

Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica
București, România
Departamentul Sisteme Electroenergetice
Școala Doctorală de Inginerie Energetică



**Rezumat al
TEZĂ DE DOCTORAT**

Reglajul frecvenței în sistemele electroenergetice ale viitorului

Doctorand:
Eng. AL Hasheme JALEEL ISMAIL JABER

Conducător științific:
Prof. Dr. Ing. Lucian Toma

București 2023

Capitolul 1

Provocările integrării RES în sistemele electroenergetice

1.1 Introducere

- **Variabilitate și intermitență:**

Una dintre provocările principale este variabilitatea inerentă și intermitența generării SRE. Energia solară și eoliană, de exemplu, depind de condițiile meteorologice și de ora zilei, ceea ce duce la fluctuații ale producției de energie. Această variabilitate pune dificultăți în menținerea unei surse de alimentare stabile și fiabile.

- **Integrare în rețea:**

Integrarea SRE în infrastructura de rețea existentă necesită îmbunătățiri și modificări semnificative. Rețeaua trebuie să găzduiască fluxuri de putere bidirecționale, să gestioneze fluctuațiile de tensiune și frecvență și să asigure sincronizarea corespunzătoare a RES cu sursele de energie convenționale.

- **Stocare a energiei:**

Soluțiile eficiente de stocare a energiei sunt esențiale pentru a atenua intermitența SRE. Bateriile, hidrocentralele pompate și alte tehnologii de stocare sunt necesare pentru a stoca excesul de energie în perioadele de vârf de generare și pentru a o elibera în perioadele de generare scăzută.

- **Stabilitatea și fiabilitatea rețelei:**

Integrarea RES poate afecta stabilitatea și fiabilitatea rețelei. Fluctuațiile rapide ale producției pot duce la abateri de tensiune și frecvență, care pot cauza întreruperi de curent. Sunt necesare măsuri avansate de control al rețelei și de stabilitate pentru a rezolva aceste probleme.

- **Considerații economice:**

În timp ce SRE oferă economii de costuri pe termen lung, investiția inițială în infrastructura regenerabilă poate fi mare. Aspectele economice ale integrării SRE în sistemul energetic, inclusiv subvențiile, stimulentele și opțiunile de finanțare, trebuie evaluate cu atenție.

- **Cadre de reglementare și politici:**

Dezvoltarea și implementarea unor politici și reglementări eficiente sunt esențiale pentru integrarea cu succes a SRE. Orientări clare pentru accesul la rețea, stimulentele de piață și obiectivele de energie regenerabilă sunt esențiale pentru a promova adoptarea SRE.

- **Impact asupra mediului:**

Beneficiile pentru mediu ale integrării SRE sunt clare, dar impactul asupra mediului al proiectelor de energie regenerabilă, cum ar fi distrugerea habitatului și extracția resurselor, trebuie gestionat cu atenție.

- **Reziliența rețelei:**

Sistemul electroenergetic trebuie să fie rezistent la factori externi, cum ar fi evenimentele meteorologice extreme sau atacurile cibernetice, care pot afecta atât sursele convenționale, cât și sursele regenerabile de energie. Asigurarea rezilienței rețelei este un aspect vital.

1.2 Strategii de control al frecvenței în Europa

Strategiile de control al frecvenței în Europa sunt implementate pentru a menține stabilitatea și fiabilitatea rețelelor electrice interconectate ale continentului, care se întind în numeroase țări și regiuni. Aceste strategii sunt vitale pentru a se asigura că frecvența rețelei rămâne aproape de valoarea sa nominală (de exemplu, 50 Hz în cea mai mare parte a Europei) în ciuda fluctuațiilor în producerea și consumul de energie. Iată câteva aspecte cheie ale strategiilor de control al frecvenței în Europa:

- **Limite de abatere a frecvenței:** codurile de rețea europene specifică limite acceptabile pentru abaterile de frecvență ale rețelei de la frecvența nominală. Operatorii de rețea lucrează în aceste limite pentru a se asigura că frecvența rămâne stabilă.
- **Nivelul primar de reglaj al frecvenței:** Cunoscut și ca control primar automat, această strategie implică ajustarea ieșirii generatorului în funcție de modificările frecvenței rețelei. Generatoarele își măresc sau scad automat puterea pentru a ajuta la restabilirea frecvenței la valoarea sa nominală. Valoarea ajustării este determinată de caracteristica de scădere a vitezei.
- **Nivelul secundar de reglaj al frecvenței:** Acest nivel, cunoscut și ca control secundar automat, oferă suport suplimentar pentru menținerea frecvenței rețelei. Implică resurse care pot răspunde în câteva secunde până la minute la abateri mai semnificative de frecvență.
- **Nivelul terțiar de reglaj al frecvenței:** Acest nivel este activat atunci când abaterile de frecvență persistă dincolo de timpii de răspuns ale comenzilor primare și secundare. Se adresează abaterilor de frecvență pe termen mai lung care pot rezulta din factori precum schimbări neașteptate ale cererii de energie, furnizării sau mixului de producție.

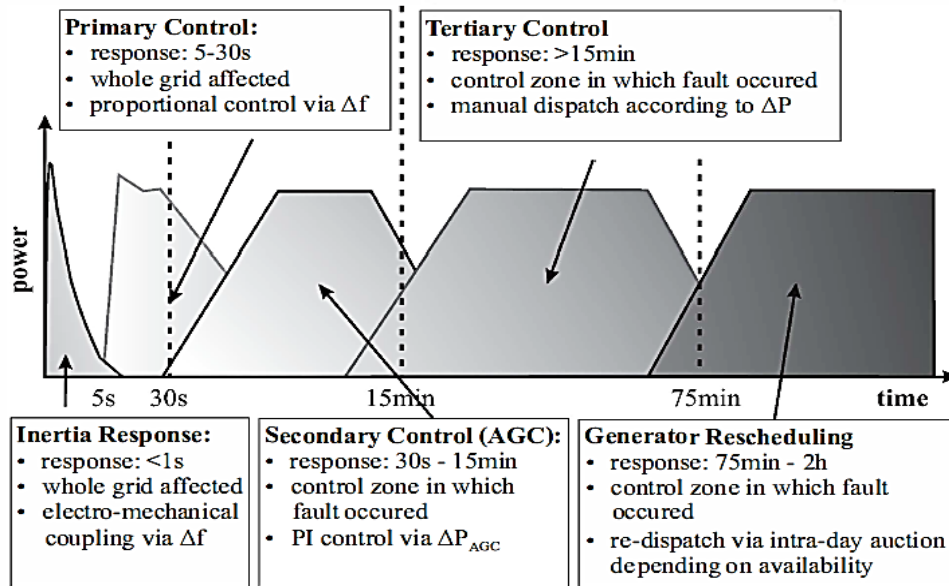


Fig 1. 1 Etape de control al frecvenței și timpului pentru fiecare etapă și desfășurarea rezervelor de putere [17].

