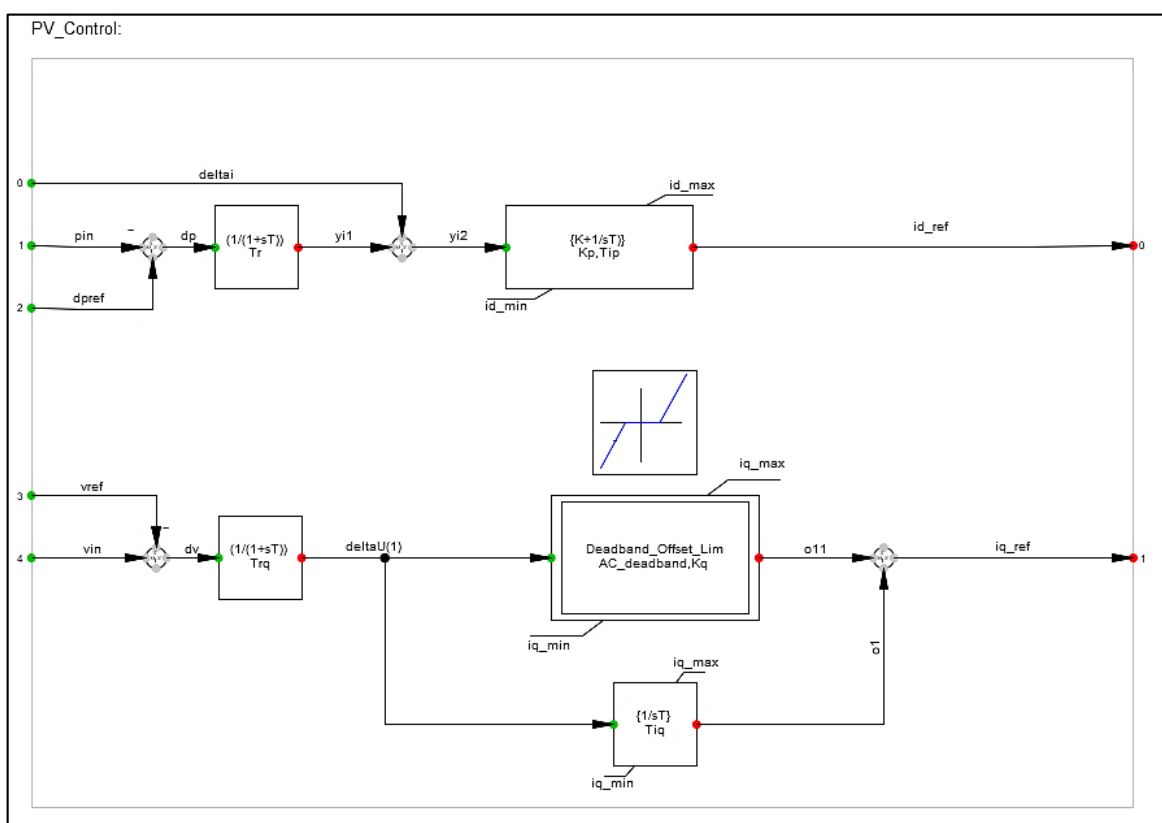
Slika 5.5. Model regulatora frekvencije [22]

„Droop“ definira koliko se djelatne snage aktivira u slučaju odstupanja frekvencije. Pod uvjetom da je  $K = 0.04$ , dolazi do aktivacije pune djelatne snage BSEE ako je odstupanje frekvencije jednako ili veće od 2 Hz (u sustavu od 50 Hz). [22]



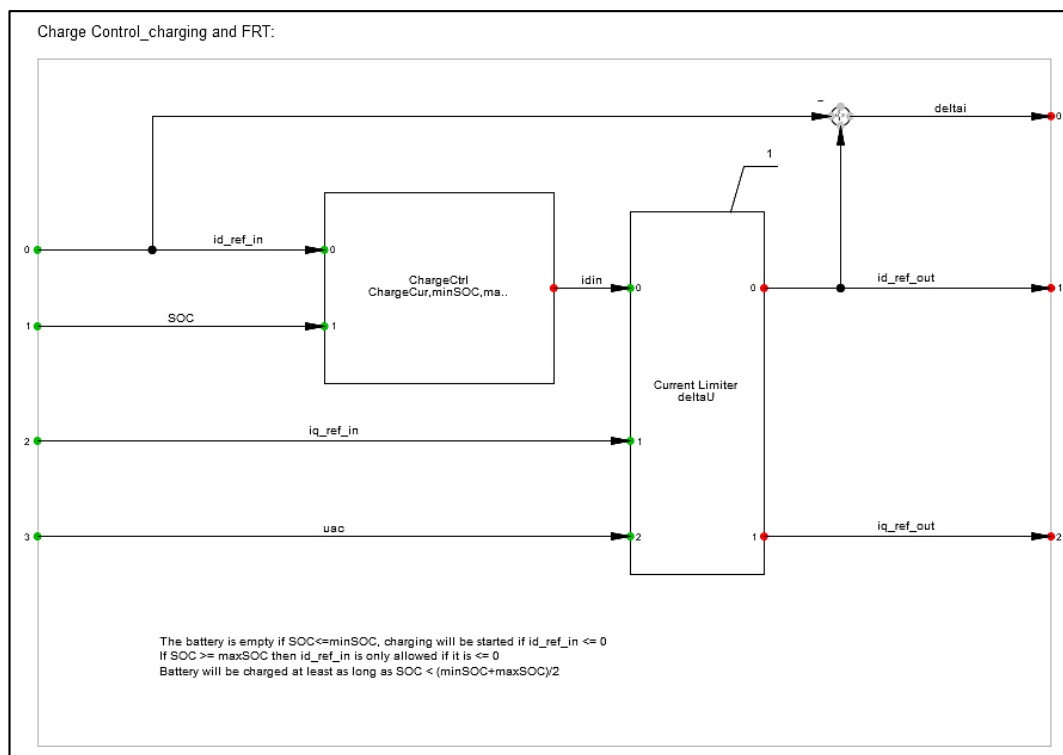
Vrijednosti su sve izražene u p.u. vrijednostima. „Droop“ bi trebao biti koordiniran kako bi se ispunili zahtjevi mreže prilikom primjene za određeni slučaj. Varijabla naredbe je  $f_0$ , tijekom procesa inicijalizacije ova vrijednost će biti fiksirana na  $frq$  (obično 1) s naredbom  $inc(f_0) = frq$ . Blok "offset" s izlazom "p\_0" koristi se za kompenzaciju "dpref" ako ta vrijednost nije jednaka nuli nakon tokova snaga (jer je "p order frequ" uvijek nula nakon inicijalizacije). [22]

Regulator djelatne i jalove snage je prikazan na slici 5.6. Kontrolno odstupanje se filtrira pomoću „PT1“ elementa. Nakon toga se signali koriste kao ulaz u PI-regulator. U aktivnoj putanji je dodan signal "delta i". Na slici 5.4. može se vidjeti da "delta i" dolazi od regulatora punjenja. Regulator napona (ili jalove snage) ima vrlo spor I-regulator za praćenje zadane vrijednosti i ima nagib s mrtvim pojasom (eng. dead band) za proporcionalnu podršku naponu. [22]



Slika 5.6. Model regulatora djelatne i jalove snage [22]

Regulator punjenja sastoji se od dva dijela (Slika 5.7). Jedna logika punjenja za postizanje već opisanih rubnih uvjeta i jedan blok koji ograničava apsolutnu vrijednost strujnog naloga prema (5.3). Aktivna struja (d-os) uvijek ima veći prioritet od jalove struje (q-os), a potrebna su samo četiri parametra. Parametri su struja punjenja (ChargingCur), minimalni SOC (minSOC), maksimalni SOC (maxSOC) i maksimalna apsolutna struja (maxAbsCur). Signal "delta i" razlika je referentne d-struje iz PQ-kontrolera i modificirane d-struje iz logike punjenja. [22]



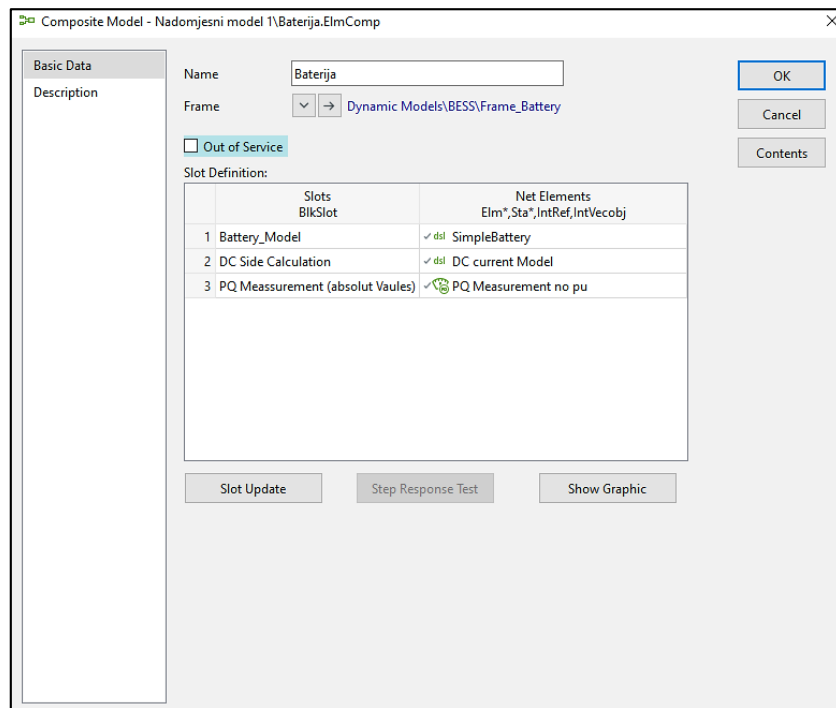
Slika 5.7. Model regulatora punjenja [22]

Ispravna imena za signale u definiciji okvira su vrlo važna jer se spajaju samo signali s istim imenima u okviru i u modelu umetnutom u okvir. Prvi korak simulacije je inicijalizacija, gdje PowerFactory za to koristi tokove snaga. Ako tokovi snaga konvergiraju, rezultati se koriste unutar DSL modela za postavljanje svih izlaza integratora. Polazna točka simulacije uvijek bi trebala biti uravnoteženo stanje. Dakle, sve derivacije moraju biti nula, tj. svi ulazi integratora također moraju biti nula. Ulazi, poznati iz rezultata tokova snage nalaze se u kompozitnom modelu regulatora (Slika 5.4.) [22]:

