



**Modelarea, simularea și controlul unei turbine eoliene cu generator sincron cu magneti permanenti și stocare de energie**

**PROIECT DE DIPLOMĂ**

Autor: **Tudor Andrei NAICU**

Conducător științific: **As.Dr.Ing. Vlad Mihai MIHALY**

**2024**



**FACULTATEA DE AUTOMATICĂ ȘI CALCULATOARE**  
**DEPARTAMENTUL DE AUTOMATICĂ**

Vizat,

DECAN

**Prof. dr. ing. Mihaela DÎNSOREANU**

DIRECTOR DEPARTAMENT AUTOMATICĂ

**Prof. dr. ing. Honoriu VĂLEAN**

Autor: **Tudor Andrei NAICU**

**Modelarea, simularea și controlul unei turbine eoliene cu generator sincron cu magneti permanenți și stocare de energie**

1. **Enunțul temei:** *Proiectul își propune realizarea modelării, simulării și controlului unui sistem eolian cu stocare de energie pentru a optimiza performanța energetică în condiții variabile de funcționare.*
2. **Conținutul lucrării:** *Pagina de prezentare, Declarație privind autenticitatea proiectului, Sinteza proiectului, Cuprins, Introducere, Sisteme eoliene, Analiză și proiectare, Implementare și testare, Concluzii, Bibliografie.*
3. **Locul documentării:** *Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca*
4. **Consultanți:** –
5. **Data emiterii temei:** 01.11.2023
6. **Data predării:** 11.07.2024

Semnătura autorului: \_\_\_\_\_ 

Semnătura conducătorului științific: \_\_\_\_\_ 

FACULTATEA DE AUTOMATICĂ ȘI CALCULATOARE  
DEPARTAMENTUL DE AUTOMATICĂ

Declarație pe propria răspundere privind  
autenticitatea lucrării de licență

Subsemnatul(a) **Tudor Andrei NAICU**, legitimat(ă) cu **CI** seria **SB** nr. **915792** CNP **5011109324838**, autorul lucrării: **Modelarea, simularea și controlul unei turbine eoliene cu generator sincron cu magneți permanenti și stocare de energie**, elaborată în vederea susținerii examenului de finalizare a studiilor de licență la **Facultatea de Automatică și Calculatoare**, Specializarea **Automatică și Informatică Aplicată** din cadrul Universității Tehnice din Cluj-Napoca, sesiunea **Iulie 2024** a anului universitar **2023-2024**, declar pe propria răspundere că această lucrare este rezultatul propriei activități intelectuale, pe baza cercetărilor mele și pe baza informațiilor obținute din surse care au fost citate, în textul lucrării și în bibliografie.

Declar că această lucrare nu conține porțiuni plagiate, iar sursele bibliografice au fost folosite cu respectarea legislației române și a convențiilor internaționale privind drepturile de autor.

Declar, de asemenea, că această lucrare nu a mai fost prezentată în fața unei alte comisii de examen de licență.

În cazul constatării ulterioare a unor declarații false, voi suporta sancțiunile administrative, respectiv, *anularea examenului de licență*.

Data

Nume, Prenume

**08.07.2024**

**Tudor Andrei NAICU**

Semnătura



**FACULTATEA DE AUTOMATICĂ ȘI CALCULATOARE  
DEPARTAMENTUL DE AUTOMATICĂ**

**SINTEZA**

proiectului de diplomă cu titlul:

**Modelarea, simularea și controlul unei turbine eoliene cu generator sincron cu magneți permanenți și stocare de energie**

Autor: **Tudor Andrei NAICU**

Conducător științific: **As.Dr.Ing. Vlad Mihai MIHALY**

1. Cerințele temei: Modelarea matematică, simularea și controlul unui sistem eolian cu stocare de energie.
2. Solutii alese: Pentru îndeplinirea cerinței principale a acestui proiect a fost necesar studiul fenomenelor fizice care acționează asupra unui sistem eolian și proiectarea fiecărei subcomponente în parte pentru a alătui un sistem funcțional. Mediul de dezvoltare ales pentru proiectarea sistemului este MATLAB/Simulink.
3. Rezultate obținute: Principalul rezultat obținut este un sistem eolian care încarcă sau descarcă sistemul cu stocare de energie pe baterii în funcție de condițiile variabile de vânt și cerere din rețea. Logica funcționării este dată de un control supervisor. Un alt rezultat obținut este modularitatea și scalabilitatea sistemului prin prisma proiectării subcomponentelor sistemului ca și componente individuale ușor de modificat și multiplicat.
4. Testări și validări: Sistemul eolian cu stocare de energie proiectat a fost testat în condiții variabile de funcționare prin generarea unor semnale de intrare pentru care sistemul trebuie să mențină un deficit de energie minim față de rețea.
5. Contribuții personale: Analiza și cercetarea sistemelor eoliene, proiectarea subcomponentelor care alcătuiesc sistemul eolian cu stocare de energie, proiectarea sistemului de control supervisor, implementarea subcomponentelor într-un sistem global funcțional, testarea și analiza rezultatelor obținute.
6. Surse de documentare: Articole științifice, statistici globale, manuale disponibile în literatura de specialitate.

Semnătura autorului: \_\_\_\_\_ 

Semnătura conducerului științific: \_\_\_\_\_ 

# Cuprins

<b>Capitolul 1 Introducere</b>	<b>1</b>
1.1 Context general . . . . .	1
1.2 Obiective . . . . .	3
1.2.1 Obiective generale . . . . .	3
1.2.2 Obiective specifice . . . . .	3
1.3 Specificații . . . . .	4
1.3.1 Parametrizarea componentelor . . . . .	4
1.3.2 Funcționalități . . . . .	4
1.3.3 Performanțe . . . . .	5
1.3.4 Limitări . . . . .	5
<b>Capitolul 2 Studiu Bibliografic</b>	<b>6</b>
2.1 Componentele Turbinelor Eoliene Moderne . . . . .	7
2.2 Turbine Eoliene cu Generator Sincron cu Magnetă Permanentă . . . . .	7
2.3 Strategii de Control pentru Turbinele Eoliene . . . . .	9
2.4 Integrarea Sistemelor de Stocare a Energiei . . . . .	12
<b>Capitolul 3 Analiză și Proiectare</b>	<b>14</b>
3.1 Principiile și Forțele Aerodinamice care acționează asupra Turbinelor Eoliene	14
3.2 Ecuatiile Fundamentale ale Generatorului PMSG . . . . .	17
3.3 Redresorul de Tensiune AC-DC . . . . .	20
3.4 Converteoarele Buck și Boost . . . . .	21
3.4.1 Convertorul Buck . . . . .	21
3.4.2 Convertorul Boost . . . . .	21
3.5 Invertorul de Tensiune DC-AC . . . . .	22
3.5.1 Inverteoarele Monofazate . . . . .	22
3.5.2 Inverteoarele Trifazate . . . . .	22
3.6 Sisteme de Stocare a Energiei - Baterii . . . . .	23
3.7 Proiectarea Subcomponentelor . . . . .	23
3.7.1 Proiectarea Părții Mecanice a Turbinei . . . . .	24
3.7.2 Proiectarea Generatorului Sincron cu Magnetă Permanentă (PMSG) . . . . .	25
3.7.3 Proiectarea Invertorului PWM . . . . .	26
3.7.4 Proiectarea Controlului MPPT . . . . .	27
3.7.5 Proiectarea Redresorului SVPWM . . . . .	28
3.7.6 Proiectarea Converteoarelor Buck și Boost . . . . .	29
3.7.7 Proiectarea Sistemului de Stocare pe Baterii . . . . .	31
3.8 Proiectarea Sistemului Supervizor de Control . . . . .	35
<b>Capitolul 4 Implementare și Testare</b>	<b>37</b>
4.1 Implementarea Turbinei Eoliene și a generatorului PMSG . . . . .	37
4.2 Implementarea Converteoarelor de Putere . . . . .	39
4.3 Implementarea Sistemului de Stocare pe Baterii . . . . .	44
4.4 Implementarea Controlului Supervizor . . . . .	46
4.5 Simularea și Testarea Sistemului Eolian cu Stocare de Energie . . . . .	47