Capitolul 2

Aplicații Ale Sistemelor De Stocare A Energiei Bateriei Pentru Echilibrarea Puterii Și Controlul Frecvenței

2.1 Introducere

Frecvența este un parametru critic rețea electrică de curent alternativ, simbolizând echilibrul dintre cerere și sursă de energie. Orice diferență între aceste două aspecte poate duce la abateri de la frecvența standard. Când există un exces de generare de energie, frecvența crește, în timp ce un exces de cerere face ca frecvența să scadă. Pentru a atenua aceste discrepanțe, energia cinetică stocată în masele rotative ale generatoarelor sincrone mari este folosită ca mecanism inițial pentru a echilibra dezechilibrele de putere. Atât sistemele de control al răspunsului în frecvență primar, cât și cele secundare au sarcina de a rectifica aceste dezechilibre, deși eficacitatea lor are limitări. Abaterile excesive ale frecvenței pot duce la încălcări ale constrângerilor legale și operaționale, deconectări ale generatorului și defecțiuni potențial catastrofale ale sistemului. Figura 2.1 oferă o ilustrare a constrângerilor operaționale și legale care guvernează sistemele de energie din Marea Britanie (GB).

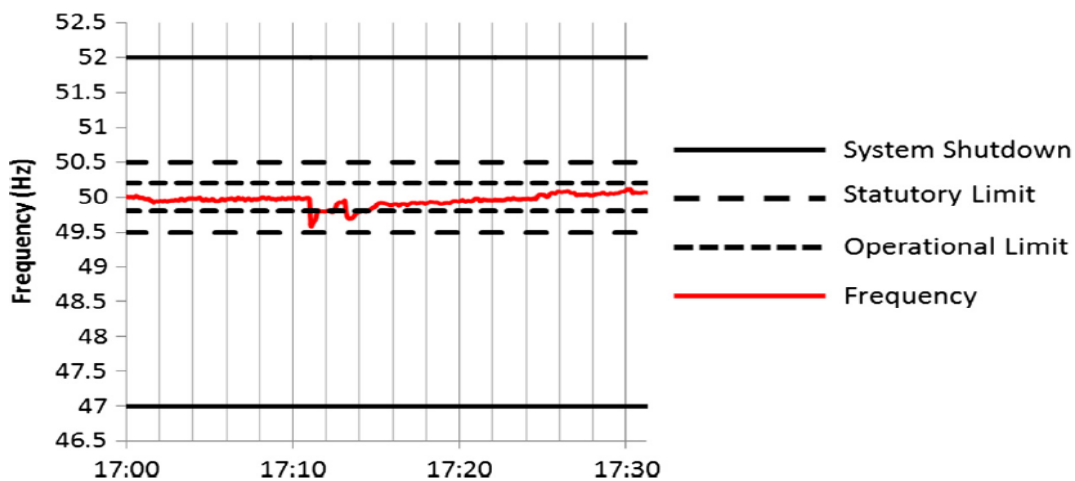


Fig 2. 1 Limitele de frecvență statutare și operaționale sunt importante în raport cu răspunsul real în frecvență al sistemului GB [70].

2.2 Modelul BESS Descriș în detaliu

Un convertor buck/boost, un condensator DC-link, un convertor DC-AC bidirecțional trifazat, un filtru AC și un transformator care conectează sistemul la microrețea sunt printre părțile esențiale ale modelelor BESS utilizate în acest studiu. Această secțiune oferă o descriere detaliată a acestor componente, inclusiv modelele lor și parametrii relevanți. În plus, sunt

discutate strategiile de control folosite pentru fiecare convertor BESS. O ilustrare detaliată a componentelor BESS poate fi găsită în Figura 2.20 [94].

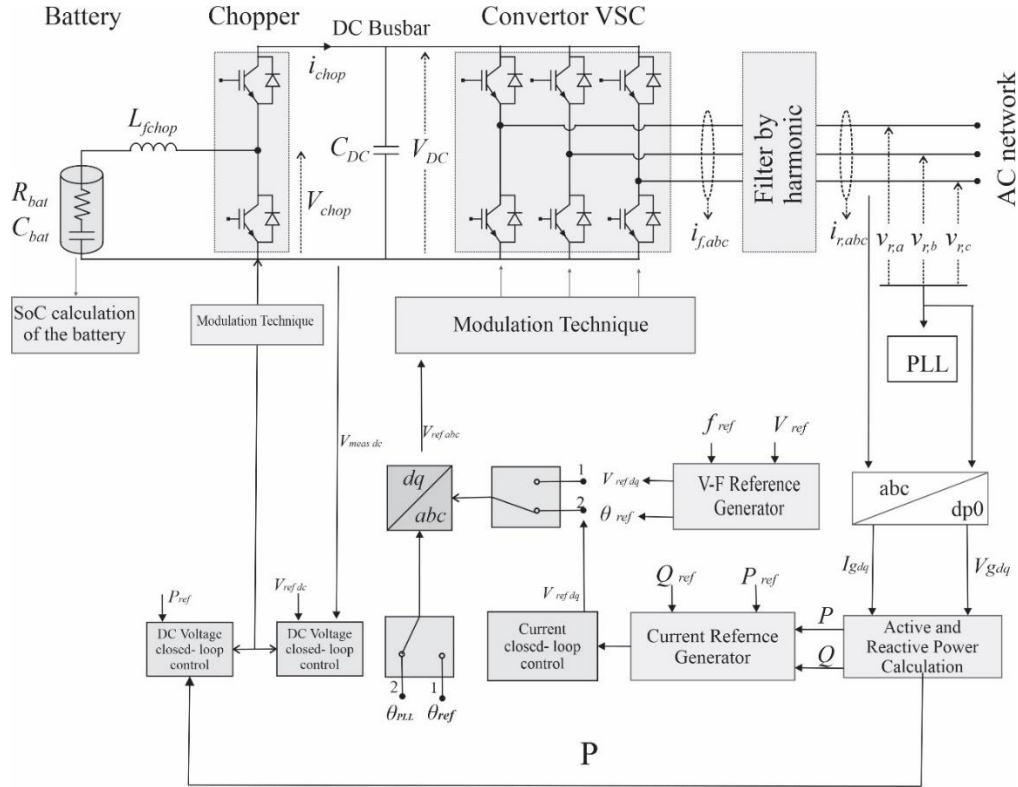


Fig. 2. 2 BESS Descriș în detaliu [94].

Modelul de baterie utilizat în acest studiu se bazează pe un model stabilit anterior. În acest model, bateria este conectată în serie cu o rezistență internă R_B și este reprezentată ca o sursă DC reglată ideală. Utilizează o ecuație neliniară care ia în considerare starea de încărcare a bateriei (SOC) pentru a calcula tensiunea EB fără sarcină a bateriei [95].

$$E_B = E_0 - K \frac{1}{SOC} + A^{-BQ(1-soc)} \quad (2.22)$$

Modelul bateriei folosit în acest studiu încorporează mai multe variabile, inclusiv Q , reprezentând capacitatea bateriei în amperi-oră (Ah), E_0 , care indică tensiunea constantă a bateriei în volți și K , care semnifică tensiunea de polarizare în volți. Pentru a ține seama de caracteristicile de încărcare și descărcare ale bateriei, sunt introduși și factorii A și B . Acești parametri pot fi ajustați pentru a emula comportamentul de descărcare al anumitor tipuri de baterii.