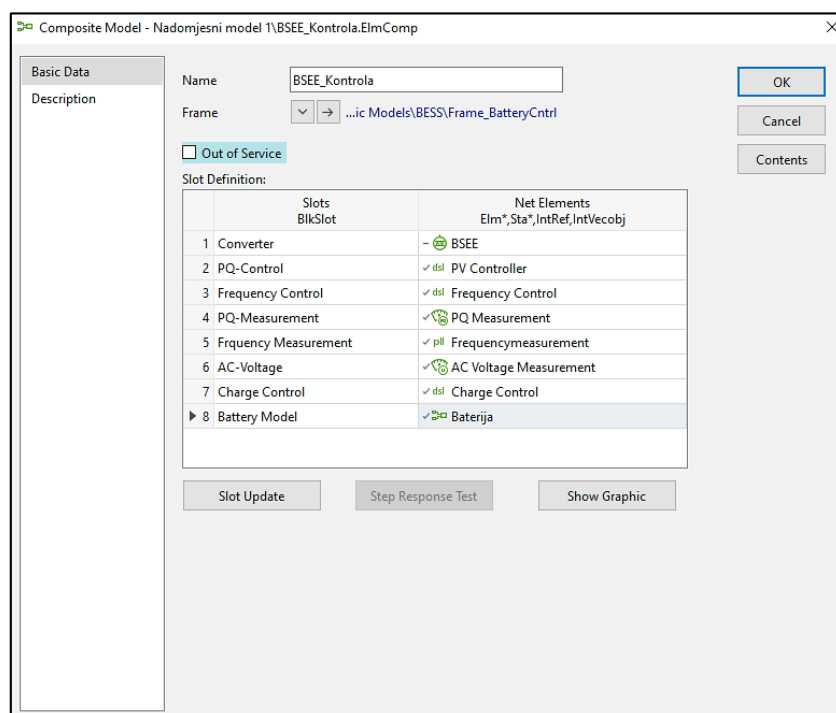
- $id\_ref/iq\_ref$  - (struje u dq-okviru u p.u.) poznate iz PWM-pretvarača
- $fmeas$  - (frekvencija u p.u.) poznata iz PLL mjernog uređaja
- $u$  - (apsolutni izmjenični napon u p.u.) poznat iz uređaja za mjerenje napona
- $p$  - (aktivna snaga u p.u.) poznata iz uređaja za mjerenje snage

Utor (eng. slot) „Modela baterije” ispunjen je kompozitnim modelom baterije (Slika 5.3). Nakon inicijalizacije dobiju se tokovi snaga i poznata struja. Nakon projektiranja okvira i modela mogu se izraditi kompozitni i zajednički modeli. Postoje dva kompozitna modela, jedan za bateriju (Slika 5.8.) i jedan za upravljanje BSEE (Slika 5.9.). Utori su popunjeni odgovarajućim entitetima DSL modela. Mjerni uređaji moraju biti pravilno izrađeni i povezani, te naponski mjerni uređaj mora biti spojen samo na odgovarajuću sabirnicu. Za uređaj za mjerenje struje ili snage također je važno

odabrati odgovarajući „ormarić“ (eng. cubicle) na sabirnici. Inače bi prefiks izmjerеног signala mogao biti pogrešan, a time i cijela strategija upravljanja. Nakon ispravnog postavljanja parametara i mjernih instrumenata, implementirani BSEE se može koristiti za potrebe simulacija. U ovome radu korišteni su parametri BSEE koji su već prethodno bili zadani unutar programa PowerFactory 2022. [22]



Slika 5.8. Kompozitni model baterije [22]

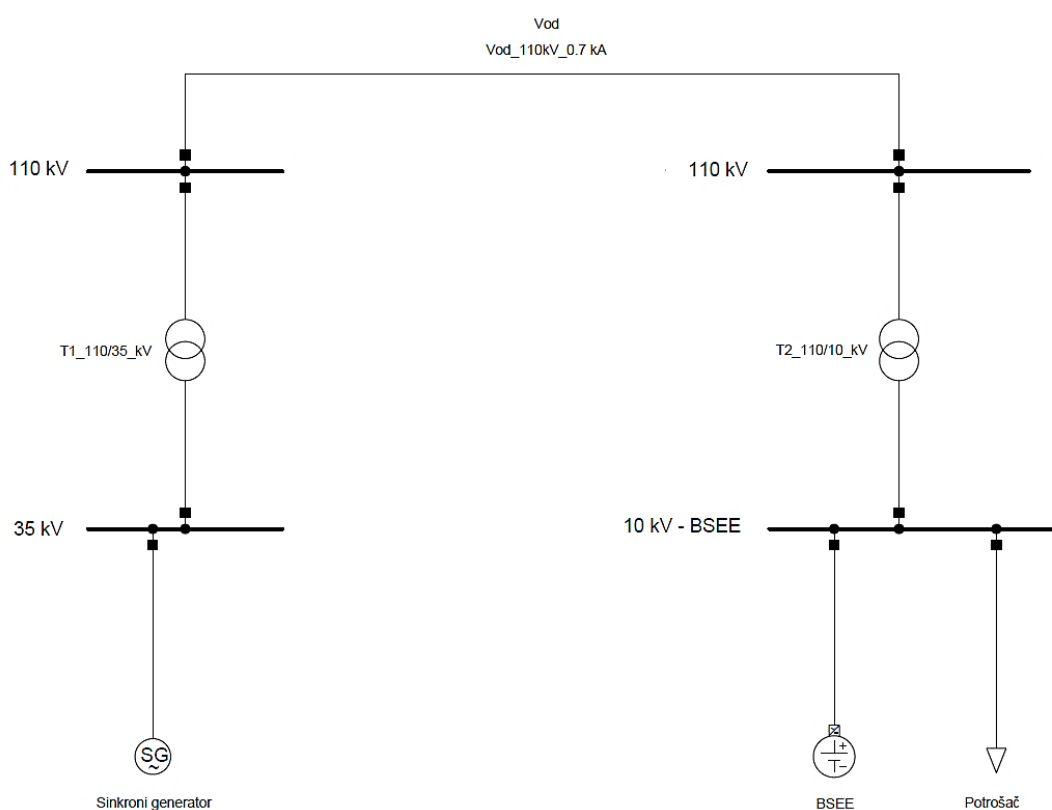


Slika 5.9. Kompozitni model upravljanja BSEE [22]

## 6. SIMULACIJA VIRTUALNE INERCIJE S BSEE

### 6.1. Simulacija virtualne inercije u EES-u

Za potrebe simulacije virtualne inercije korišten je nadomjesni model mreže koji je prikazan na slici 6.1. Sastoji se od jednog generatora, dva transformatora, nadzemnog voda, potrošača i baterijskog spremnika za pohranu energije. Podatci o elementima mreže pruženi su u tablicama (6.1)-(6.6) Za simulaciju korišten je PowerFactory 2022, tvrtke DIGSILENT. PowerFactory predstavlja računalni alat koji se koristi za analizu prijenosnih, distribucijskih, proizvodnih i industrijskih sustava.



Slika 6.1. Nadomjesni model mreže za simulaciju

Cilj ove simulacije je promatrati utjecaj baterijskog spremnika za pohranu energije na mrežnu frekvenciju prilikom poremećajnih prilika, te povećavanje inercije cjelokupnog sustava pomoću virtualne inercije koristeći BSEE.

Nadomjesni model na slici 6.1. predstavlja jednostavnu mrežu koja je dovoljna za potrebe simulacije frekvencije i promatranja utjecaja BSEE na nju. U nekom realnijem slučaju, EES se sastoji od kombinacije konvencionalnih i nekonvencionalnih izvora energije. S time dolazi do sve većeg prodora inverterske tehnologije zbog koje se utjecaj virtualne inercije znatno istražuje.

Tablica 6.1. Osnovni parametri generatora

Generatori	P [MW]	Q [Mvar]	Sn [MVA]	Un [kV]	cosφ	H [s]	xd [p.u.]	xd' [p.u.]	xd'' [p.u.]
Sinkroni generator	5.085	-0.240	40	35	1	4	2,3	0,4	0,25

Tablica 6.2. Osnovni parametri baterijskog spremnika

Baterijski spremnik	Sn [MVA]	cosφ
BSEE	5	1

Tablica 6.3. Osnovni parametri voda

Vodovi	l [km]	Un [kV]	In [kV]	f [Hz]	Tip voda	Materijal	T <sub>max</sub> [°C]	R1 [Ω]	X1 [Ω]	R0 [Ω]	X0 [Ω]
Vod	10	110	0.7	50	Nadzemni	Alu/Čel	80	2.5	6	4.5	12.5

Tablica 6.4. Osnovni parametri transformatora

Transformatori	Spoj	Sn [MVA]	U1 [kV]	U2 [kV]	uk [%]	fn [Hz]
T1_110/35_kV	YNd0	40	110	35	10	50
T2_110/10_kV	YNd0	40	110	10	10	50