<b>Capitolul 5 Concluzii</b>	<b>52</b>
<b>Bibliografie</b>	<b>54</b>
<b>Anexa A Secțiuni relevante din cod</b>	<b>56</b>

# Capitolul 1. Introducere

## 1.1. Context general

Energia eoliană este una dintre cele mai promițătoare surse de energie verde (engl. *green energy*) disponibilă omenirii, oferind o contribuție importantă în contextul actual al combaterii schimbărilor climatice. Totodată, energia verde reduce dependența de combustibili fosili, care fac parte din categoria energiei neregenerabile și care sunt încă utilizate în rețelele energetice de mari dimensiuni.

Dezvoltarea tehnologică rapidă a condus la îmbunătățirea eficienței și a fiabilității turbinelor eoliene, oferindu-le un statut înalt în strategiile energetice de lungă durată. Aceste turbine transformă energia cinetică a vântului în energie electrică, contribuind la reducerea emisiilor de carbon și la promovarea unui mediu mai curat.

Cresterea capacitatei instalate de energie eoliană la nivel global, de ordinul sutelor de mii de MegaWatt, este un alt factor care îi subliniază importanța. Conform unei statistici realizate la nivel global de către Global Wind Report 2024 [I], publicată de Statista, în anul 2023 a fost instalată o capacitate de 116 GW. Cresterea rapidă a energiei eoliene poate fi observată și în Fig 1.1, care ilustrează capacitatea anuală mondială instalată pe o perioadă de 26 de ani.

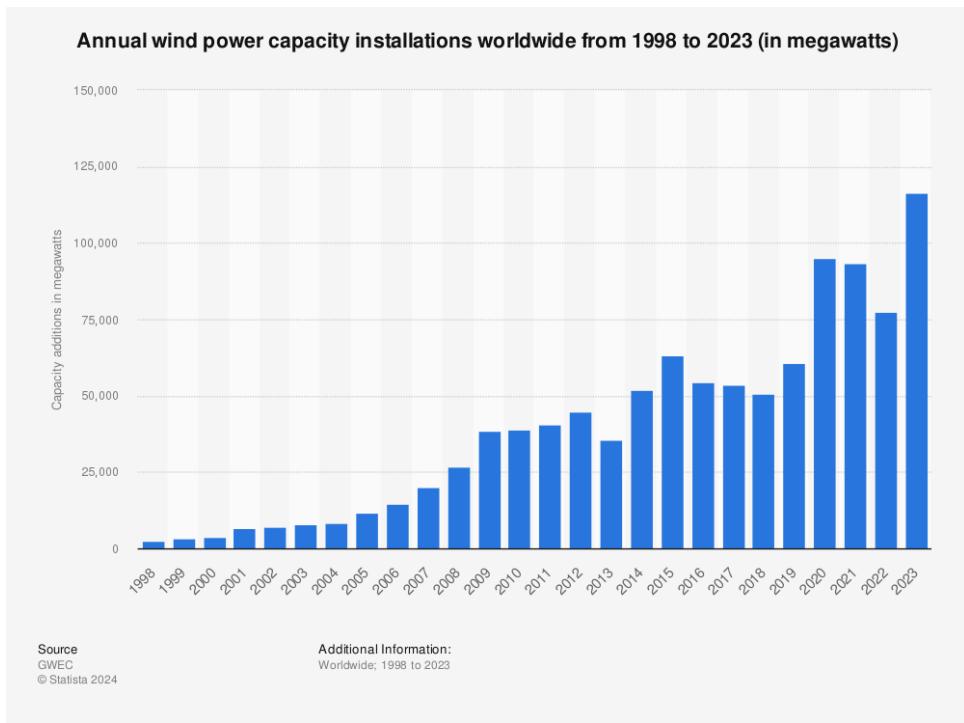


Figura 1.1: Capacitatea anuală de energie eoliană instalată la nivel mondial din 1998 până în 2023 (în MW)

În ultimii ani, investițiile în capacitatele eoliene au crescut semnificativ, susținute de progrese tehnologice și de politici guvernamentale favorabile. În 2023, capacitatea globală instalată de energie eoliană a atins 1021 GW, conform aceluiasi Global Wind

Report 2024 [1], iar estimările indică faptul că această cifră va continua să crească rapid în următorul deceniu.

În baza datelor adunate de către organizația non-profit Ember în raportul „Yearly Electricity Data 2023” [2], țările care produc cea mai multă energie eoliană sunt China, Statele Unite ale Americii, Germania, Regatul Unit al Marii Britanii și Brazilia. Conform aceluiași raport, Danemarca produce 55% din energie din vânt și ocupă locul întâi, urmată de Lituania și Irlanda.

La nivel local, în România, conform „International Trade Administration” [3], în august 2023, 15.9% din puterea instalată în capacitate de producție de energie electrică provine din energia eoliană. Mai mult, potrivit unei estimări realizate de World Bank [4], potențialul tehnic al instalării offshore, în Marea Neagră, de turbine eoliene ar atinge cifra de 76 GW. Astfel, există un potențial mare în continuă dezvoltare a energiei provenite din vânt pe teritoriul țării.

În Europa, companiile de top în producția de energie eoliană includ Vestas din Danemarca, Siemens Gamesa din Spania, și Nordex din Germania. Aceste companii sunt cunoscute pentru inovațiile lor în tehnologia turbinelor eoliene și pentru contribuțiile lor majore la creșterea capacitaților eoliene la nivel global.

Pentru atingerea obiectivelor internaționale de reducere a emisiilor de gaze cu efect de seră și de promovare a sustenabilității energetice este nevoie de o dezvoltare și implementare eficientă a turbinelor eoliene. Tehnologiile moderne permit acum monitorizarea și controlul turbinelor la nivel de precizie înaltă, optimizând astfel producția de energie și reducând la minimum timpul de în care acestea nu sunt funcționale. În plus, integrarea sistemelor de stocare a energiei devine tot mai importantă și populară, întrucât permite stocarea surplusului de energie produsă în perioadele de vânt puternic și utilizarea acestia când condițiile meteorologice sunt mai puțin favorabile. În acest context, proiectul de față își propune explorarea și dezvoltarea soluțiilor pentru controlul și optimizarea turbinelor eoliene cu generator sincron cu magneți permanenți (engl. *Permanent Magnet Synchronous Generator – PMSG*) și stocare de energie.