Pentru a regla tensiunea condensatorului DC și a gestiona încărcarea și descărcarea bateriei, convertorul buck/boost joacă un rol crucial. Figura 2.21 ilustrează utilizarea unui controler proporțional-integral (PI) în cascadă pentru a governa ciclul de lucru al comutatoarelor. Această strategie de control se bazează pe diferența dintre tensiunea circuitului continuu și punctul său de referință. În special, eficiența controlerului buck/boost în menținerea tensiunii pe legătura DC este îmbunătățită semnificativ prin introducerea unui al doilea controler PI care răspunde în primul rând la modificările puterii active a sistemului.

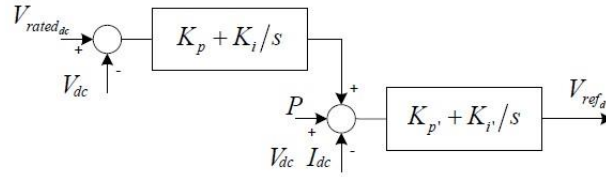


Fig 2. 3 Controler de tensiune DC-link Buck/boost [97].

Când tensiunea circuitului de curent continuu scade sub valoarea de referință predefinită, convertorul funcționează în modul boost pentru a descărca bateria. În schimb, atunci când tensiunea circuitului de curent continuu depășește valoarea de referință, aceasta funcționează în modul buck pentru a încărca bateria. Selectarea valorii inductanței, denumită L_{chopf} , este critică pentru a minimiza ondulația curentului, așa cum este demonstrat în model [96] :

$$\Delta I = \frac{E_B}{L_{chopf}} \Delta t = \frac{E_B}{L_{chopf}} \frac{1}{2f_s} \quad (2.22)$$

Unde f_s este frecvența de comutație

Figura 2.21 ilustrează conectarea bateriei și a convertorului buck/boost la rețea prin convertorul DC-AC și filtrul AC. Tehnica de modulare în lățime a impulsurilor (PWM) a convertizorului se bazează pe semnalele de referință sinusoidale furnizate de sistemul de control al convertorului, determinând magnitudinea tensiunii și punctele de referință ale fazei.

Când comutatoarele sunt în starea 1, valorile de referință ale mărimii tensiunii și ale fazei sunt stabilite pe baza tensiunii și frecvenței de referință. În această configurație, BESS efectuează controlul formării rețelei, cunoscut și sub numele de controler principal de tensiune și frecvență. În schimb, când comutatoarele sunt în starea 2, bateria funcționează în modul continuu PQ, injectând sau absorbind putere activă și reactivă constantă. Acest mod este denumit modul de alimentare al rețelei și utilizează puteri active și reactive de referință pentru a genera magnitudinea tensiunii și punctele de referință ale fazei.

Aceste metode de control servesc ca fundație pentru modurile de control de susținere a rețelei și de urmărire a rețelei, deoarece sunt înrădăcinate în conceptele fundamentale ale modurilor de formare a rețelei și de alimentare a rețelei. Pentru a implementa aceste moduri de control se fac ajustări ale tensiunii de referință, frecvenței, puterii active și puterii reactive. Este esențial să subliniem că aceste controale se bazează pe transformările axelor dq ale lui Park. Punctele de referință ale axelor dq de tensiune sunt utilizate direct pentru a genera semnalele de referință abc atunci când se formează grila [97].

Unghiul de referință este calculat prin integrarea frecvenței unghiulare de referință. Pentru a menține tensiunea punctului de cuplare comună (PCC) la valoarea sa nominală, este folosit și un controler PI.

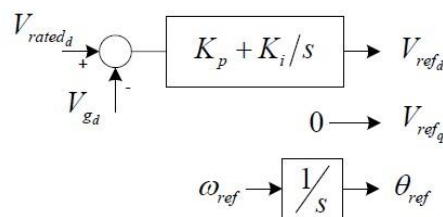


Fig 2. 4 Generator de referință de fază și tensiune care formează rețeaua [97].

Puterea activă și reactivă injectată sunt inițial calculate în modul de control al alimentării în rețea, după cum urmează:

$$p = \frac{3}{2}(V_{gd}I_{gd} - V_{gq}I_{gq}) \quad (2.23)$$

$$q = \frac{3}{2}(V_{gd}I_{gq} - V_{gq}I_{gd}) \quad (2.24)$$

Determinarea componentelor active (P) și reactive (Q) corespunzătoare se realizează prin următorii pași: Puterile active și reactive instantanee (p și q) sunt obținute și ulterior filtrate cu ajutorul filtrelor trece-jos. Puterea activă filtrată este apoi utilizată ca intrare pentru calculul de referință curent, care, la rândul său, produce referința pentru puterea reactivă. Pentru a obține cele mai recente valori de referință pentru axele dq, este utilizat blocul generator.

$$I_{refd} = \frac{3}{2} \frac{P_{ref} V_{gd} + Q_{ref} V_{gq}}{V_{gd}^2 + V_{gq}^2} \quad (2.25)$$

$$I_{refq} = \frac{3}{2} \frac{P_{ref} V_{gq} + Q_{ref} V_{gd}}{V_{gd}^2 + V_{gq}^2} \quad (2.26)$$

Pentru a deriva referințele finale ale axelor dq de tensiune, aceste referințe de curent sunt trecute ulterior prin controlul în buclă închisă de curent. Este esențial să se încorporeze termeni de feed-forward pentru a decupla efectiv cele două axe și a lua în considerare diferența de tensiune înainte și după filtrul AC. Când nu se ține cont de R_d , o diagramă uniliniară simplificată, așa cum este prezentată în Fig. 2.28, poate fi folosită pentru a deduce această relație, conducând la următoarele ecuații:

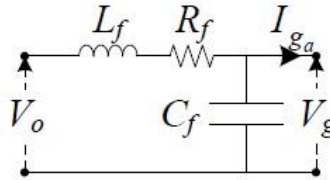


Fig 2. 5 Diagrama cu o singură linie a filtrului de curent alternativ [97].

$$V_{od} = V_{gd}(1 - \omega^2 L_f C_f) + I_{gd} R_f - I_{gq} \omega L_f - V_{gq} \omega R_f C_f \quad (2.27)$$

$$V_{oq} = V_{gq}(1 - \omega^2 L_f C_f) + I_{gq} R_f - I_{gd} \omega L_f - V_{gd} \omega R_f C_f \quad (2.28)$$

Aceste ecuații conduc la blocul de control al curentului final în buclă închisă, văzut în Figura 2.24. Referințele de tensiune V_{refd} și V_{refq} , care sunt ieșirea controlerului de curent, sunt traduse înapoi în cadrul de referință abc pentru a furniza semnalele de control sinusoidal pentru schema PWM a convertorului. [97] oferă mai multe detalii despre alte setări ale convertorului, inclusiv suportul grilei și urmărirea grilei.