Tablica 6.5. Osnovni parametri sabirnica

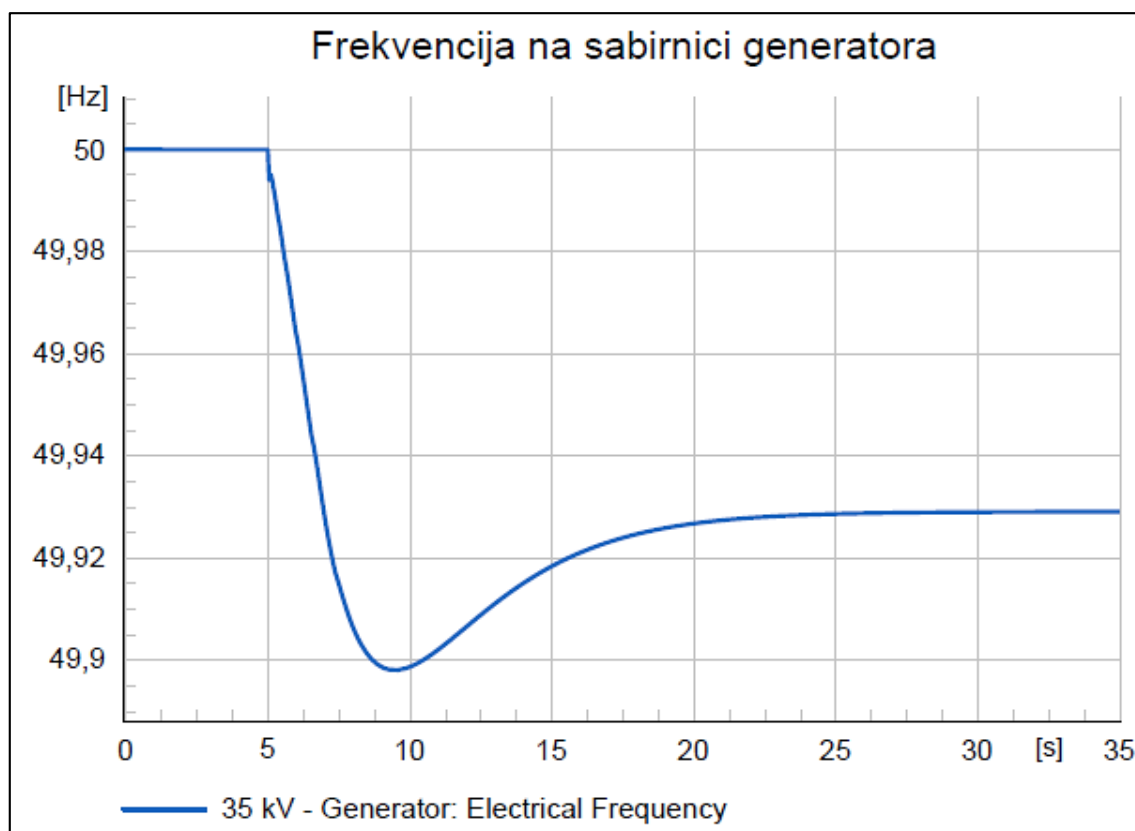
Sabirnice	f [Hz]	Un [kV]
35 kV	50	35
110 kV	50	110
110 kV	50	110
10 kV - BSEE	50	10

Tablica 6.6. Osnovni parametri potrošača

Potrošači	P [MW]	Q [Mvar]
Potrošač	5	0

### 6.1.1. Simulacija inercije sustava bez BSEE

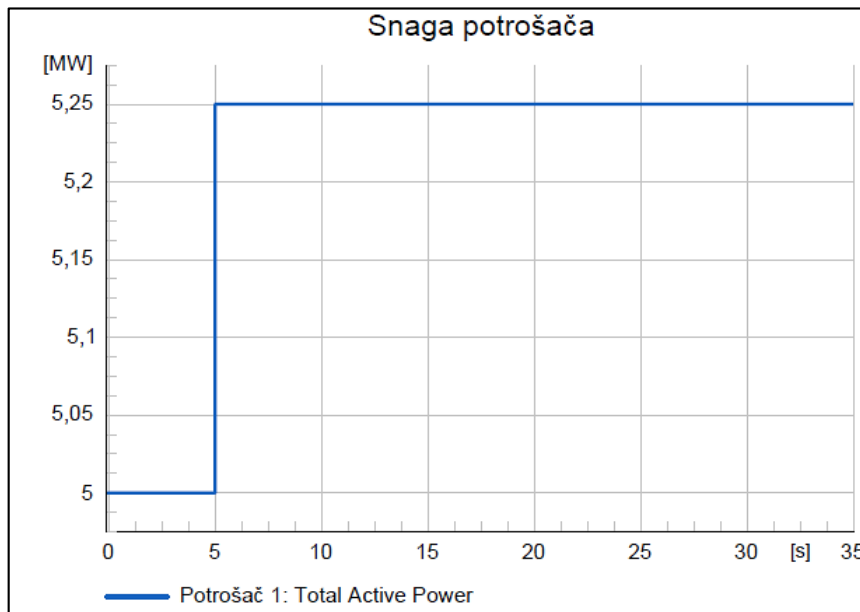
Prvi slučaj simulacije sustava bez BSEE predstavlja inverterski dominantan sustav u kojemu postoji nedostatak prirodne inercije, na slici 6.2. prikazan je odziv frekvencije te mreže, u kojoj je u trenutku  $t=5s$  nastao poremećaj. Unutar raspona od 0-5s frekvencija je stabilna i nalazi se na karakterističnoj nazivnoj vrijednosti frekvencije koja je oko 50 Hz (Prilikom privremenog stacionarnog stanja, za interkonekcijski rad, maksimalna odstupanja frekvencije od zadane vrijednosti ne smije prijeći  $\pm 180$  mHz [18]). Nadalje, u trenutku  $t = 5s$  javlja se poremećaj koji narušava stabilnost frekvencije i spušta ju na 49.93 Hz.



Slika 6.2. Odziv frekvencije mreže uslijed poremećaja

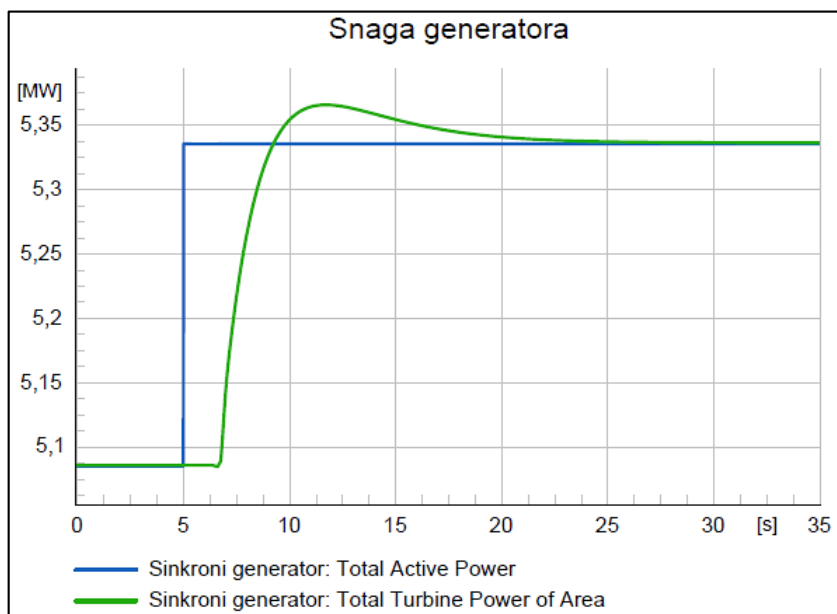
Na slici se vremenski raspon između  $t = 5s$  i  $t \approx 10s$  karakterizira kao inercijski odziv sustava koji se opire trenutnoj promjeni pada frekvencije (tj. opire se poremećaju). Može se zaključiti da prilikom simulacije mreže bez BSEE frekvencija strmo pada. Razlog tome je što u inverterski dominantnim sustavima postoji nedostatak prirodne inercije pa samim time je i ROCOF veći, a posljedično tome i NADIR je veći. Nakon što se dogodio inercijski odziv sustava, na vrijednosti od  $t \approx 10s$  počinje primarna regulacija frekvencije.

Tijekom simulacije dodan je poremećaj u EES-u definiran kao povećavanje aktivne snage potrošača za 5% u trenutku  $t = 5\text{s}$ , što se može vidjeti na slici 6.3.



Slika 6.3. Povećanje aktivne snage potrošača

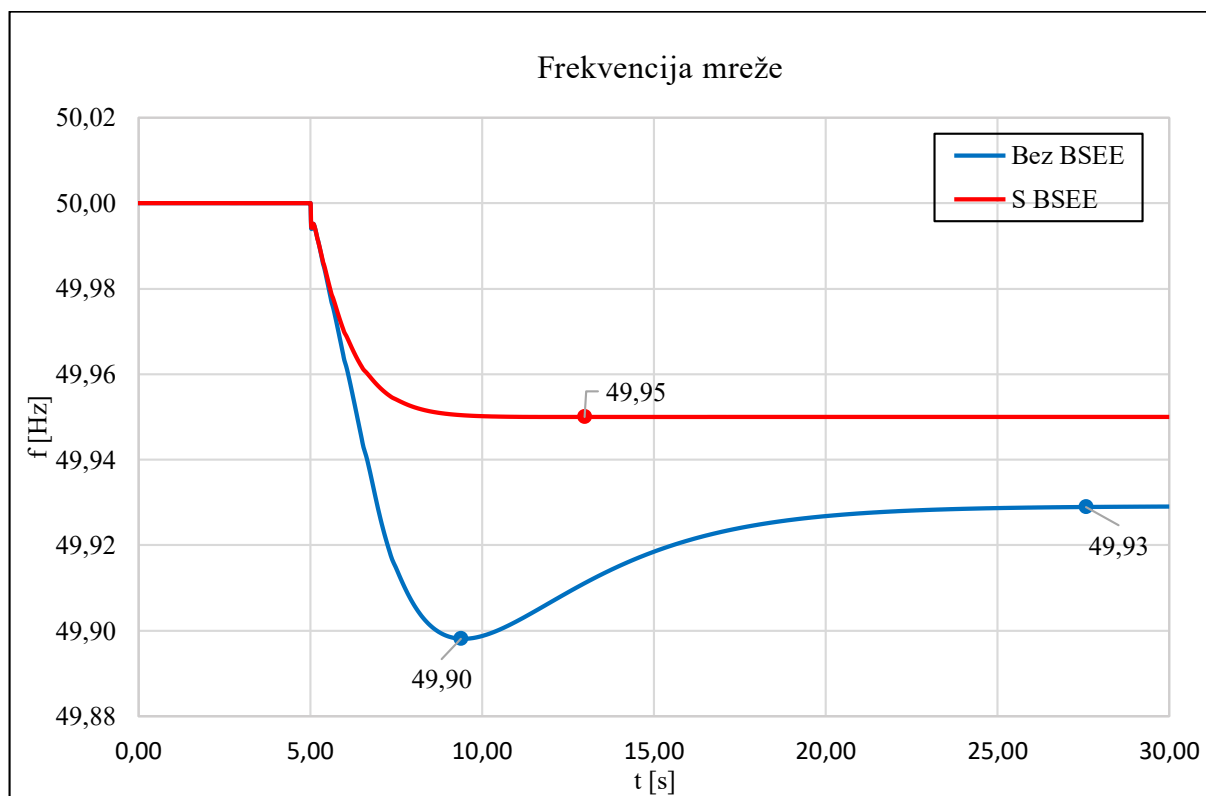
Generator u ulozi proizvodne jedinice reagira na promijenjenu potražnju energije u mreži, te u trenutku kada dolazi do rasta aktivne snage potrošača on sudjeluje u primarnoj regulaciji frekvencije i generira potrebnu snagu da bi omjer proizvodnje i potrošnje ostao jednak (plava boja). Kod snage turbine (zeleno) može se vidjeti da nakon poremećaja zbog inercije sustava postoji kratka vremenska odgoda povećanja snage turbine.