Tema acestui proiect se concentrează pe modelarea, simularea și controlul unei turbine eoliene echipate cu generator sincron cu magneți permanenți și sisteme de stocare de energie. Proiectul implică realizarea unei modelări matematice detaliate a întregului sistem în mediul de dezvoltare MATLAB/Simulink, un instrument puternic în analiza și optimizarea sistemelor complexe. Componentele modelate includ sistemul mecanic al turbinei eoliene, generatorul sincron cu magneți permanenți, invertorul, redresorul, convertoarele Buck și Boost, sistemul de stocare și logica de control a sistemului.

Modelarea și simularea componentelor amintite mai sus permit o înțelegere profundată a interacțiunilor dintre acestea și a dinamicii sistemului, facilitând identificarea și implementarea strategiilor optime de control. Stocarea energiei joacă un rol important, asigurând o furnizare constantă de energie electrică și maximizând utilizarea energiei generate de turbina.

Simulările se concentrează pe comportamentul dinamic al sistemului în condiții variabile de funcționare și pe optimizarea algoritmilor de control pentru a maximiza eficiența energetică și stabilitatea sistemului. Astfel, proiectul își propune să ofere o soluție integrată, eficientă și scalabilă pentru utilizarea energiei eoliene în contextul actual al tranziției energetice globale.

## 1.2. Obiective

În contextul prezentat anterior, lucrarea de față își propune realizarea modelării unui sistem eolian scalabil în mediul de dezvoltare MATLAB/Simulink. Sistemul este compus din multiple elemente: partea mecanică a turbinei, generatorul sincron cu magneti permanenți, convertoare de putere și un sistem de stocare a energiei.

### 1.2.1. Obiective generale

#### a.) Dezvoltarea unui model matematic pentru un sistem eolian cu stocare de energie

Acest obiectiv urmărește să creeze o reprezentare precisă a comportamentului unui sistem eolian, incluzând toate componente sale majore. Modelele matematice deschid calea către înțelegerea interacțiunilor dintre diferitele părți ale sistemului și pentru optimizarea performanței generale.

Simulațiile inițiale vor evalua comportamentul fiecărei componente individuale, urmând ca acestea să fie integrate într-un model global.

#### b.) Implementarea unui algoritm de control al fluxului de energie în sistem

Dezvoltarea logicii de control al fluxului de energie în sistem utilizând structura Stateflow/Flowchart a mediului de dezvoltare. Această structură permite modelarea tipelor logice precum arbori de decizie sau structuri repetitive.

#### c.) Simularea și testarea comportamentului sistemului eolian în condiții variabile de funcționare

Realizarea simulațiilor detaliate pentru a evalua răspunsul sistemului la diferite condiții de funcționare. Testele includ scenarii de vânt și cerere de energie variabile. Diferitele scenarii de testare permit validarea performanțelor sistemului, cât și fiabilitatea și eficiența acestuia.

### 1.2.2. Obiective specifice

#### a.) Studiul comportamentului turbinei eoliene și analiza fenomenului fizic

Analiza principiilor fizice care stau la baza funcționării turbinelor eoliene, inclusiv dinamica fluidelor și interacțiunile mecanice.

#### b.) Modelarea și simularea turbinei eoliene și a generatorului sincron cu magneti permanenți

Analiza și dezvoltarea modelelor pentru componente mecanice și electrice ale turbinei și generatorului.

#### c.) Alegerea unui algoritm de control pentru maximizarea producerii de energie electrică

Analiza și implementarea unei strategii de control, precum Maximum Power Point Tracking, pentru maximizarea producerii de energie eoliană.

#### d.) Modelarea și simularea convertoarelor de putere

Analiza și implementarea convertoarelor: redresor, ridicător de tensiune "Boost" și coborător de tensiune "Buck". Fiecare componentă menționată va fi modelată și testată pentru asigurarea transferului eficient de energie.

#### e.) Modelarea și simularea unui sistem de stocare de energie cu baterii

Analiza, identificarea și modelarea unui sistem de stocare de energie bazat pe baterii. Sistemul va asigura continuitatea furnizării de energie electrică.

#### f.) Testarea și validarea comportamentului sistemului

Implementarea scenariilor de testare pentru a valida performanța dinamicii sistemului în condiții variabile de funcționare.

### 1.3. Specificații

Dezvoltarea modelului unui sistem eolian presupune mai multe aspecte de luat în calcul, cel mai important fiind parametrizarea componentelor care îl alcătuiesc. Cu o parametrizare precisă a componentelor se obțin rezultate ale simulăriilor apropriate de realitate.

#### 1.3.1. Parametrizarea componentelor

**Turbina eoliană:** Modelul aerodinamic al palelor poate include coeficienți de putere și rezistență, densitatea aerului, raza palelor, viteza vântului.

##### Generatorul sincron cu magneti permanenti

Caracteristicile electromagnetice ale PMSG sunt date de către curenții din stator, viteza rotorului, fluxurile magnetice, rezistență și inductanța bobinelor, fiind astfel o componentă foarte sensibilă la alegerea valorilor sistemului.

##### Convertoare de putere

Factorii luați în calcul la modelarea convertoarelor de putere pot cuprinde: capacitațile și rezistențele, eficiența, dar și pierderile de comutație.

##### Sistemul de stocare al energiei

Pentru ca un model de baterie să fie apropiat de realitate, parametrii componentei trebuie identificați în funcție de o celulă reală, care mai apoi poate fi scalată la capacitatea dorită.

#### 1.3.2. Funcționalități

##### Captarea energiei eoliene

Modelarea aerodinamicii palelor turbinei pentru a simula captarea energiei cinetice a vântului. Captarea energiei implică utilizarea coeficienților de putere și rezistență specifici palelor. Totodata, trebuie obținut un coeficient de putere optim.

##### Conversia energiei mecanice în energie electrică

Modelul matematic al generatorului sincron cu magneti permanenti, care include dinamica rotorului și cea a statorului permit transformarea energiei mecanice, captate de către palele turbinei, în energie electrică.

##### Reglarea fluxului de energie

Modelarea matematică a convertoarelor de putere (redresor, convertor Boost și convertor Buck) permit adaptarea energiei electrice în funcție de cerințele de sistem. Pe de altă parte, logica de control implementată folosind Stateflow/Flowchart gestionează eficient fluxul de energie din sistem.

##### Stocarea energiei

Modelarea sistemului de stocare cu baterii permite acumularea și utilizarea energiei din baterie în funcție de cerințele sistemului.

##### Scalabilitate

Organizarea în subcomponente a întregului sistem oferă utilizatorului libertate în scalabilitatea modelului la rang de parc eolian.

### **1.3.3. Performanțe**

Eficiența energetică a modelului trebuie să fie maximizată prin alegerea corectă a parametrilor componentelor. Pe de altă parte, și răspunsul modelului la variațiile care intervin asupra sistemului trebuie să asigure o simulare realistă.