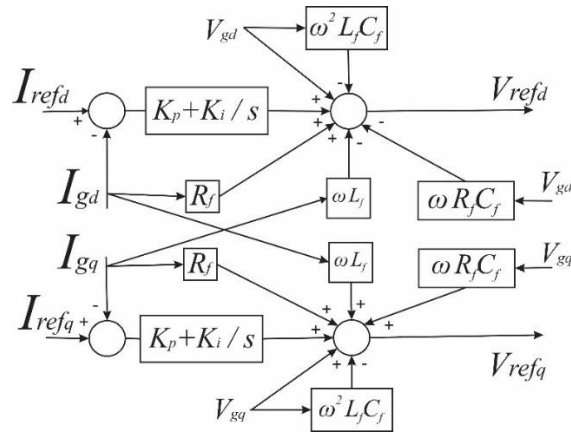


Fig 2. 6 Control curent în buclă închisă [97].

Pentru a deriva referințele finale ale axelor dq de tensiune, aceste referințe de curent sunt trecute ulterior prin controlul în buclă închisă de curent. Este esențial să se încorporeze termeni de feed-forward pentru a decupla efectiv cele două axe și a lua în considerare diferența de tensiune înainte și după filtrul AC. Când nu se ține cont de R_d , o diagramă simplificată cu o singură linie, așa cum este prezentat în figura. 2.23, poate fi folosit pentru a deduce această relație, conducând la următoarele ecuații [98]:

$$\Delta I_{\max} = \frac{V_{dc} / 3}{L_f 4f_s} \quad (2.29)$$

Puterea reactivă injectată a condensatorului de filtru ca C_f ar trebui să rămână sub 5% din puterea nominală a convertorului. În plus, este de remarcat faptul că aproximativ 0,2% din puterea nominală este consumată de o rezistență de amortizare în serie, atenuând efectiv vibrațiile armonice. [98].

$$R_d = \frac{V_I^2}{0.002P_I} - \sqrt{\left(\frac{V_I^2}{0.002P_I}\right)^2 - \frac{1}{(\omega C_f)^2}} \quad (2.30)$$

Pentru a reflecta pierderile de rezistență parazită ale filtrului, se adaugă și o rezistență R_f în serie cu inductanța.

Capitolul 3

Controlul frecvenței utilizând sistemul de stocare a energiei bateriei

3.1 Modelarea și simulare în Simulink a unui sistem BESS

Sistemele de stocare a energiei pe baterii (BESS) au devenit din ce în ce mai populare deoarece oferă soluții energetice fiabile și ecologice. O înțelegere cuprinzătoare a modului în care BESS funcționează și interacționează cu rețeaua electrică este esențială pentru a asigura performanța și eficiența optimă a acestora. Tehnicile de modelare și simulare sunt instrumente puternice pentru analiza și optimizarea performanței BESS.

Inginerii și cercetătorii folosesc modele matematice pentru a simula modul în care BESS se comportă în diferite condiții de operare și pentru a testa diferite strategii și algoritmi de control. Simulink, un instrument de simulare și modelare oferit de MathWorks, este folosit în mod obișnuit în acest scop. Simulink permite utilizatorilor să creeze diagrame bloc care reprezintă diferitele componente ale unui BESS, inclusiv baterii, invertoare și sisteme de control. Aceste diagrame bloc facilitează simularea modului în care sistemul răspunde la diferite intrări și scenarii de operare, conducând în cele din urmă la optimizarea performanței.

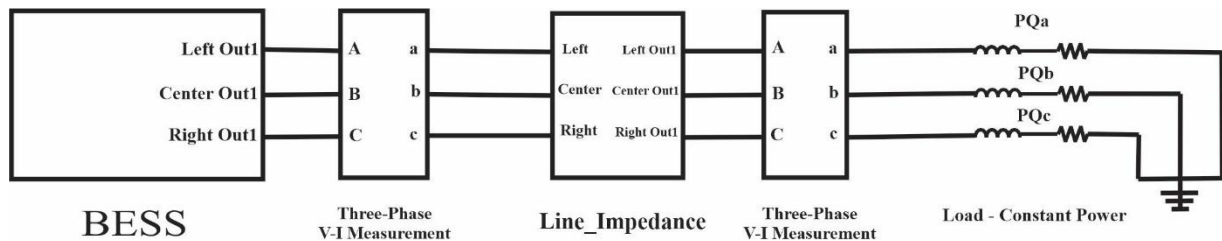


Fig 3. 1 Schema de modelare a circuitului bateriei cu lucrul netei și sarcina [155].

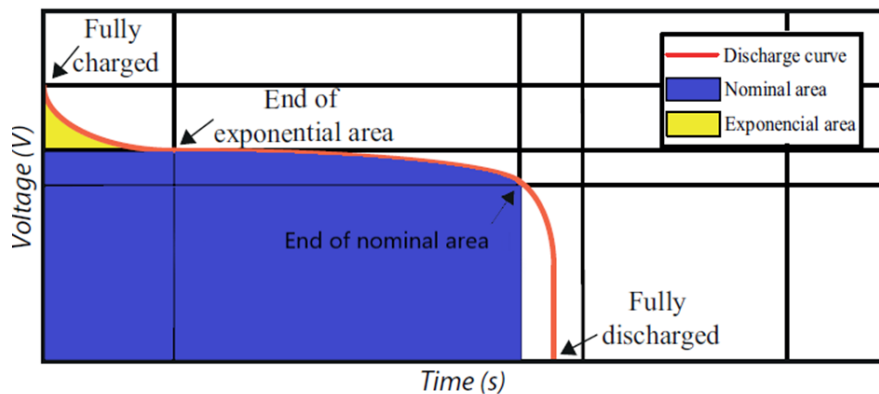


Fig 3. 2 Curba de descărcare tipică pentru o baterie [155].

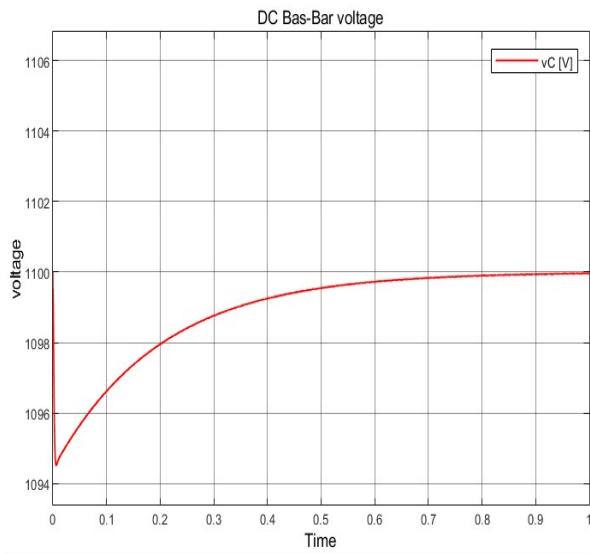


Fig 3. 3 Rezultatul domeniului bateriei [155].