Slika 6.4. Povećanje snage proizvodne jedinice uslijed poremećaja u EES-u

### 6.1.2. Simulacija inercije sustava s BSEE

BSEE se spaja u mrežu s ciljem da poveća inerciju sustava pomoću koncepta virtualne inercije. Koncept je zamišljen da se u realnom vremenu daje informacija o naponu i struji u algoritam virtualne inercije) koji daje inverteru, koji je spojen na sabirnicu s OIE i s BSEE, ulazne signale gdje se naposljetku određuje da li je u mrežu potrebno injektirati energiju ili apsorbirati višak energije. Na slici 6.5. se nalazi usporedba frekvencije mreže prije i nakon priključenja BSEE.



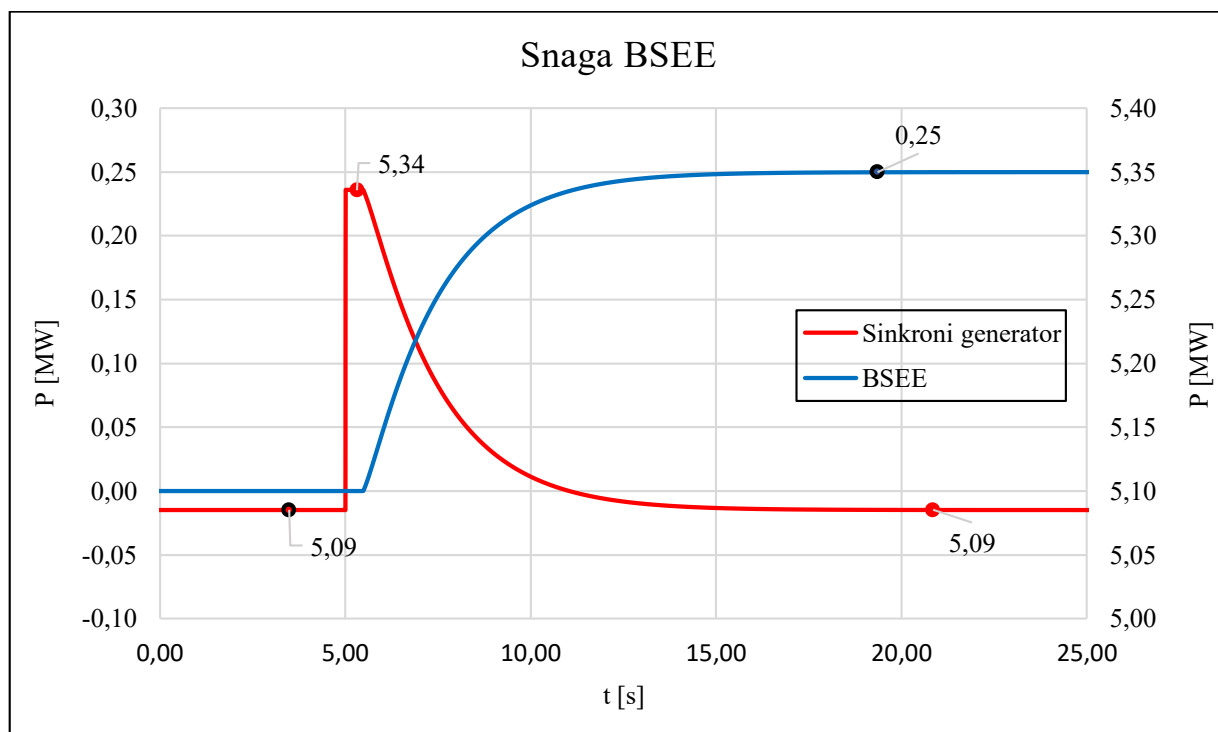
Slika 6.5. Frekvencija mreže prije i nakon priključenja BSEE

Prilikom usporedbe frekvencije mreže može se zamijetiti da u slučaju kada BSEE nije spojen (plava linija), inercija cijelog sustava je manja te zbog toga frekvencija pada na 49.90 Hz i nakon primarne regulacije postiže stacionarno stanje na 49.93 Hz. Takva oscilacija frekvencije može uzrokovati veliku nestabilnost u mreži što se dugoročno ne može održati.

Nakon priključenja BSEE u mrežu, frekvencija dobiva potporu virtualne inercije gdje se primjećuje da nakon poremećaja frekvencija pada pod manjim nagibom. Odnosno, brzina promjene frekvencije (ROCOF) je manja i posljedično tome NADIR frekvencije se povećao na iznos od 49.95 Hz. Priključenjem BSEE uspješno se postigao očekivani rezultat, sustav je dobio potporu virtualne inercije i NADIR frekvencije je s 49.90 Hz povećao se na 49.95 Hz.



Kao i u prvom slučaju simulacije poremećaj je definiran s povećanjem aktivne snage potrošača za 5% što je već prikazano na slici 6.3., ali u ovom slučaju je još dodatno priključen BSEE na mrežu. Iz priložene slike 6.6. može se vidjeti da sinkroni generator (crvena boja) u trenutku poremećaja  $t=5s$  trenutno reagira na promjenu potrošnje u mreži što zapravo predstavlja reakciju proizvodne jedinice na povećanje potrošnje. S obzirom da je povećanje aktivne snage potrošača za 0.25 MW, tako i vrijednost snage sinkronog generatora se uvećava iz vrijednosti 5.09 MW, na vrijednost 5.34 MW što se može vidjeti na slici 6.6.



Slika 6.6. Injektirana snaga BSEE u mrežu

S kratkom vremenskom odgodom od nekoliko sekundi, snaga SG počinje padati obrnuto proporcionalno rastu snage koju BSEE (plava boja) injektira u EES. Vremenska odgoda kod pada snage SG je povezana s potrebnim vremenom prorade BSEE, gdje se može vidjeti da BSEE počinje injektirati snagu u mrežu tek nakon nekoliko sekundi. Može se zaključiti da je BSEE u stacionarnom stanju injektirao 0.25 MW, odnosno onu razliku snage koja se povećala tijekom poremećaja u EES-u. S time je postignuta bolja stabilnost sustava, te je proizvodnja energije SG-a ostala ista kao i prije poremećaja. U simulaciji je namješteno da BSEE reagira na poremećaje u mreži, i da nadomjesti potrebnu snagu. Mijenjanjem određenih parametara baterije kao što je vrijeme pražnjenja baterije, može se utjecati na odziv inercije sustava. Kada bi se brzina injektiranja snage u mrežu iz baterije povećala, povećala bi se i inercija sustava.

## 7. ZAKLJUČAK

Pojava sve većeg broja OIE unutar EES-a karakterizira sustav i njegovu proizvodnju energije čišćom i ekološki podobnijom. Uz prednosti čišće energije i iskorištavanje prirodnih resursa dolaze i novi problemi s kojima se treba suočiti kao što je gubitak prirodne inercije elektroenergetskog sustava. Kako su proizvodne jedinice OIE spojene većinom preko invertera na mrežu, tako ne pridonose inerciji sustava. Inercija generatora je važna za frekvencijsku stabilnost EES-a. S manjkom inercije, sustav je podložniji većim oscilacijama prilikom poremećaja s čime mu je narušena stabilnost. U radu je opisana virtualna inercija kao potencijalno rješenje tog problema gdje su opisana tehnološka rješenja za stvaranje virtualne inercije.

Pomoću računalnog alata PowerFactory provedene su simulacije utjecaja BSEE na nadomjesni model mreže gdje je poremećaj definiran kao povećanje aktivne snage potrošača za 5%. Analizom utjecaja priključenja BSEE na mrežu može se zaključiti da ima pozitivan utjecaj kod stabilnosti EES-a. Bez BSEE odzivi frekvencije mreže su zabilježile veći pad frekvencije koji je posljedično uzrokovan zbog povećane brzine promjene frekvencije. Prilikom priključenja BSEE došlo je do povećanja ukupne inercije sustava, ROCOF se smanjio, te se najniža točka frekvencije povećala s 49.90 Hz na 49.95 Hz. S time je postignuta manja oscilacija sustava, veća otpornost sustava na poremećaje, a posljedično tome i veća stabilnost EES-a.

U prilogu A nalaze se odzivi simulacije nadomjesnog modela mreže u slučaju smanjenja aktivne snage potrošača za 5%, gdje su postignuti identični rezultati kao i kod povećanja aktivne snage potrošača za 5%. Razlika je u prikazu karakteristika gdje su one okrenute za 180°, te baterijski spremnik ima ulogu apsorpcije snage iz mreže gdje se kao rezultat dobiva povećanje inercije sustava i smanjenje ROCOF-a.

U prilogu B prikazan je utjecaj nazivne snage SG na mrežu za slučaj s povećavanjem snage potrošača, gdje se s njenim povećanjem smanjuje ROCOF, te se povećava inercija sustava.

U prilogu C je prikazan slučaj smanjenja snage SG gdje BSEE injektira snagu u mrežu s ciljem održavanja stabilnosti u EES-u. Injektirana snaga jednaka je smanjenoj snazi na sinkronom generatoru.

## LITERATURA

- [1] Pandžić, H. i dr.: „Obnovljivi izvori energije“, Gimnazija Matija Mesić, Slavonski Brod, 2016.
- [2] International Electrotechnical Commission: "Electrical Energy Storage", IEC, Geneva, Switzerland, 2011
- [3] Bukovac, O.: „Pogonski i radni strojevi“, Bilješke s predavanja, 2022.
- [4] Oberhofer, A.: "Energy Storage Technologies & Their Role in Renewable Integration", Global Energy Network Institute, 2012
- [5] Nadeem, F. i dr.: "Comparative Review of Energy Storage Systems, Their Roles and Impacts on Future Power Systems", IEEE Access, 7, 4555-4585, 2019.
- [6] Munja d.d.: "Olovno kiselinski akumulator", s interneta, <http://www.munja.hr/proizvodi/olovno-kiselinski-akumulator/>, 10.04.2022.
- [7] SKIL: „Glavne razlike u tehnologijama baterija“, s interneta, <https://www.skil.hr/koristenje-alata/glavne-razlike-u-tehnologijama-baterija.html>, 15.7.2022
- [8] Technoluxpro: "Baterije", s interneta, <https://technoluxpro.com/hr/akkumulatory/batarei/ni-mh.html>, 10.04.2022
- [9] E-radionica: "BAŠ MALO O LITIJ-ION BATERIJAMA", s interneta, <https://e-radionica.com/hr/blog/2016/07/13/bas-malo-o-litij-ion-baterijama>, 10.04.2022
- [10] Benoît, R. i dr.: "Energy Storage in Electric Power Grids", Wiley-ISTE, 2015.
- [11] Đurić, I, Marijanić T., Škare J. : „BATERIJSKI SPREMNICI ELEKTRIČNE ENERGIJE U DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI“ s interneta [https://www.ho-cired.hr/images/OPATIJA2018/Referati\\_po\\_studijskim\\_odborima/SO5/SO5-17.pdf](https://www.ho-cired.hr/images/OPATIJA2018/Referati_po_studijskim_odborima/SO5/SO5-17.pdf), 20.8.2022.
- [12] IEC: "Electrical energy storage (EES) systems - Part 5-1: Safety considerations for grid-integrated EES systems - General specification", Multiple. Distributed through American National Standards Institute (ANSI), Geneva, Switzerland, 2017.
- [13] Machowski, J., Bialek, J.W., Bumby, J.R.: "Power System Dynamics: Stability and Control", Wiley, 2008.