### **1.3.4. Limitări**

Simularea nu include un model detaliat al ambientului, precum temperatura și umiditatea, care au efect asupra diferitelor componente care alcătuiesc sistemul. Timpul de simulare este un alt factor limitator, deoarece depinde foarte mult atât de eșantionarea folosită la nivel global, cât și de performanțele hardware pe care rulează modelul.

## Capitolul 2. Studiu Bibliografic

Utilizate de-a lungul secolelor pentru diverse scopuri, de la măcinarea cerealelor la navigație și, în ultimul secol, pentru generarea de energie electrică, sistemele eoliene au o lungă și fascinantă istorie. Primele utilizări ale energiei eoliene datează de mii de ani, când omenirea a început să folosească vântul pentru a propulsa ambarcațiunile pe râuri și mări. [5]

Georges Jean Marie Darrieus, unul dintre pionierii în dezvoltarea turbinelor eoliene, a patentat în anul 1931 turbina eoliană cu ax vertical, cunoscută astăzi sub numele de turbină Darrieus. Începând cu anii 1970, acest tip de turbină a fost ulterior dezvoltată de către inginerii Consiliului Național de Cercetare al Canadei. Un avantaj al acestui tip de turbină este faptul că design-ul ii permite să opereze eficient sub tensiuni și forțe ridicate. Ca urmare, acestea sunt construite din componente mai ieftine și mai ușoare. [6]

Limitia Betz, formulată în anul 1919 de către pionierul Albert Betz, este un principiu fundamental în domeniul energiei eoliene, stabilind eficiența maximă teoretică a unei turbine eoliene. Betz a demonstrat faptul că nicio turbină nu poate capta mai mult de 59.3% din energia cinetică a vântului. [7]

Un alt pionier notabil, inginerul finlandez Sigurd Johannes Savonius, a creat în anul 1922 o turbină cu ax vertical cu palele în formă de S. Având o eficiență mai scăzută decât a altor tipuri de turbine, sistemul inventat de către Savonius este utilizat în principal în aplicații mecanice, precum pomparea apei. [8]

În secolul al XX-lea, progresul tehnologic a transformat turbinele eoliene într-o sursă majoră de energie electrică. Primele turbine moderne au fost dezvoltate în anii 1970, iar de atunci, tehnologia a evoluat rapid, conducând la turbinele eoliene eficiente și fiabile de astăzi. În Figura 2.1 se pot observa cele mai cunoscute tipuri de turbine eoliene: Turbina eoliană cu ax orizontal (HAWT), Savonius și Darrieus, acestea din urmă fiind turbine eoliene cu ax vertical (VAWT).

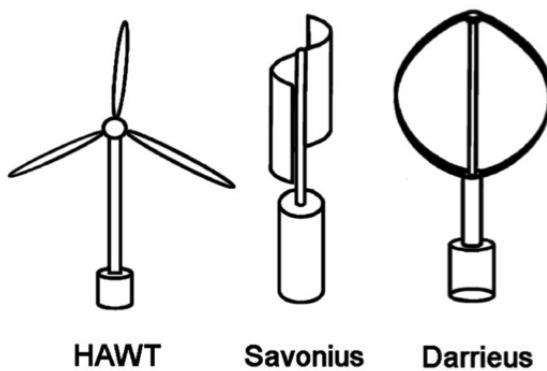


Figura 2.1: Tipuri de Turbine Eoliene [8]

Turbinele eoliene onshore (pe uscat) sunt cele mai întâlnite în zilele noastre, datorită accesibilității și costurilor de instalare și întreținere. Cu toate acestea, turbinele offshore(pe mare) beneficiază de viteze mai mari și mai constante ale vantului, ceea ce le oferă un potențial semnificativ de generare de energie. Conform Global Wind Energy

Council (GWEC) [1], în anul 2023 capacitatea instalată a turbinelor eoliene offshore a atins aproximativ 60 GW, cu estimări care indică o creștere rapidă până în anul 2030, depășindu-se 200 GW instalații. Conform aceleiași insușirii [1], până în anul 2030, capacitatea totală instalată a energiei eoliene ar trebui să depășească cifra de 1400 GW. Această creștere va juca un rol semnificativ în atingerea obiectivelor de sustenabilitate și în reducerea dependenței de combustibili fosili.

## 2.1. Componentele Turbinelor Eoliene Moderne

Turbinile eoliene moderne reprezintă sisteme complexe, alcătuite din multiple componente care permit transformarea energiei cinetice a vântului în energie electrică. Aceste componente sunt proiectate să asigure eficiență maximă și durabilitate pe termen lung.

**Palele turbinei:** Proiectate în formă de profil aerodinamic, palele sunt responsabile pentru captarea energiei vântului și transformarea acestora în energie mecanică. Fabricate adesea din materiale compozite, palele sunt concepute pentru a rezista la solicitările mecanice și la condițiile meteorologice variabile, maximizând astfel eficiența și durabilitatea.

**Rotorul:** Acesta este componenta rotativă a turbinei, formată din pale și butuc. Rotorul transformă energia cinetică a vântului în energie cinetică unghiulară. Designul și materialele utilizate pentru rotor sunt importante pentru performanța generală a turbinei, influențând direct eficiența energetică și stabilitatea operării.

**Nacela:** Nacela este carcasa care adăpostește componentele critice ale turbinei, precum generatorul, cutia de viteze și sistemele de control. Aceasta protejează echipamentele interne de condițiile externe dure și asigură accesul pentru operațiuni de întreținere și reparări.

**Turnul:** Turnul susține nacela și rotorul la o înălțime suficientă de mare pentru a capta vânturile puternice și constante. Înălțimea și stabilitatea turnului sunt luate în calcul pentru performanța turbinei, având un impact direct asupra eficienței captării energiei eoliene.

**Fundația:** Fundația turbinei asigură stabilitatea structurii și este proiectată să reziste forțelor generate de vânt și de rotația rotorului. O fundație solidă oferă o operare sigură și eficientă a turbinei, prevenind mișcările necontrolate și reducând riscul de avarie structurală.

Funcționarea unei turbine eoliene se bazează pe principiile aerodinamicii și pe transformarea mecanică și electrică a energiei. Vântul, trecând peste palele turbinei, generează o forță portantă care determină rotirea rotorului și a palelor. Această mișcare rotativă este transmisă unui generator prin intermediul unui arbore, unde energia mecanică este transformată în energie electrică. Sistemele de control și convertoarele de putere optimizează și regleză fluxul de energie în sistem, asigurând o conversie eficientă și stabilă a energiei eoliene captate.

## 2.2. Turbine Eoliene cu Generator Sincron cu Magneți Permanenți

Generatorul sincron cu magneți permanenți sau, pe scurt, PMSG, reprezintă o componentă fără de care energia eoliană captată nu ar putea fi transformată în energie electrică. PMSG-urile sunt apreciate pentru eficiența lor ridicată, fiabilitatea și capacitatea de a funcționa eficient la viteze variabile ale vântului, ceea ce contribuie la optimizarea producției de energie electrică.