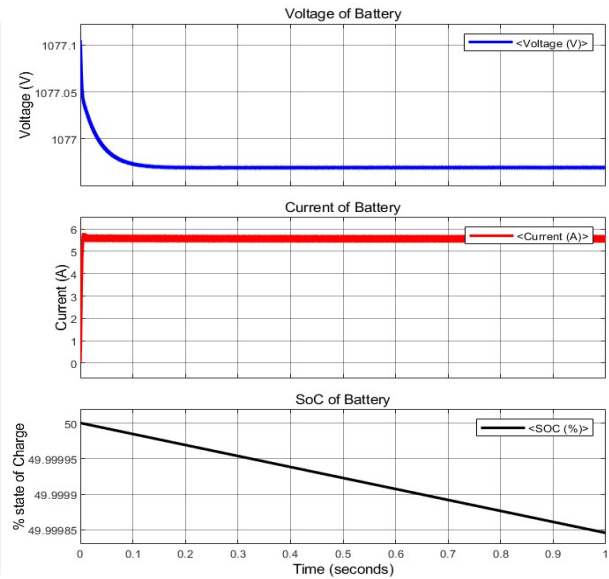


Fig 3. 4 Tensiune DC bară [155].

3.2 Integrarea in AGC a unui sistem BESS

Cazul de testare WSCC 9-bus este o reprezentare simplificată a sistemului de energie al Consiliului de Coordonare a Sistemului de Vest (WSCC), condensat într-un sistem echivalent cu nouă noduri și trei generatoare. Nivelurile de tensiune de bază în acest caz sunt 13,8 kV, 16,5 kV, 18 kV și 230 kV. Puterile complexe ale liniilor de transport sunt în intervalul de sute de MVA fiecare. Acest caz de testare este considerat relativ simplu de controlat deoarece are un număr limitat de dispozitive de control al tensiunii. Simulările acestui sistem au fost efectuate folosind programul software Eurostag. Cazul de testare WSCC 9-bus este un punct de referință util pentru analiza și simularea sistemului electroenergetic. Simplitatea sa le permite cercetătorilor și inginerilor să studieze comportamentele fundamentale ale sistemului electroenergetic și să testeze diferite tehnici de control și optimizare. În ciuda simplității sale, oferă informații valoroase despre controlul tensiunii și al fluxului de putere și analiza stabilității tranzitorii. În simulările Eurostag ale acestui caz de testare, cercetătorii pot investiga modul în care sistemul răspunde la schimbările de generare, cererea de sarcină și condițiile liniei. În plus, poate fi utilizat pentru a evalua eficiența diferitelor strategii de control pentru reglarea tensiunii și gestionarea puterii reactive. În timp ce cazul de testare WSCC 9-bus poate să nu reprezinte complexitatea sistemelor electroenergetice din lumea reală, acesta servește ca punct de plecare pentru înțelegerea principiilor cheie și testarea noilor metodologii. Pe măsură ce industria energetică continuă să evolueze, astfel de cazuri de testare rămân relevante pentru asigurarea fiabilității și eficienței rețelelor electrice moderne.

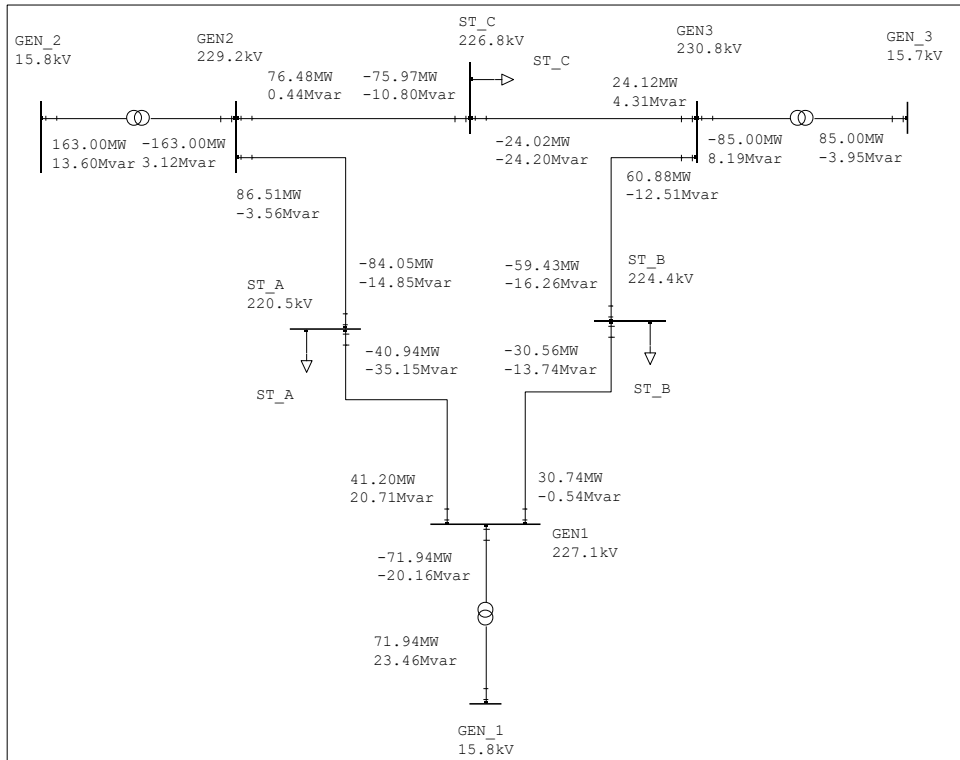


Fig 3. 5 WSCC 9 Sistem de testare autobuz [156].

The screenshot shows the 'LOAD VARIATION AT NODE' dialog box with the following settings:

- Type:** LOAD VARIATION AT NODE
- Class:** EVENT
- Page 1**
- Event time:** 5. s.
- Time margin:** 0. s.
- Load name:** ST A
- Subload:** *
- Modification mode:** variation in %
- Active load variation:** 30. % or MW
- Reactive load variation:** 10. % or Mvar
- Distribution load variation:** 100. % or MVA
- Modification of connected motors:** No
- Variation of the load of type motor:** % or MVA
- Buttons:** Ok, Cancel

Fig 3. 6 O variație de sarcină are loc în magistrala ST-A, la timp de 5 secunde [156].