- [14] Editorial Staff: "Rotor Angle Stability of Synchronous Generators in Power System", s interneta, <https://instrumentationtools.com/rotor-angle-stability-synchronous-generators-power-system/>, 10.08.2022.wizbu
- [15] Annakkage, U., Mehrizi-Sani, A.: "TRANSIENT STABILITY IN POWER SYSTEMS", Encyclopedia of Life Support Systems, s interneta <http://www.eolss.net/sample-chapters/c05/E6-39-59-03.pdf>, 20.08.2022.
- [16] Vrdoljak, K.: "Primjena kliznog režima upravljanja u sekundarnoj regulaciji frekvencije i djelatne snage razmjene elektroenergetskih sustava", Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2009.
- [17] Plavšić, T., PLANIRANJE POGONA ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA, Bilješke s predavanja, 2022.
- [18] HRVATSKI OPERATOR PRIJENOSNOG SUSTAVA D.O.O.: "MREŽNA PRAVILA PRIJENOSNOG SUSTAVA", Narodne novine, 2017., s interneta [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2017\\_07\\_67\\_1585.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2017_07_67_1585.html), 15.08.2022.
- [19] Fernández-Guillamón, A. i dr.: "A Review of Virtual Inertia Techniques for Renewable Energy-Based Generators", IntechOpen, London, United Kingdom, 2020.
- [20] Fernández-Guillamón, A.: "Power systems with high renewable energy sources: A review of inertia and frequency control strategies over time", ArXiv, 119, 2019.
- [21] Tamrakar U. i dr.: "Virtual Inertia: Current Trend and Future Directions", Applied Sciences, 7(7), 654, MDPI, 2017.
- [22] DIgSILENT PowerFactory application Example: „Battery Energy Storing Systems“, 2010.

## POPIS SLIKA

<i>Slika 2.1. Shema reverzibilne (pumpno akumulacijske) hidroelektrane [3]</i> .....	4
<i>Slika 2.2. Sustav za pohranu energije komprimiranim zrakom [2]</i> .....	5
<i>Slika 2.3. Zamašnjak [2]</i> .....	6
<i>Slika 2.4. Supravodljivi magnetski svitak [4]</i> .....	7
<i>Slika 2.5. Sustav za pohranu el. energije pomoću supravodljivog magnetskog svitka [5]</i> .....	8
<i>Slika 2.6. Slika simetričnog sustava za pohranu energije pomoću superkondenzatora [5]</i> .....	9
<i>Slika 2.7. Primjer olovno kiselinskog akumulatora [6]</i> .....	10
<i>Slika 2.8. Li-ion baterija prizmastog oblika [2]</i> .....	11
<i>Slika 2.9. Primjer krivulje punjenja jedne Li-ion baterije [9]</i> .....	12
<i>Slika 2.10. Princip rada baterije s sustavom za cirkulaciju elektrolita [10]</i> .....	13
<i>Slika 2.11. Generalni opis pristupa sigurnosnim razmatranjima [12]</i> .....	17
<i>Slika 2.12. Otočni pogon (rad) sustava za pohranu električne energije [12]</i> .....	22
<i>Slika 2.13. Općenita procedura kod evaluacije i reduciranja rizika [12]</i> .....	23
<i>Slika 2.14. Mjere za reduciranje rizika i opasnosti [12]</i> .....	24
<i>Slika 3.1. Klasifikacija stabilnosti EES-a [13]</i> .....	25
<i>Slika 3.2. Razine regulacije frekvencije [17]</i> .....	28
<i>Slika 3.3. Prikaz opsega sekundarne regulacije [17]</i> .....	30
<i>Slika 3.4. Angažman agregata u sekundarnoj regulaciji [17]</i> .....	31
<i>Slika 4.1. Evolucija prema EES-u s dominantnom inverterskom tehnologijom [21]</i> .....	36
<i>Slika 4.2. Regulacija frekvencije kod poremećaja u mreži uz virtualnu tromost [21]</i> .....	37
<i>Slika 4.3. Koncept virtualne inercije [21]</i> .....	39
<i>Slika 4.4. Klasifikacija topologija za implementaciju virtualne inercije [21]</i> .....	40
<i>Slika 4.5. Generalna shema principa rada sinkronvertera [21]</i> .....	42
<i>Slika 4.6. Dijagram jednadžbi modeliranja [21]</i> .....	43
<i>Slika 4.7. Generalna shema principa rada topologije ISE Labs-a [21]</i> .....	44

<i>Slika 4.8. Model turbinskog regulatora za računanje ulazne snage [21]</i> .....	45
<i>Slika 4.9. Topologija virtualnog sinkronog generatora (VSG) [21]</i> .....	47
<i>Slika 4.10. Shema regulatora pada frekvencije [21]</i> .....	49
<i>Slika 5.1. Ekvivalentan model jednostavnoj bateriji [22]</i> .....	53
<i>Slika 5.2. Struktura modela baterije unutar BSEE [22]</i> .....	54
<i>Slika 5.3. Okvir u DSL-u za model baterije [22]</i> .....	54
<i>Slika 5.4. Struktura modela BSEE unutar PowerFactory programa [22]</i> .....	56
<i>Slika 5.5. Model regulatora frekvencije [22]</i> .....	56
<i>Slika 5.6. Model regulatora djelatne i jalove snage [22]</i> .....	57
<i>Slika 5.7. Model regulatora punjenja [22]</i> .....	58
<i>Slika 5.8. Kompozitni model baterije [22]</i> .....	59
<i>Slika 5.9. Kompozitni model upravljanja BSEE [22]</i> .....	59
<i>Slika 6.1. Nadomjesni model mreže za simulaciju</i> .....	60
<i>Slika 6.2. Odziv frekvencije mreže uslijed poremećaja</i> .....	62
<i>Slika 6.3. Povećanje aktivne snage potrošača</i> .....	63
<i>Slika 6.4. Povećanje snage proizvodne jedinice uslijed poremećaja u EES-u</i> .....	63
<i>Slika 6.5. Frekvencija mreže prije i nakon priključenja BSEE</i> .....	64
<i>Slika 6.6. Injektirana snaga BSEE u mrežu</i> .....	65

## POPIS TABLICA

<i>Tablica 2.1. Podjela energije s obzirom na obnovljivost izvora [1] .....</i>	<i>2</i>
<i>Tablica 2.2. Podjela sustava za pohranu električne energije [2] .....</i>	<i>3</i>
<i>Tablica 2.3. Prikaz tehnologija spremnika električne energije [11] .....</i>	<i>15</i>
<i>Tablica 2.4. Usluge koje baterijski sustav pohrane može pružiti distribucijskom sustavu [11] ...</i>	<i>16</i>
<i>Tablica 4.1. Sažetak osnovnih topologija za implementaciju virtualne inercije [21].....</i>	<i>51</i>
<i>Tablica 6.1. Osnovni parametri generatora.....</i>	<i>61</i>
<i>Tablica 6.2. Osnovni parametri baterijskog spremnika.....</i>	<i>61</i>
<i>Tablica 6.3. Osnovni parametri voda.....</i>	<i>61</i>
<i>Tablica 6.4. Osnovni parametri transformatora .....</i>	<i>61</i>
<i>Tablica 6.5. Osnovni parametri sabirnica .....</i>	<i>61</i>
<i>Tablica 6.6. Osnovni parametri potrošača .....</i>	<i>61</i>

## SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

Prisutnost obnovljivih izvora energije u elektroenergetskom sustavu je sve veća, te dolazi do modernizacije sustava u kojem sve više dominiraju inverteri. U takvom sustavu javlja se problem deficita inercije koja je neizostavna stavka kod velikih sinkronih strojeva. U slučaju poremećajnih prilika kod takvih sustava dolazi do veće promjene brzine pada frekvencije s čime se narušava stabilnost sustava.

Kao rješenje problema s deficitom inercije u sustavu napravljen je koncept virtualne inercije. Taj koncept predstavlja kombinaciju upravljačkih algoritama, OIE, BSEE i energetske elektronike, te tako nastoji oponašati inerciju konvencionalnog EES-a.

U ovom diplomskom radu pružena su tehnološka rješenja za implementaciju virtualne inercije u EES, te su provedene simulacije gdje se promatra utjecaj BSEE kao pružatelja virtualne inercije.

Uz pomoć računalnog alata PowerFactory provedene su simulacije utjecaja BSEE kao pružatelja virtualne inercije gdje su dobiveni očekivani rezultati. Implementacijom BSEE u EES postignuto je povećanje inercije, smanjenje brzine promjene frekvencije i točke maksimalnog odstupanja frekvencije.

### **Ključne riječi**

- Obnovljivi izvori energije
- Baterijski sustavi za pohranu energije
- Stabilnost mreže
- Jednadžba njihanja
- Virtualna inercija
- PowerFactory 2022



## **ABSTRACT AND KEYWORDS**

The presence of renewable energy sources in the power system is increasing, and it's coming to modernization of the system in which inverters dominate more and more. In that kind of system the problem of inertia deficit arises, which is an indispensable thing for large synchronous machines. In the event of disturbances in such systems, there is a greater ROCOF, which disturbs the stability of the system.

As a solution to the problem of inertia deficit the concept of virtual inertia was created. This concept represents a combination of control algorithms, renewable energy sources, battery storage systems and power electronics, and thus tries to imitate the inertia of conventional power systems.