Conform studiilor [9], [10] și [11], unul dintre principalele avantaje ale PMSG este

eliminarea necesității unei cutii de viteze, care este o componentă costisitoare și predispusă la defecțiuni în sistemele tradiționale de generatoare asincrone. Eliminarea cutiei de viteze nu doar că reduce costurile de menenanță, dar contribuie și la scăderea greutății nacelei turbinei, aspect care oferă stabilitate și performanță structurală întregului sistem. Autorii articoului [9] menționează și faptul că generatoarele sincrone cu magneti permanenți direct drive, numite și DD-PMSG, sunt preferate în special pentru aplicațiile offshore, unde accesul pentru întreținere este dificil și costisitor. Astfel, utilizarea PMSG fără cutie de viteze reduce riscul de avarie mecanică și asigură o durată de viață mai lungă a echipamentului. Figura 2.1 ilustrează noua turbină eoliană cu capacitatea de 14 MW pentru aplicații offshore a companiei Siemens Gamesa [12]. Se poate observa și faptul că nacula este foarte compactă, rotorul generatorului fiind prins direct de rotorul exterior. Mai mult, lipsa unei cutii de viteze, crește numărul de perechi de poli ai generatorului și ușurează masa nacelei.



Figura 2.2: Turbina eoliană offshore Siemens Gamesa 14-222 cu tehnologie Direct Drive

Generatoarele cu magneti permanenți oferă o eficiență superioară în comparație cu alte tipuri de generatoare, cum ar fi generatorul asincron cu dublă alimentare, sau prescurtat, DFIG (din engleză, Double Fed Induction Generator). PMSG-urile permit operarea la viteze variabile, ceea ce înseamnă că turbinele echipate cu acest tip de generator pot capta mai eficient energia din vânturile cu intensitate variabilă, caracteristică importantă pentru maximizarea producției de energie. De altfel, PMSG-urile au un răspuns dinamic rapid, ceea ce le permite să se adapteze rapid la schimbările condițiilor de vânt [10].

În articolul [11] se discută despre contrastul dintre generatoarele PMSG și generatoarele DFIG. Acestea din urmă necesită utilizarea unei cutii de viteze pentru a adapta viteza de rotație a turbinei la viteza de operare a generatorului asincron. Deși DFIG-urile sunt utilizate pe scară largă datorită costurilor initiale mai mici și a flexibilității în controlul puterii active și reactive, acestea prezintă dezavantaje semnificative pe termen lung. Cutia de viteze este o componentă costisitoare și predispusă la defecțiuni, ceea ce crește costurile de menenanță și afectează fiabilitatea generală a sistemului.

### 2.3. Strategii de Control pentru Turbinele Eoliene

Controlul eficient al turbinelor eoliene este decisiv pentru optimizarea producției de energie și pentru asigurarea stabilității sistemului. Diverse metode de control au fost propuse și testate în literatura de specialitate, fiecare având avantaje și limitări specifice.

În articolul [13] se prezintă o strategie de control pentru integrarea unei turbine eoliene cu generator sincron cu magneti permanenti cu un sistem de stocare a energiei pe baterii. Controlul propus constă din trei părți principale: controlul convertorului pe partea mașinii (MSC), controlul convertorului pe partea rețelei (GSC) și controlul convertorului bateriei. MSC implementează algoritmul Maximum Power Point Tracking, pe scurt MPPT, pentru a asigura captarea maximă a energiei eoliene. Acest algoritm ajustează punctul de referință la care trebuie să opereze generatorul în funcție de viteza vântului și a unui factor optim pentru maximizarea coeficientului de putere. Această referință controlează curentul pe stator în sistemul de coordonate d și q, care, la rândul lui, controlează cuplul electromagnetic. A doua parte a controlului propus în [13] se asigură că energia generată este conformă cu cerințele din rețea. GSC oferă și o stabilitate ridicată în condițiile unei rețele cu raport scazut de scurt-circuit. Controlul convertorului bateriei asigură, la rândul lui, stabilitate în sistem prin decuplarea magistralei DC de la puterea produsă de către turbina eoliană, eliminând posibilitatea apariției fluctuațiilor din cauza variațiilor rapide ale vântului.

Lucrarea științifică [14] propune o abordare de control predictiv pentru turbinele eoliene bazate pe PMSG, utilizat pentru reglarea frecvenței într-o rețea izolată. Acest control predictiv permite reacții rapide la schimbările de sarcină și viteza a vântului, asigurând o stabilitate mai mare a rețelei. Autorii demonstrează că utilizarea controlului predictiv poate îmbunătăți performanța dinamică a sistemului și poate reduce fluctuațiile de frecvență, asigurând o funcționare mai stabilă și mai eficientă. În studiul amintit, este vorba despre un parc eolian izolat care cuprinde 4 turbine eoliene, astfel pe baza modelului matematic al sistemului, controlerul utilizează predicția stării viitoare pentru optimizarea acțiunilor de control. În contextul unei turbinelor eoliene PMSG, controlul predictiv este utilizat pentru a genera o compensare a cuplului pentru fiecare turbină, adaptându-se astfel la variațiile rapide ale sarcinii și ale vitezei vântului. Această metodă permite fiecărei turbine să reacționeze diferit la perturbațiile asupra rețelei, în funcție de viteza generatorului. Totodată, rețeaua izolată descrisă în articolul [14], cuprinde și un generator diesel de 5 MW, acesta compensând, la rândul lui, diferențele de putere pentru a menține stabilitatea frecvenței rețelei.

Autorii Jian Chena, Wei Yaob, Chuan-Ke Zhangc, Yaxing Rend și Lin Jiangd [9], discută despre proiectarea unui controler MPPT (Maximum Power Point Tracking) robust pentru o turbină eoliană bazată pe un generator sincron cu magneti permanenti (PMSG) conectată la rețea, utilizând o metodă de control adaptiv neliniar bazată pe observația perturbațiilor. Controlul adaptiv neliniar propus se bazează pe un observator de perturbații de mare câstig (HGPNAC - high gain perturbation observer based nonlinear adaptive control), care estimatează termenul de perturbație acumulat, ce include toate neliniaritățile sistemului, incertitudinile parametrilor și alte perturbații necunoscute. Estimarea perturbațiilor este utilizată pentru a compensa perturbațiile reale și pentru a realiza un control adaptiv linearizat al sistemului neliniar inițial. Aceasta permite sistemului să se adapteze la variațiile de viteza ale vântului și să mențină performanțe optime fără a necesita un model detaliat al sistemului și măsurători complete ale stării. Unul dintre avantajele majore ale acestei metode este capacitatea de a oferi o performanță superioară în comparație cu controlurile convenționale, cum ar fi controlerul vectorial

(VC) și controlerul FLC (Feedback linearizing controller). Controlul VC, deși simplu și capabil de decuplare a puterii active și reactive, nu poate oferi performanțe satisfăcătoare datorită neliniarităților și punctelor de operare variabile ale turbinei eoliene cu PMSG. În schimb, FLC poate oferi performanțe dinamice mai bune, dar este sensibil la incertitudinile parametrilor și necesită un model exact al sistemului. Prin utilizarea observatorului de perturbații, metoda HGPONAC-MPPT poate estima cu precizie toate stările sistemului și perturbațiile, permitând controlul precis și robust al turbinei eoliene. Aceasta se traduce într-o eficiență crescută a conversiei energiei și o stabilitate îmbunătățită a sistemului. În plus, controlul propus în [9] necesită doar măsurători de intrare și valorile nominale ale parametrilor, ceea ce îl face mai ușor de implementat în sistemele practice. Rezultatele testelor arată faptul ca schema de control propusă de către autorii studiului [9] oferă o eficiență mai mare a conversiei energiei și performanțe dinamice superioare, în comparație cu controlerul vectorial standard și FLC, demonstrând robustețea metodei împotriva factorilor perturbatori.