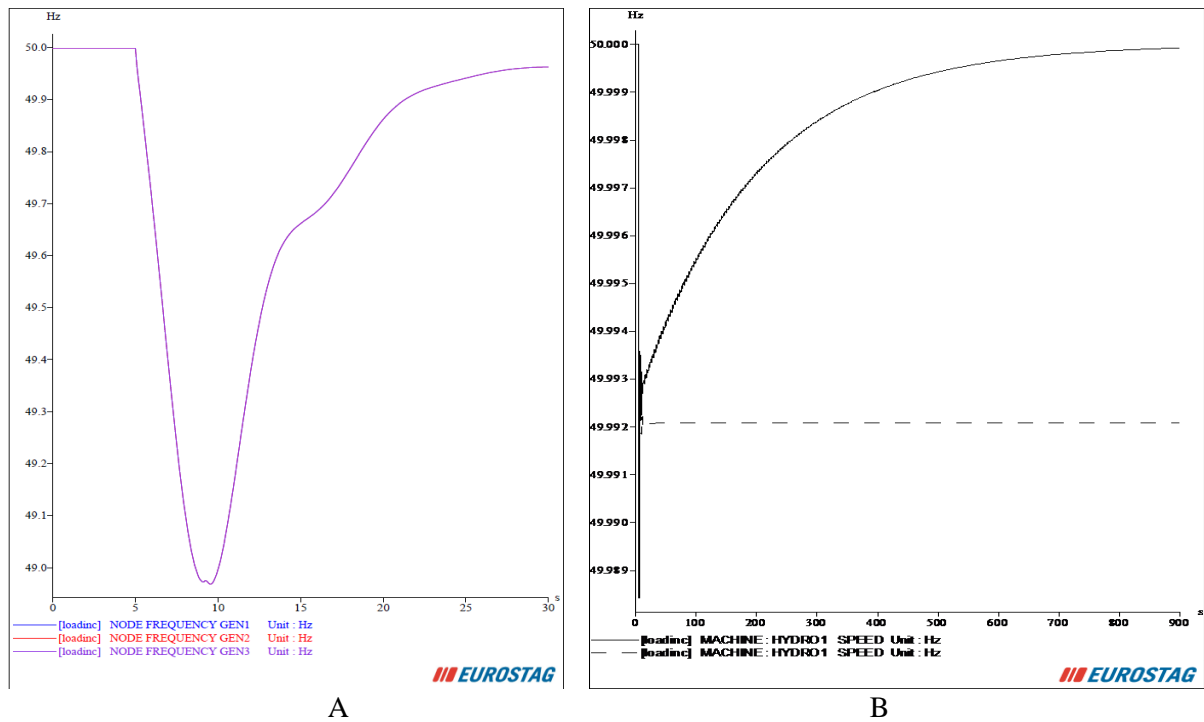


Fig 3. 7 A Frecvența tensiunii: a. fără efectul bateriei [156]; b. în prezența bateriei [156].

Capitolul 4

Aspecte economice ale integrării bateriilor pentru controlul frecvenței

Integrarea bateriilor pentru controlul frecvenței, denumită adesea stocarea energiei în rețea, are implicații economice semnificative în contextul rețelei electrice. Controlul frecvenței este crucial pentru menținerea stabilității rețelei, iar bateriile joacă un rol vital în acest sens prin furnizarea de servicii energetice cu răspuns rapid. Iată câteva aspecte economice cheie ale integrării bateriei pentru controlul frecvenței:

- **Fiabilitatea rețelei și costurile evitate:** bateriile pot răspunde rapid la schimbările bruște ale cererii și ofertei, ajutând la stabilizarea rețelei și la prevenirea întreruperilor de curent. Această fiabilitate poate economisi utilităților și consumatorilor costuri substanțiale asociate cu întreruperile de curent, deteriorarea echipamentelor și pierderile de producție.
- **Venituri din servicii auxiliare:** operatorii de rețea îi compensează pe operatorii de baterii pentru furnizarea de servicii auxiliare, cum ar fi reglementarea frecvenței, care creează un flux suplimentar de venituri pentru proprietarii de baterii. Acest lucru poate ajuta la compensarea investiției inițiale și a costurilor operaționale continue.
- **Peak Load Management:** Bateriile pot stoca excesul de energie în perioadele de cerere scăzută și o pot descărca în timpul vârfului de cerere, reducând nevoia de instalații de vârf scumpe și reducând costurile cu electricitatea.
- **Integrarea energiei regenerabile:** bateriile pot stoca surplusul de energie din surse regenerabile intermitente, cum ar fi vântul și soarele, și o pot elibera atunci când cererea este mare. Acest lucru îmbunătățește integrarea surselor regenerabile în rețea, reducând nevoia de generare de rezervă pe bază de combustibili fosili.
- **Îmbunătățiri de transport și distribuție evitate:** În unele cazuri, stocarea bateriei poate amâna sau elimina nevoia de upgrade costisitoare a infrastructurii rețelei prin furnizarea de suport localizat pentru tensiune și frecvență.
- **Arbitraj energetic:** Operatorii de baterii pot cumpăra energie electrică la preț redus în perioadele de surplus de aprovizionare și o pot vinde înapoi la rețea atunci când prețurile sunt ridicate. Acest arbitraj poate fi o sursă profitabilă de venituri.
- **Participarea la piața de capacitate:** bateriile pot participa pe piețele de capacitate oferind energia lor stocată ca resursă disponibilă pentru expediere în perioadele de cerere mare. Acest lucru poate oferi un flux constant de venituri pentru proprietarii de baterii.
- **Beneficii de mediu:** Deși nu este direct economică, reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră asociată cu integrarea bateriilor pentru controlul frecvenței poate avea valoare economică sub forma unor costuri evitate legate de schimbările climatice.

- Reduceri de costuri: costul tehnologiei bateriei a scăzut, făcând integrarea bateriei mai atractivă din punct de vedere economic în timp. Economii de scară, progresele tehnologice și concurența sporită contribuie la reducerea costurilor.
- Stimulente de reglementare: Guvernele oferă adesea stimulente financiare, credite fiscale sau granturi pentru a promova integrarea tehnologiilor de stocare a energiei, care pot spori și mai mult viabilitatea economică a sistemelor de baterii pentru controlul frecvenței.

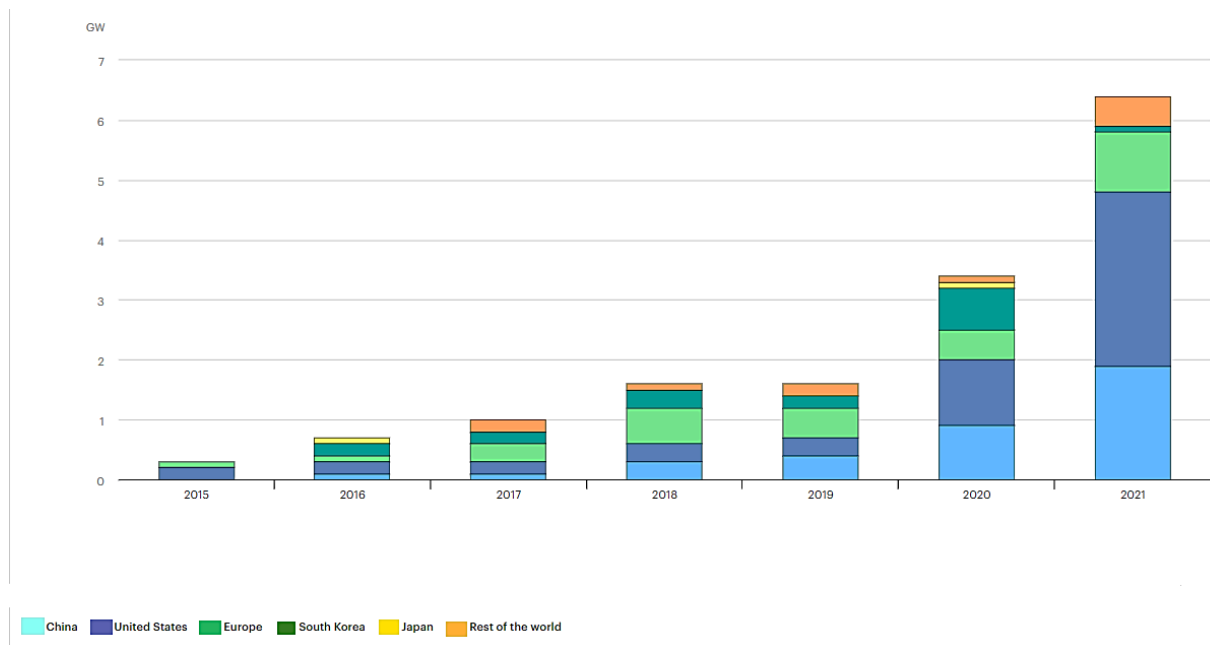


Fig 4. 1 Adăugări anuale de stocare a bateriei la scară de rețea, 2016-2022 [140].