In this thesis, technological solutions for the implementation of virtual inertia in power system were provided, and simulations were carried out where the influence of battery storage systems (BSS) as a provider of virtual inertia was observed.

With the help of the computer tool PowerFactory, simulations of the influence of BSS as a provider of virtual inertia were carried out, where the expected results were obtained. By implementing BSS in power system, an increase in inertia, a decrease ROCOF and the point of maximum frequency deviation were achieved.

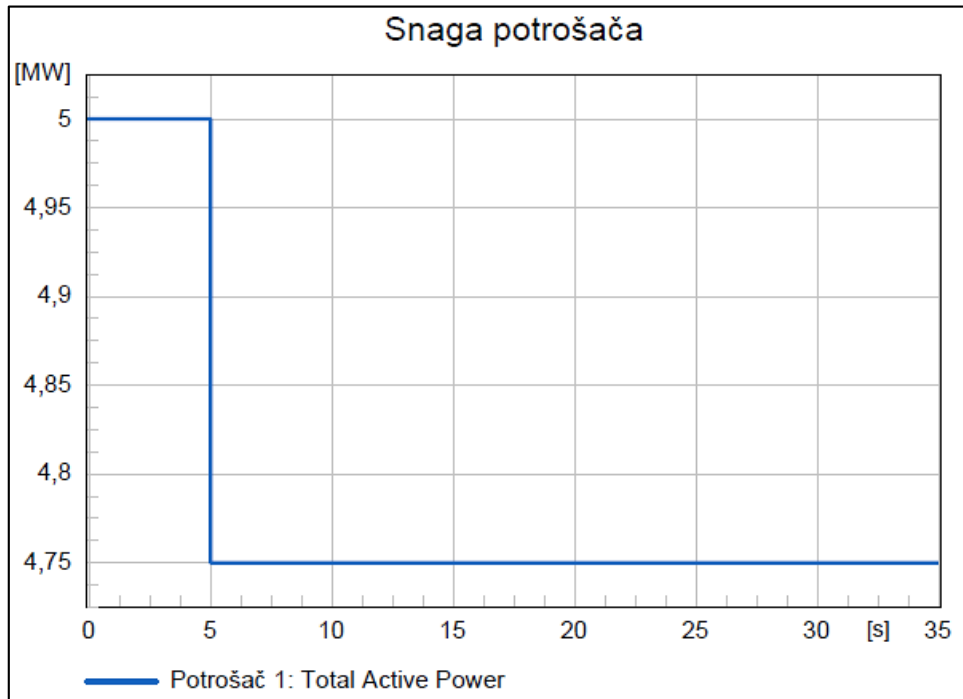
### **Keywords:**

- Renewable energy source
- Battery energy storage systems
- Grid stability
- Swing-equation
- Virtual inertia
- PowerFactory 2022

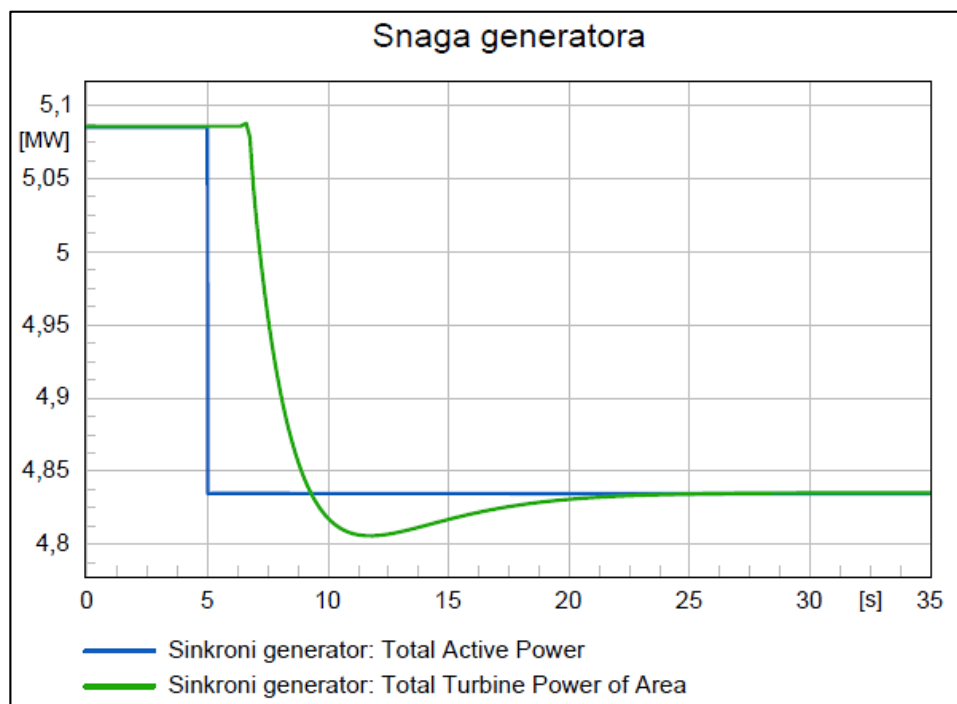
# PRILOG

## PRILOG A

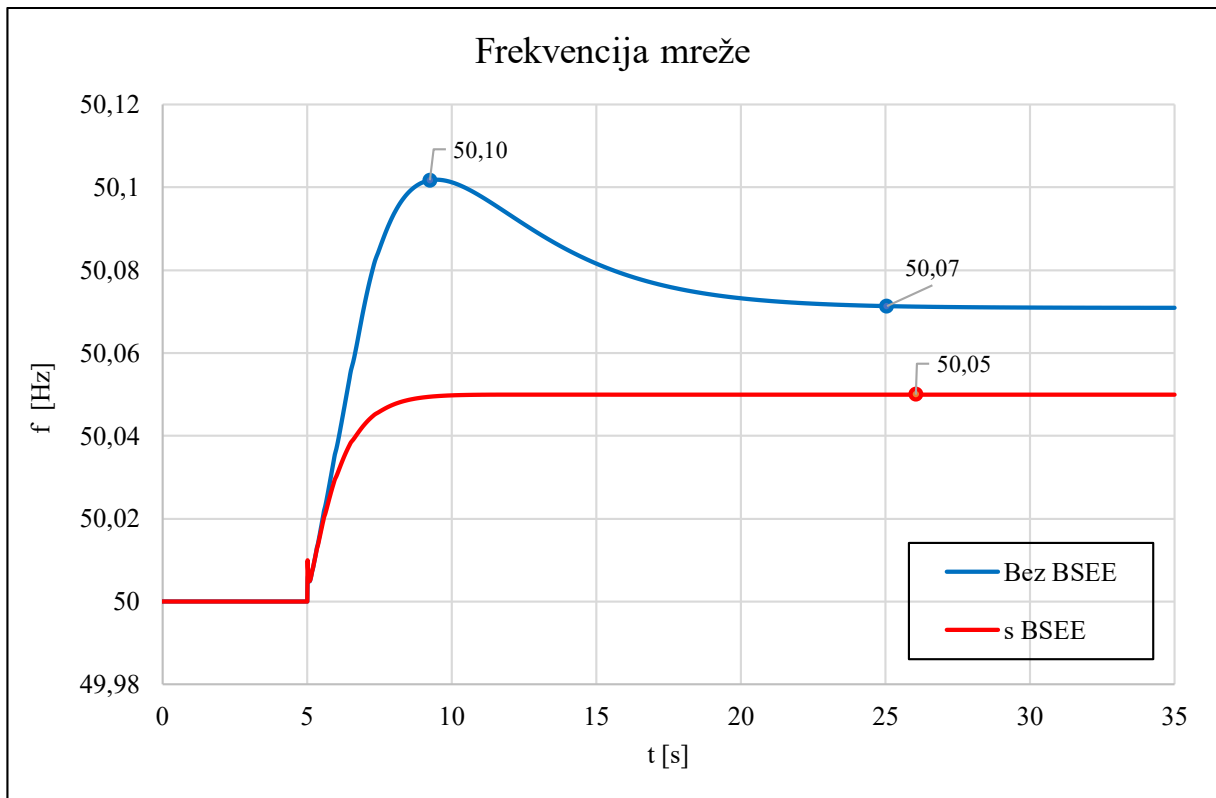
*Simulacije za slučaj smanjenja aktivne snage potrošača za 5%*



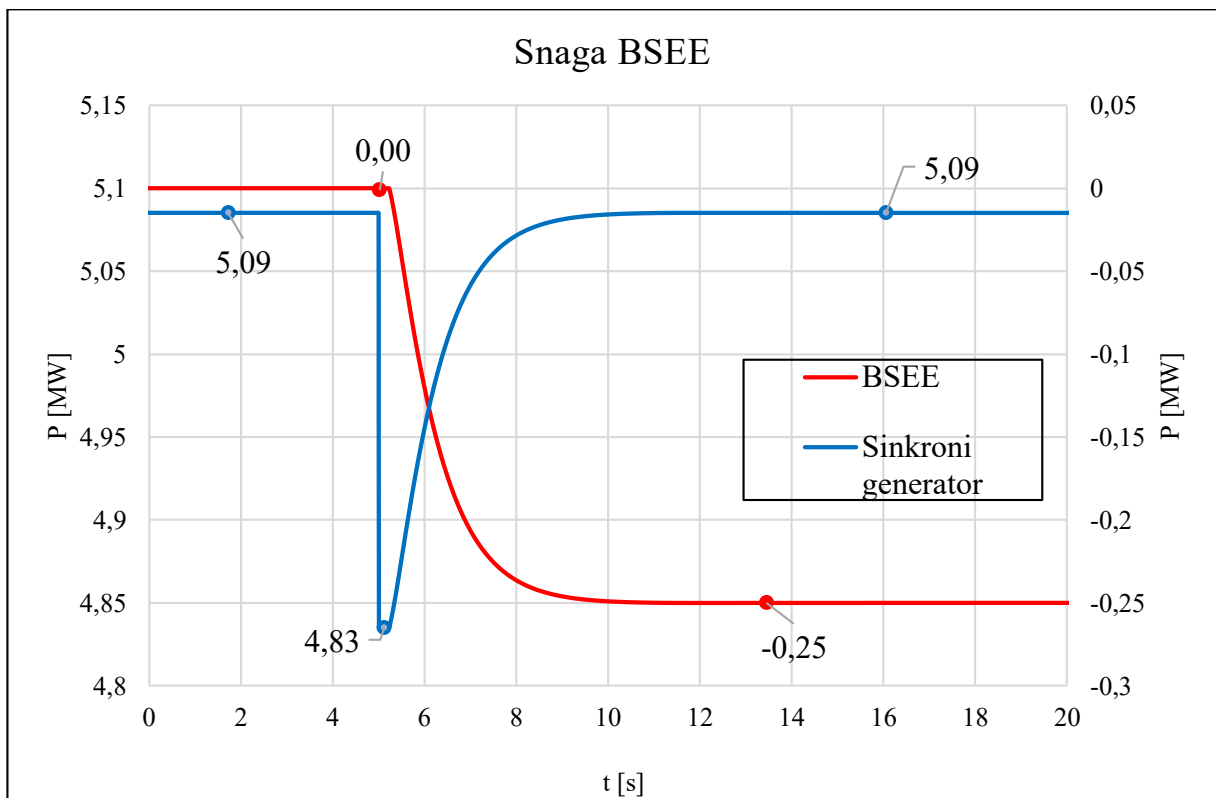
*Smanjenje aktivne snage potrošača za 5%*