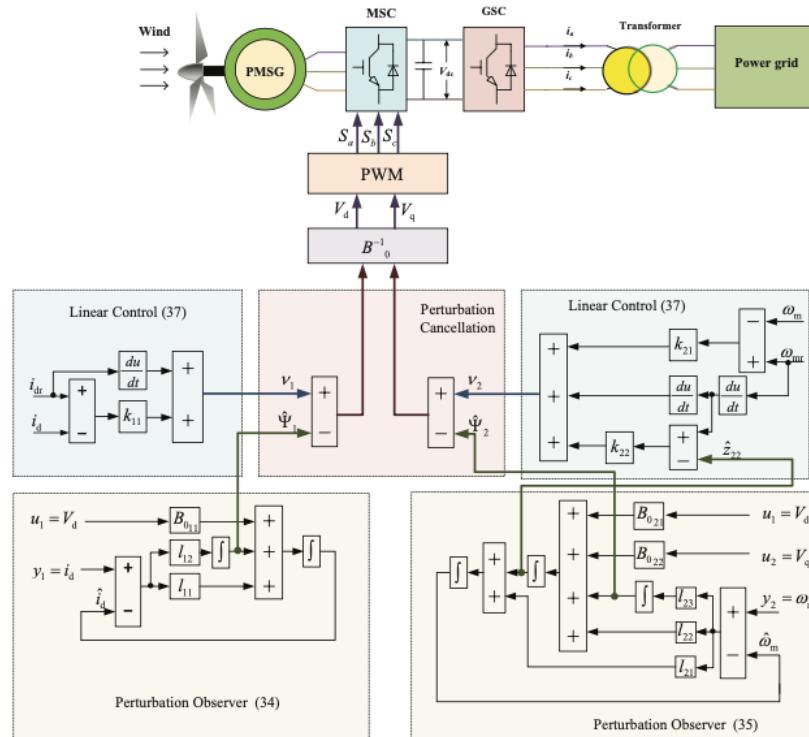


Figura 2.3: Schema de control HGPONAC-MPPT pentru o turbina eoliană cu PMSG [9]

Studiul [15] analizează o metodă de control pentru o turbină eoliană hibridă cu sistem de stocare a energiei pe bază de hidrogen. Metoda controlului direct al cuplului, DTC (din engleză, Direct Torque Control), permite răspunsuri rapide și precise ale fluxului electromagnetic și cuplului în generatoarele cu magneți permanenti. Metoda propusă asigură o eficiență crescută în conversia energiei și o stabilitate îmbunătățită a sistemului. DTC este recunoscut pentru capacitatea sa de a gestiona fluctuațiile rapide și variabile ale vântului, asigurând astfel o performanță optimizată a turbinei. În cazul turbinelor eoliene hibride din studiu, DTC optimizează interacțiunea între turbina eoliană și sistemul de stocare a energiei pe bază de hidrogen, îmbunătățind eficiența globală a sistemului și

stabilitatea operațională.

În lucrarea [16], se discută despre optimizarea controlului turbinelor PMSG în scenarii de tensiune neechilibrată și distorsionată ale rețelei. Metoda propusă îmbunătățește performanța și stabilitatea turbinelor eoliene în condiții dificile de operare, în rețele complexe și variabile. Autorii propun utilizarea unui control optimizat care să minimizeze impactul variațiilor de tensiune asupra performanței generale a turbinei. Strategia propusă combină o tehnică nouă de adaptare a secvenței pozitive a axelor dq ale curentului de ieșire al generatorului pentru a extrage puterea maximă disponibilă dintr-o turbină eoliană. În același timp, componenta de secvență negativă este utilizată pentru a îmbunătăți calitatea curentului de ieșire. Un controler de curent este introdus în GSC (Grid Side Controller) pentru a compensa efectele armoniciilor de ordinul 2 și 6 ale curentilor de ieșire. Prin separarea componentelor pozitive și negative ale curentilor din GSC, metoda propusă îmbunătățește semnificativ calitatea curentului de ieșire, fără a necesita adăugarea de hardware suplimentar, comparativ cu metodele anterioare. Metoda introduce un controler separat pentru fiecare armonică și controlează separat puterea activă și reactivă, asigurând o reducere a distorsiunilor armonice. Astfel, metoda propusă de autorii Ahmed G. Abo-Khalil și Mohammad AlObaid [16] oferă o soluție unică și eficientă pentru îmbunătățirea performanței și stabilității sistemelor de energie eoliană bazate pe PMSG, prin abordarea integrată a optimizării extragerii puterii, îmbunătățirii calității curentului de ieșire și atenuării distorsiunilor tensiunii rețelei.

În studiu [11], propus de M. Mansour și colegii săi, este prezentat un sistem de generare a energiei eoliene cu viteza variabilă, bazat pe un generator sincron cu magneți permanenți (PMSG), asociat cu un sistem de stocare a energiei prin volantă, FESS (din engleză, Flywheel Energy Storage System). Sistemul utilizează control fuzzy pentru a îmbunătăți performanța de urmărire a curentilor din statorul generatorului. Controlul fuzzy este folosit pentru a atenua fluctuațiile și a asigura o reglare precisă a puterii injectate în rețea. Această abordare permite gestionarea eficientă a variațiilor rapide ale vântului și asigură o stabilitate îmbunătătită a sistemului energetic. Sistemul FESS este conectat la magistrala DC pentru a regla puterea furnizată rețelei, stocând excesul de energie generată atunci când producția depășește cererea și eliberând această energie în perioadele de deficit. Articolul [11] detaliază utilizarea a două controlere pentru reglarea curentilor din statorul PMSG: un controler PI simplu și un controler fuzzy-PI. Autorii au descoperit faptul că, controlerul fuzzy-PI oferă o performanță de urmărire superioară, reducând fluctuațiile curentilor și îmbunătățind răspunsul dinamic al sistemului. Acest lucru ajută la menținerea stabilității și eficienței sistemului în condiții variabile de viteza a vântului. Așadar, acest articol demonstrează că integrarea unui sistem de stocare a energiei prin volantă cu un generator eolian PMSG și utilizarea controlului fuzzy poate îmbunătăți semnificativ stabilitatea și eficiența sistemului, făcându-l mai rezistent la variațiile rapide ale vântului și capabil să furnizeze energie de înaltă calitate în rețea.