4.1 Aplicații pentru baterii în sistemul energetic (viitor).

Aplicațiile pe care stocarea energiei le poate oferi în interiorul sistemului sunt cele care îi conferă valoare sistemului energetic. Utilizările pe care bateriile le pot asigura sistemului energetic au fost descoperite de mai multe investigații. Aceste cercetări au diverse utilizări și definiții. Am întocmit o listă cu potențialele utilizări ale bateriilor în sistemul energetic european în această secțiune, pe baza unui număr de rapoarte, clasificarea serviciilor auxiliare în conformitate cu Ghidul privind operațiunile sistemului, caracteristicile unice ale stocării bateriei și propria noastră analiză internă.

Proprietățile diferitelor dispozitive de stocare a energiei pot fi mapate. Intervalele pentru capacitatea de putere și timpul de descărcare pentru diferite metode de stocare a energiei sunt prezentate în figura de mai jos. Graficul demonstrează că există tehnologii care pot gestiona puteri de la 1 kW la aproximativ 100 MW și că bateriile sunt potrivite pentru aplicații care variază de la minute la câteva ore.

În plus, acestea sunt adesea foarte fiabile și receptive, cu timpi de reacție de numai secunde sau mai puțin.

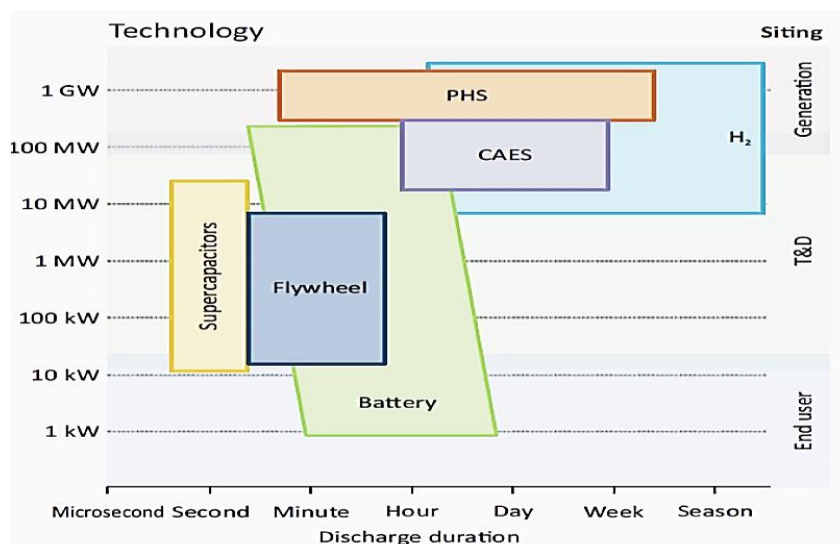


Fig 4. 2 Tehnologii de stocare a energiei în funcție de caracteristicile lor (capacitate de putere versus durata de descărcare) [142].

Ținând cont de acest lucru și trăgând din diverse surse (după cum s-a menționat mai sus), am întocmit o listă de aplicații potențiale pentru baterii în cadrul sistemului energetic european. Aceste aplicații au fost clasificate în patru grupe principale: aplicații pentru utilizatorul final (rezidențial și industrial), servicii auxiliare, aplicații de sistem de transport și distribuție (T&D) și aplicații de generare regenerabilă (aplicații RES). Figura 6 oferă o privire de ansamblu asupra diverselor servicii care vor fi explorate.

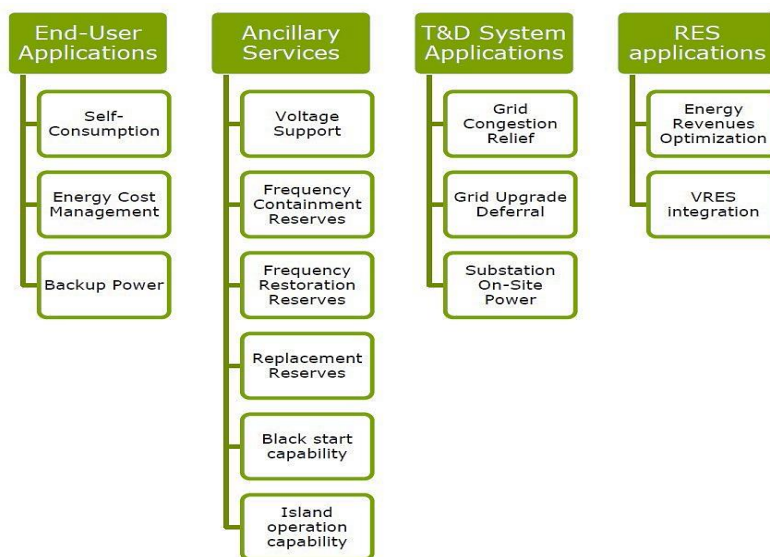


Fig 4. 3 Aplicații potențiale pentru baterii în (viitorul) sistem energetic al UE [143].

Capitolul 5

Concluzii și contribuții personale

5.1 Concluzie

Viitorul soluțiilor de control al frecvenței în sistemele de alimentare cu energie electrică este dinamic și are multe aspecte. Necesită integrarea fără probleme a energiei regenerabile, a stocării de energie, a tehnologiilor avansate și a eforturilor colaborative între părțile implicate. Pe măsură ce peisajul energetic continuă să evolueze, abordarea abaterilor de frecvență va rămâne un aspect critic pentru asigurarea fiabilității, rezistenței și durabilității rețelelor de alimentare cu energie electrică la nivel mondial.

Integrarea bateriilor pentru controlul frecvenței are potențialul de a aduce numeroase beneficii economice operatorilor de rețele, inclusiv o creștere a fiabilității și a rezilienței, o reducere a emisiilor și a consumului de combustibili fosili, și o îmbunătățire a stabilității rețelei. Deși există costuri asociate cu integrarea bateriilor în rețea, aceste costuri scad rapid pe măsură ce tehnologia bateriilor continuă să se îmbunătățească. Prin urmare, integrarea bateriilor pentru controlul frecvenței devine o opțiune tot mai atractivă pentru operatorii de rețele care doresc să modernizeze infrastructura și să îmbunătățească eficiența și fiabilitatea operațiunilor lor.