*Smanjenje snage proizvodne jedinice uslijed poremećaja u EES-u*



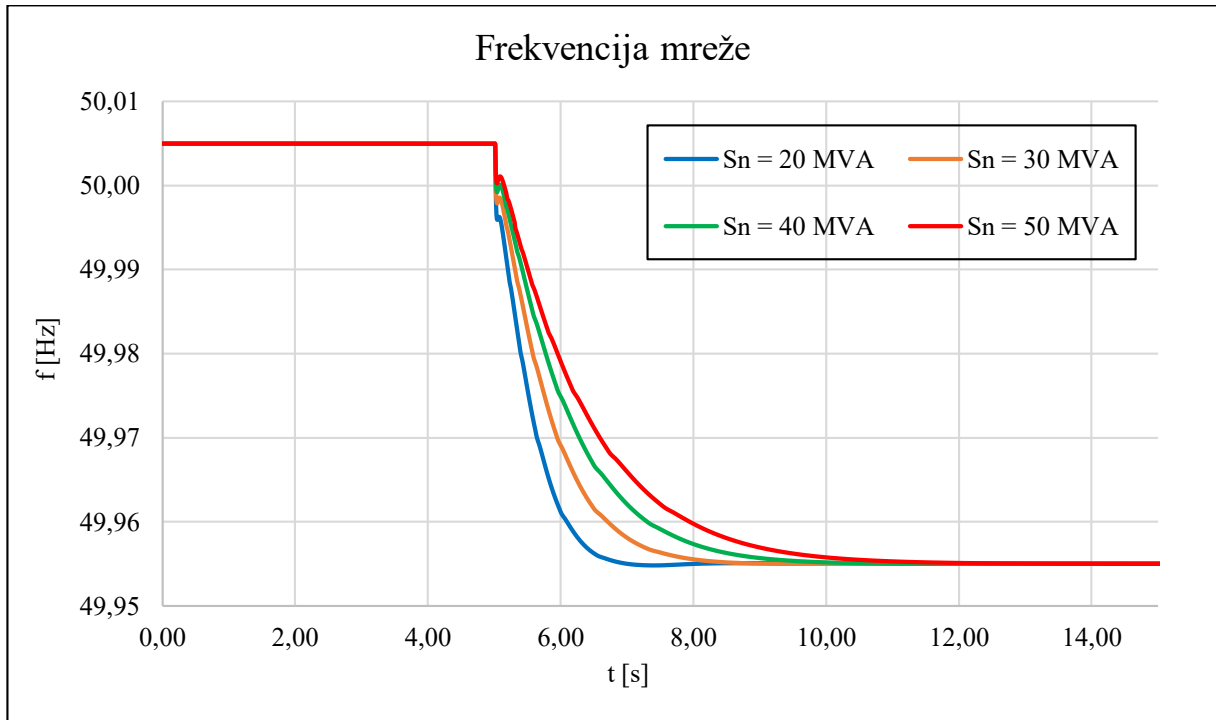
*Frekvencija mreže prije i nakon priključenja BSEE*



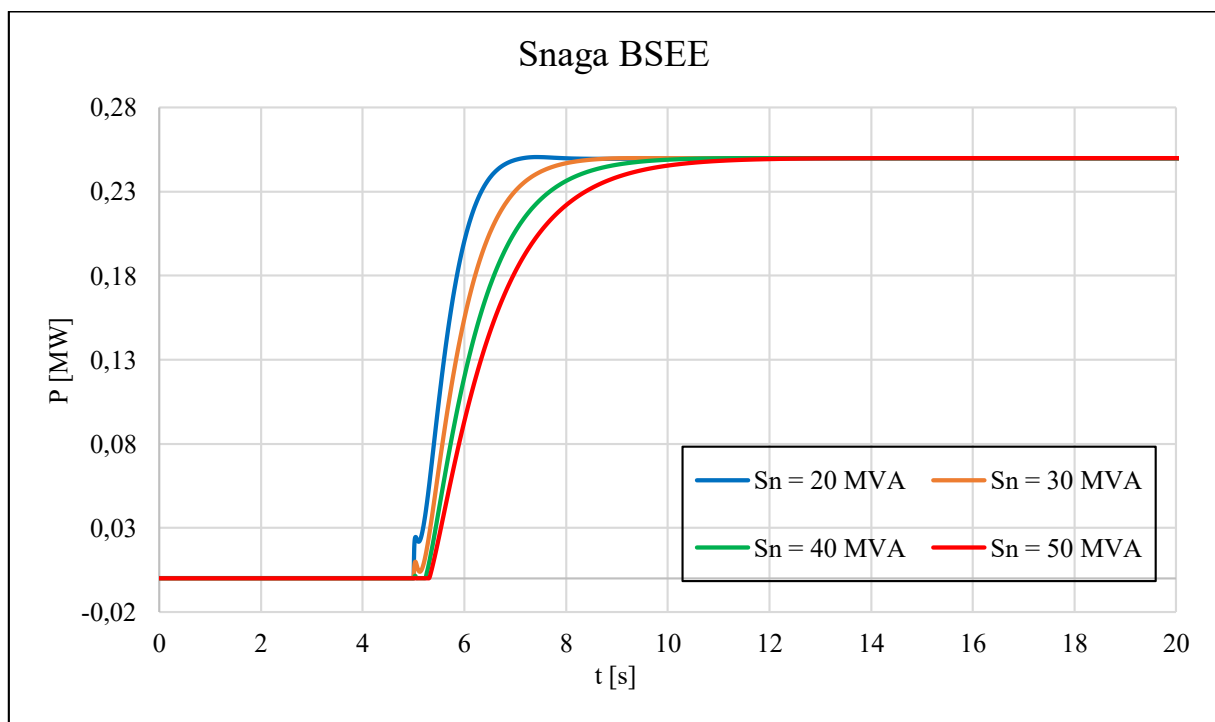
*Apsorpcija snage iz mreže pomoću BSEE*

## PRILOG B

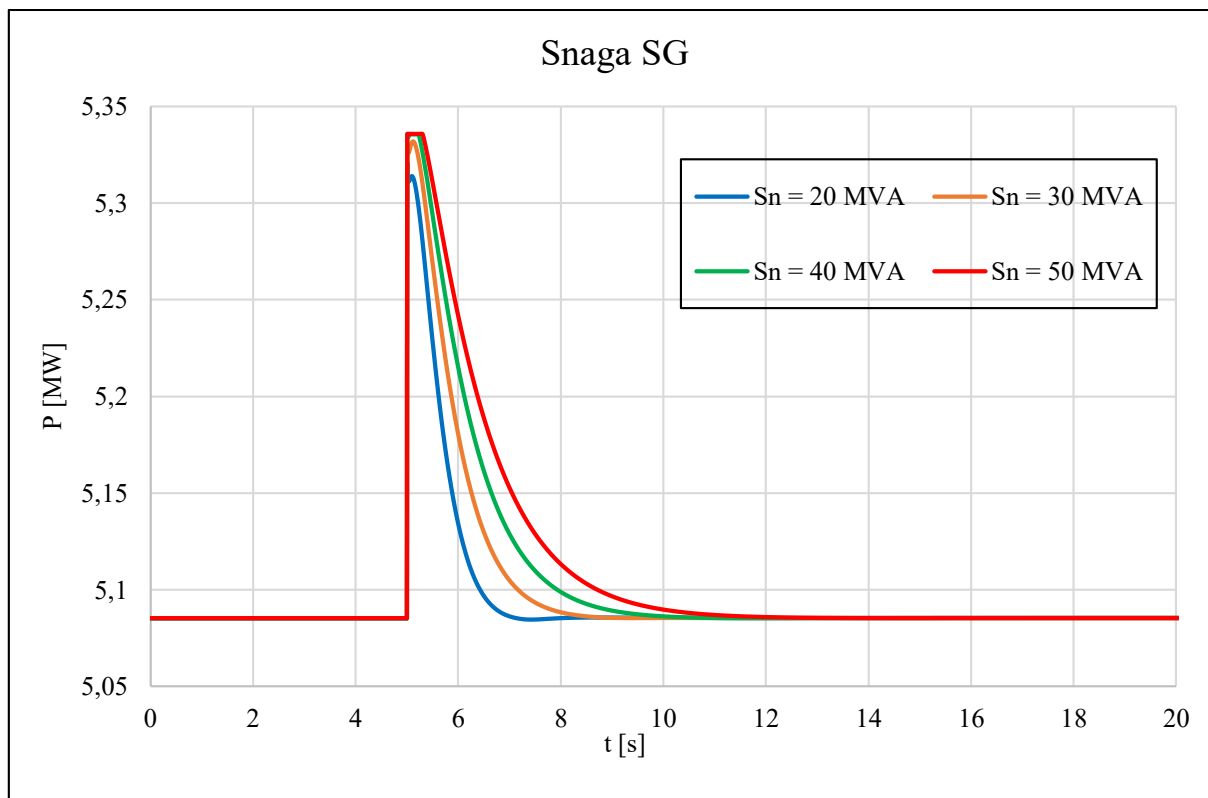
*Utjecaj nazivne snage SG na inerciju EES-a za slučaj s povećanjem snage potrošača za 5%*