Articolul [17] descrie un sistem de control supervisor pentru o turbină eoliană cu viteza variabilă echipată cu un generator asincron cu dublă alimentare (DFIG). Controlul arhitectural al turbinei este împărțit în două niveluri: nivelul de supraveghere (sau supervisor) și nivelul de execuție. Nivelul de supraveghere este echipat cu un supervisor bazat pe evenimente, iar nivelul de execuție utilizează două tipuri de controlere propuse: controler fuzzy proportional-integral (PI) și controler liniar pătratic adaptiv discret (LQ). Supervisorul evaluatează starea operațională a turbinei eoliene cu viteza variabilă și trimite această stare nivelului de execuție. Controlurile operează în regiunea de sarcină maximă pentru a extrage energia la putere maximă din vânt, asigurând în același timp condițiile

de siguranță necesare pentru injectarea energiei în rețeaua electrică. Sistemul de inferență fuzzy constă în patru etape: fuzzificare, bază de cunoștințe, motor de inferență și defuzzificare. Descrierea variabilelor de intrare și ieșire bazată pe regulile IF-THEN este stocată în baza de cunoștințe. Controlerul liniar pătratic adaptiv discret gestionează variabilele neprevăzute, iar adaptarea depinde de estimarea parametrului  $\theta(k)$  cu metoda celor mai mici pătrate recursive (CMMPR). Simulările pentru studiile de caz din [17] sunt realizate în mediul Matlab/Simulink, iar rezultatele arată faptul că, controlerul fuzzy PI permite un răspuns mai lin în buclă închisă, dar cu variații mari ale unghiului de înclinare și comutări frecvente între regiunile de operare. În schimb, controlerul LQ prezintă un efort mai mare control și un răspuns oscilatoriu în buclă închisă, dar cu mai puține comutări între regiuni.

În concluzie, strategiile de control propuse în literatura de specialitate variază de la algoritmi MPPT și control predictiv, la control direct al cuplului și control fuzzy. Fiecare strategie are avantaje specifice, iar alegerea unei metode adecvate depinde de cerințele specifice ale sistemului de generare a energiei eoliene și de condițiile de operare ale acestuia. Utilizarea controlului avansat permite optimizarea performanței sistemelor de turbine eoliene și asigurarea unei producții constante și eficiente de energie electrică.

## 2.4. Integrarea Sistemelor de Stocare a Energiei

Integrarea sistemelor de stocare a energiei în sistemele turbinelor eoliene a devenit o variantă populară pentru asigurarea unei furnizări constante de energie și pentru stabilizarea rețelei electrice. Diverse tehnologii de stocare a energiei au fost explorate în literatura de specialitate, fiecare având avantaje și dezavantaje specifice.

### Baterii de Stocare

Bateriile sunt una dintre cele mai comune metode moderne de stocare a energiei electrice. În articolul [18], se prezintă modelarea și simularea unei celule de baterie Li-ion de ordinul întâi și ordinul doi, validată experimental. Autorii subliniază importanța modelării precise pentru a asigura performanțe optime ale bateriilor. Pe de altă parte, articolul [19] se concentrează pe simularea convertoarelor de putere. Acestea pot fi utilizate în turbinile eoliene pentru adaptarea energiei electrice generate de turbine la cerințele rețelei, stocând sau descarcând sistemul de baterii atașat. Simularea acestor convertoare permite optimizarea designului și îmbunătățirea performanței sistemului, asigurând o conversie eficientă și stabilă a energiei.

### Sisteme de Stocare pe Bază de Hidrogen

Sistemele de stocare pe bază de hidrogen oferă o soluție promițătoare pentru stocarea pe termen lung a energiei, deși tehnologia este încă în faza de dezvoltare. Conform articolului [15], integrarea hidrogenului cu turbinile PMSG poate reduce fluctuațiile de putere și poate asigura o producție constantă de energie. Aceste sisteme permit conversia hidrogenului în energie electrică prin procesul de electroliză, stocarea hidrogenului și re-conversia acestuia în energie electrică fiind realizată prin celule de combustie atunci când este necesar.

### Sisteme de Stocare cu Volantă (FESS)

Articolul [11] descrie utilizarea unui sistem de stocare a energiei prin volantă (FESS) asociat cu un generator PMSG pentru a stabiliza puterea livrată în rețea. Cum a fost deja menționat și la partea de control, FESS este utilizat pentru a controla tensiunea pe magistrala DC prin echilibrarea generării și consumului de putere, asigurând astfel o calitate bună a tensiunii și frecvenței injectate în rețea. Volantul oferă avantajul unui răspuns rapid și al unui ciclu de viață lung, fiind capabil să gestioneze fluctuațiile rapide

ale vântului. Autorii subliniază că, deși volantele pot stoca energie doar pentru perioade scurte de timp, acestea sunt suficiente pentru a compensa variațiile rapide și de scurtă durată ale generării de energie eoliană. Sistemele FESS sunt eficiente în aplicațiile unde fluctuațiile de vânt sunt frecvente și rapide, asigurând astfel o stabilitate îmbunătățită a sistemului energetic.

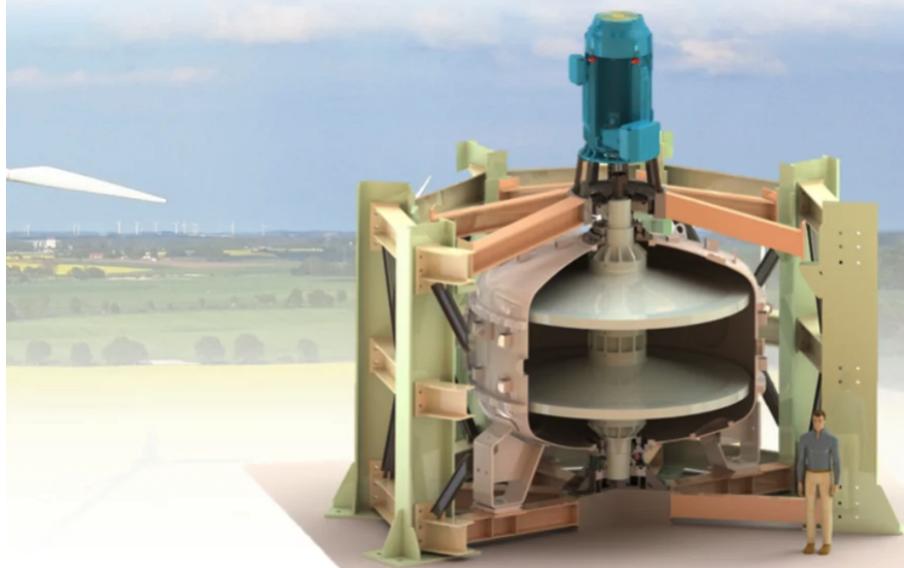


Figura 2.4: FESS proiectat pentru sisteme eoliene de catre Universitatea Tehnică din Dresda [20]

### **Managementul Energetic**

Managementul eficient al energiei în cadrul sistemelor de generare distribuită contribuie la reducerea costurilor și asigurarea stabilității sistemului. În studiu [21], se prezintă utilizarea metodelor de punct interior pentru optimizarea managementului energiei în sistemele regenerabile. Aceasta implică formularea problemei de management al energiei într-un cadru de programare liniară cu constrângeri de inegalitate. Utilizarea metodelor de punct interior permite o rezolvare eficientă a acestor probleme, asigurând stabilitatea și eficiența sistemelor pe termen lung.

În concluzie, integrarea sistemelor de stocare a energiei, fie că este vorba de baterii, sisteme pe bază de hidrogen sau volante, asigură stabilitatea și eficiența turbinelor eoliene. Fiecare tehnologie de stocare are avantaje și dezavantaje specifice, iar alegerea unei soluții adecvate depinde de cerințele aplicației și de condițiile de operare. Modelarea și simularea precisă a acestor sisteme contribuie la optimizarea performanței și fiabilității generale a sistemelor eoliene.