Cu toate acestea, provocările gestionării intermitenței surselor de energie regenerabilă, optimizarea localizării și dimensionării resurselor de control al frecvenței, asigurarea securității cibernetice, adaptarea cadrului reglementar, asigurarea disponibilității resurselor și modernizarea rețelei nu trebuie subestimate. Aceste provocări necesită eforturi susținute din partea operatorilor de rețele, a factorilor de decizie politici, a cercetătorilor și a părților implicate în industrie pentru a naviga cu succes.

În fața acestor provocări, este esențial să se sublinieze rolul crucial pe care controlul frecvenței îl joacă în fiabilitatea și rezistența sistemelor de alimentare cu energie electrică. Fiabilitatea rețelei nu este determinată doar de disponibilitatea surselor de energie, ci și de capacitatea de a menține o frecvență stabilă și constantă. Abaterile de frecvență, dacă nu sunt abordate, pot duce la instabilitatea rețelei, întreruperi de alimentare și perturbări economice.

Prin urmare, investițiile în soluții avansate de control al frecvenței, inclusiv sistemele de stocare a energiei, sunt investiții în durabilitatea viitoare a rețelelor de alimentare cu energie electrică. Aceste investiții pot aduce beneficii economice pe termen lung, pot reduce impactul ambiental al producției de energie și pot îmbunătăți în general calitatea și fiabilitatea furnizării de electricitate. Operatorii de rețele și părțile interesate trebuie să profite de oportunitățile oferite de evoluția peisajelor energetice, de avansurile tehnologice și de schimbările în așteptările consumatorilor pentru a construi un viitor energetic rezistent și durabil.

- 1- Integrarea energiei regenerabile: Proliferarea surselor de energie regenerabilă, cum ar fi eoliană și solară, a introdus variabilitate și incertitudine în generarea de energie. Aceste

fluctuații ridică provocări pentru menținerea frecvenței rețelei și necesită soluții avansate de control al frecvenței.

- 2- Integrarea sistemelor de stocare a energiei: Sistemele de stocare a energiei (ESS), inclusiv stocarea energiei bateriei, au apărut ca un instrument esențial pentru controlul frecvenței. Capacitatea lor de a injecta sau absorbi rapid energie în rețea le face bunuri valoroase pentru atenuarea abaterilor de frecvență.
- 3- Tehnologii avansate de rețea: implementarea tehnologiilor de rețea avansate, inclusiv unități de măsurare a fazorilor (PMU) și fazori sincronizați, permite monitorizarea și controlul în timp real al parametrilor rețelei, ajutând la o reglare mai precisă și eficientă a frecvenței.
- 4- Mecanisme de piață: mecanismele de piață în evoluție și cadrele de reglementare joacă un rol crucial în stimularea serviciilor de control al frecvenței. Proiectele de piață care pun în valoare răspunsul rapid și stabilitatea rețelei sunt esențiale pentru încurajarea investițiilor în resursele de control al frecvenței.

5.2 Contribuția personală

Cele mai importante contribuții personale sunt:

- i. S-a efectuat o analiză detaliată a literaturii pentru a identifica în mod concret necesitatea soluțiilor avansate de control al frecvenței în contextul creșterii penetrării surselor de energie regenerabilă. Ca suport pentru această analiză, s-a făcut referire la mai multe lucrări științifice;
- ii. S-au descris nivelurile de control al frecvenței și principiile de stabilitate. Acestea au fost folosite pentru a identifica problemele generate de sursele regenerabile de energie în sistemele viitoare de alimentare cu energie electrică și pentru a propune abordări noi sau îmbunătățite pentru integrarea sistemelor de stocare a energiei cu baterii în schemele de control al frecvenței;
- iii. S-a identificat și clasificat utilitatea mai multor modele de sisteme de control al stocării energiei și tipuri de sisteme de stocare a energiei pentru a determina cel mai bun sistem de stocare a energiei cu o răspuns rapid la schimbările care au loc în frecvența rețelei în general;
- iv. Au fost utilizate două software-uri pentru a modela și simula sistemele de stocare a energiei cu baterii și schemele de control al frecvenței. Aceste software-uri sunt MATLAB/Simulink și Eurostag. În timp ce Simulink este mai potrivit pentru cercetare, Eurostag permite implementarea de modele mai profesionale. Ambele au permis implementarea schemelor de control al frecvenței cu utilizarea sistemelor de stocare a energiei cu baterii;
- v. S-a realizat un model detaliat al unui Sistem de Stocare a Energiei cu Baterii în Simulink, care constă dintr-un element de baterie, un convertor DC/DC, un nod DC, un convertor DC/AC și un filtru. Acest model a fost integrat într-o configurație simplă, în care bateria funcționează ca sursă de alimentare pentru o încărcare. În acest caz, bateria operează în modul de formare a rețelei. Rezultatele simulării au arătat că modelul este stabil și oferă o înțelegere bună a părților fizice și de control ale unei baterii;
- vi. Un model de baterie și o schemă de control a frecvenței pentru nivelul de control secundar (AGC) au fost implementate în software-ul Eurostag. S-au efectuat simulări

- dinamice pentru a demonstra eficacitatea unei baterii în furnizarea controlului frecvenței într-un software profesional. Simulările au fost realizate pe sistemul de test WSCC cu 9 noduri. Generatoarele sincrone au fost modelate în detaliu, adică modelul de generator disponibil în Eurostag a fost completat cu regulele automate detaliate ale tensiunii și guvernele de viteză. Pentru modelul BESS, a fost implementată și o schemă de control detaliată;
- vii. S-a implementat, de asemenea, o schemă complexă de control al frecvenței în Simulink. Aceasta constă într-un sistem interconectat cu două zone, dezvoltat în mod specific pentru demonstrații de control al frecvenței. În această teză, aspectele noi sunt o serie realistă de date de intrare, constând din 1440 de valori, pentru a reprezenta variația puterii create de sursele de energie regenerabilă și de consum; un BESS detaliat care include evaluarea stării de încărcare, limitarea puterii la limitele de capacitate, limitarea energiei la limitele stării de încărcare și buclele de control pentru FCR și AGC. Bateria a fost integrată în schema AGC a sistemului de alimentare interconectat;
- viii. S-a efectuat o analiză economică privind dezvoltarea sistemelor de stocare a energiei cu baterii și utilizarea acestora în diverse aplicații în sistemele de alimentare cu energie electrică. Această analiză este importantă deoarece oferă o viziune asupra potențialului sistemelor de stocare pentru stabilitatea și controlul frecvenței în contextul creșterii proporției de producție de energie din surse regenerabile.

5.3 Perspective de viitor

Direcțiile de dezvoltare în viitor sunt:

- i. Extinderea soluțiilor de control al frecvenței pentru utilizarea centralelor virtuale de energie și microrețelele;
- ii. Realizarea dimensionării optime a sistemelor de stocare a energiei cu baterii potrivite pentru diversele soluții de utilizare în sistemul electroenergetic;
- iii. Efectuarea de simulări pe sisteme electroenergetice de dimensiuni mai mari, eventual pe modele la nivel național;
- iv. Realizarea de simulări legate de răspunsul la frecvență în conformitate cu codurile tehnice pentru sistemele de stocare a energiei cu baterii.