*Frekvencija mreže u odnosu na promjenu nazivne snage generatora (s BSEE)*



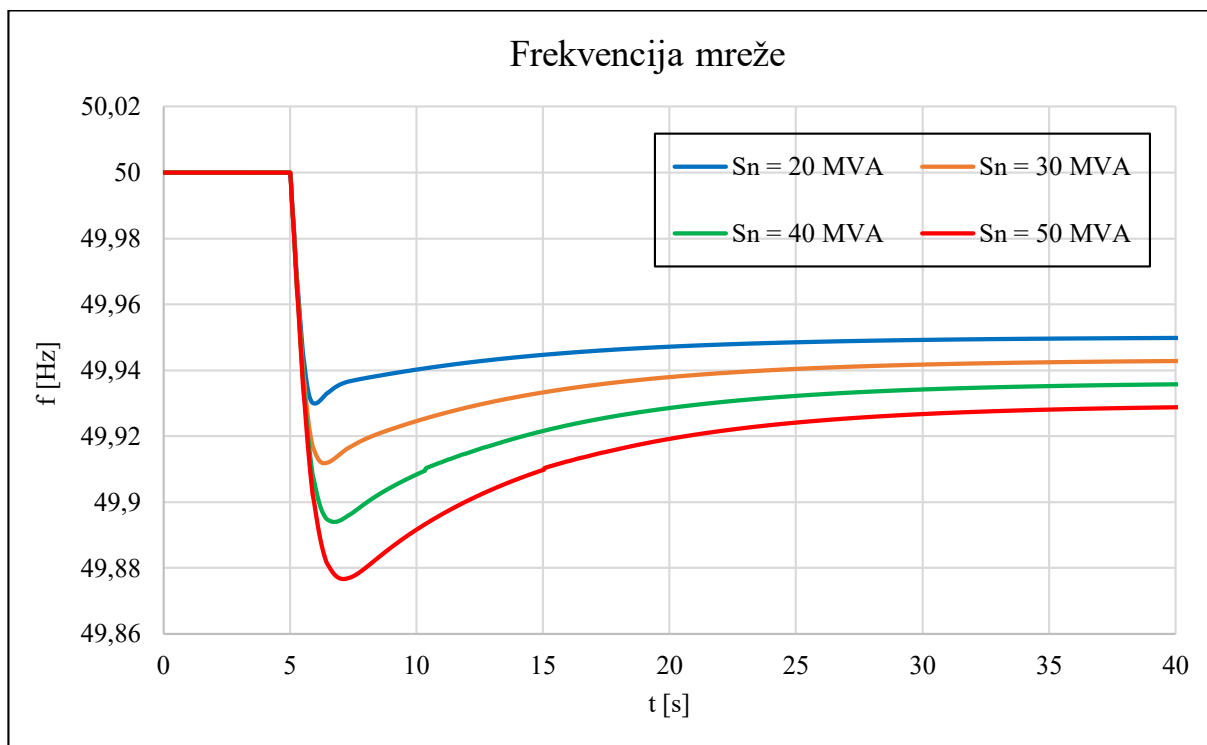
*Snaga BSEE u odnosu na promjenu nazivne snage generatora (s BSEE)*



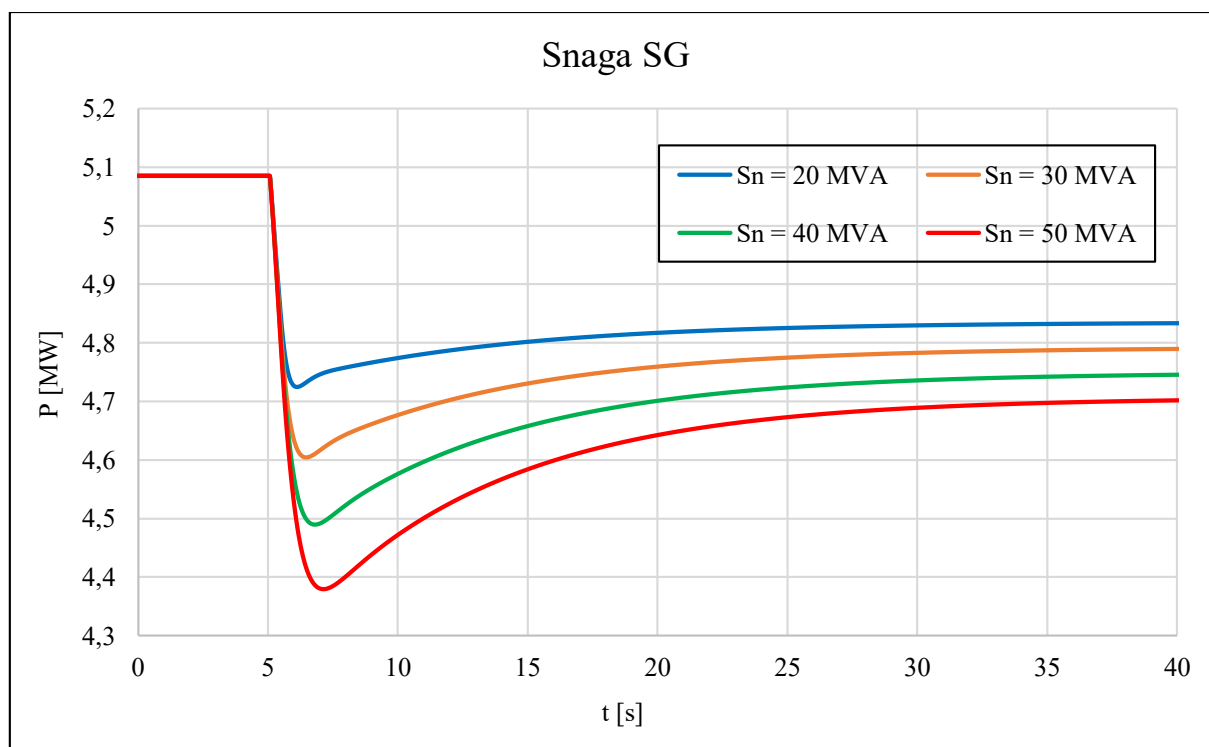
*Snaga SG u odnosu na promjenu nazivne snage generatora (s BSEE)*

## PRILOG C

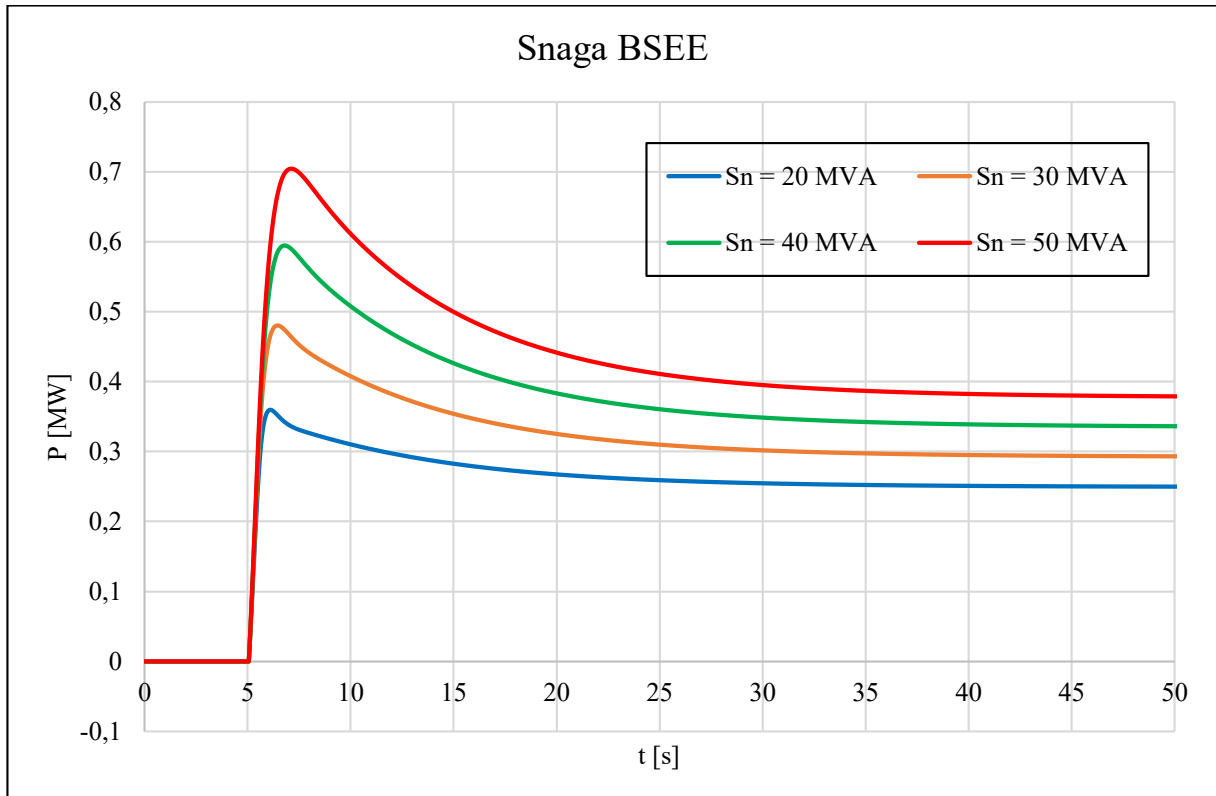
*Simulacije za slučaj smanjenja snage generatora u trenutku  $t = 5s$*



*Frekvencija mreže prilikom smanjenja snage generatora*



*Smanjenje snage SG u trenutku  $t = 5s$*



*Injektirana snaga BSEE u mrežu pri smanjenju snage SG*

# PRILOG D

## Licenca za računalni program PowerFactory 2022

PF About PowerFactory

**PowerFactory 2022**

DlG SILENT PowerFactory 2022 SP2 (x64) [Licensing and Copyright](#)  
Build 22.0.5.0 (22038) / Rev. 91565 [Data Privacy](#)

**PowerFactory Base**

**Individual Modules** **Corporate Modules**

Time-Overcurrent Protection  
Distance Protection  
Transmission Network Tools  
Outage Planning  
Stability Analysis Functions (RMS)  
Small Signal Stability (Eigenvalue Analysis)

CodeMeter 7.40 (Workstation) 100 Nodes

**Licence Status**

Your licence is valid for 176 day(s) up to and including 28.2.2023..  
Order ID: **2022-0428-0030570**  
Softkey ID: **130-220444673** This program is licensed to **THX (user: Edo)**.

**Maintenance Status**

Your maintenance is active. It is valid for 175 day(s) up to and including 27.2.2023..  
With a maintenance contract you enjoy easy access to the latest PowerFactory release and regular service packs at no additional charge, and free access to expert assistance via the DlG SILENT Support Centre. Further benefits and detailed information can be found [here](#).

Copyright by DlG SILENT GmbH (C) 1986-2022.  
Website <https://www.digsilent.de> Support Centre <https://www.digsilent.de/support.html>