## Capitolul 3. Analiză și Proiectare

În acest capitol se vor detalia fundamentele teoretice și metodele utilizate pentru modelarea matematică și proiectarea componentelor sistemului eolian. Astfel, se vor analiza principiile fizice și matematice care stau la baza funcționării turbinelor eoliene, a generatorului PMSG, a convertoarelor de putere și a sistemului de stocare cu baterii. Se vor explora, de asemenea, interacțiunile dintre componente mecanice și electrice ale sistemului pentru a înțelege modul în care energia cinetică a vântului este transformată în energie electrică.

Analiza se va realiza pentru fiecare componentă în parte, urmând ca pentru proiectarea lor să fie specificate alegerile făcute pe baza informațiilor acumulate din studiu bibliografic.

### 3.1. Principiile și Forțele Aerodinamice care acționează asupra Turbinelor Eoliene

Eficiența turbinelor eoliene depinde de principiile aerodinamice care guvernează interacțiunea dintre pale și vânt. Forțele principale care acționează asupra palelor ale unei turbine eoliene sunt portanța și rezistența aerodinamică.

**Portanța (engl., *Lift Force*)** este forța generată perpendicular pe direcția vântului, care permite palelor să se rotească. Această forță este produsă de diferențele de presiune create pe suprafețele opuse ale palei, datorită formei aerodinamice.

**Rezistența aerodinamică (engl., *Drag Force*)** este forța generată în direcția vântului, care tinde să oprească mișcarea palelor. Această forță trebuie minimizată sau maximizată pentru a crește, respectiv descrește eficiența turbinei eoliene.

**Ecuatiile fundamentale ale energiei eoliene:** Energia eoliană poate fi exprimată prin ecuații cinetice:

$$E_C = \frac{1}{2}mv^2, \quad (3.1)$$

unde  $m$  este masa aerului care trece prin aria rotorului și  $v$  este viteza vântului.

Masa fluxului de aer prin discul rotorului de aria  $A$  este data de:

$$\frac{dm}{dt} = \rho Av, \quad (3.2)$$

unde  $\rho$  este densitatea aerului,  $A$  este aria rotorului și  $v$  este viteza vântului.

Astfel, din ecuațiile [3.1] și [3.2] rezultă puterea disponibilă:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3. \quad (3.3)$$

În cazul unei turbine eoliene, puterea mecanică  $P_{mech}$  extrasă din vânt este dată de:

$$P_{mech} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda, \beta), \quad (3.4)$$

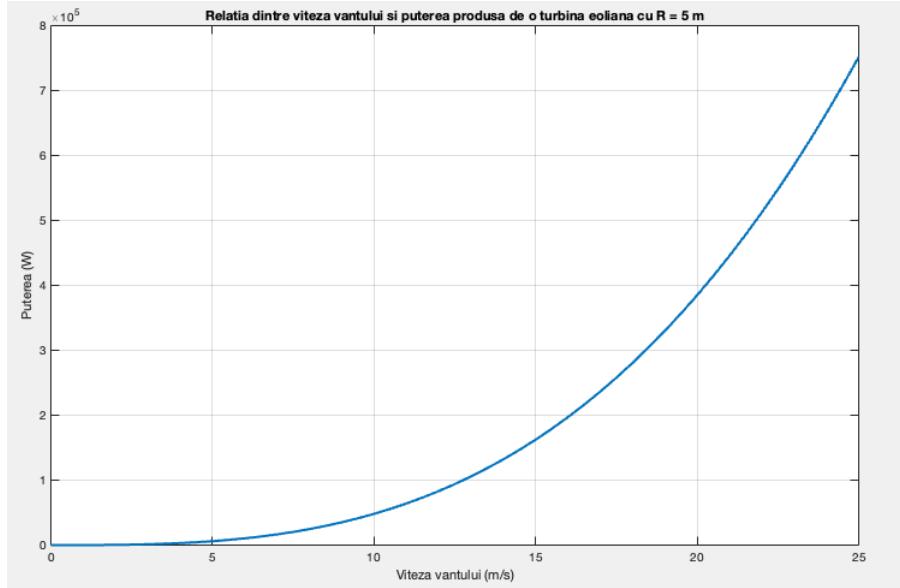


Figura 3.1: Creșterea  $P_{wind}$  în raport cu viteza vântului  $v$

unde:  $C_P$  este coeficientul de putere al turbinei, care depinde de raportul de viteză la vârful palelor,  $\lambda$ , și de unghiul de înclinare,  $\beta$ .

Coeficientul de putere  $C_P$  nu poate să depășească limita impusă de către Albert Betz în anul 1919, adică nicio turbină eoliană nu poate capta mai mult de 59.3% din energia cinetică a vântului.

### Explicația Limitei Betz

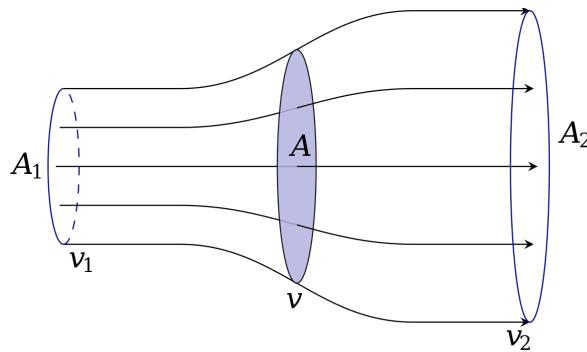


Figura 3.2: Fluxul de aer care străbate o turbină eoliană

#### 1. Definirea Coeficienților de Putere și de Tracțiune

Coeficientul de putere ( $C_P$ ) și coeficientul de tracțiune ( $C_T$ ) sunt definiți [22] în funcție de factorul de inducție axială ( $a$ ):

$$C_T = 4a(1 - a), \quad (3.5)$$

$$C_P = 4a(1 - a)^2. \quad (3.6)$$

#### 2. Determinarea Condiției pentru Puterea Maximă

Pentru a găsi condiția determinării puterii maxime, se derivează ecuația 3.6 [22]

în funcție de  $a$  și îl egalăm cu zero:

$$\frac{\partial C_P}{\partial a} = 0 \Rightarrow \frac{\partial}{\partial a} [4a(1-a)^2] = 0 \quad (3.7)$$

Derivând și simplificând ecuația, obținem:

$$4(1-a)^2 - 8a(1-a) = 0 \Rightarrow 1 - a - 2a = 0 \Rightarrow 3a = 1 \Rightarrow a = \frac{1}{3} \quad (3.8)$$

Factorul  $a = \frac{1}{3}$  reprezintă punctul în care turbina eoliană extrage puterea maximă din vânt. Aceasta este cunoscut sub numele de factor de inducție axială și descrie modul în care viteza vântului este redusă de rotorul turbinei. Atunci când vântul trece prin rotor, viteza sa este redusă, iar energia cinetică este transferată turbinei. 3.2

### 3. Calcularea Coeficientului de Putere Maximă

Înlocuind  $a = \frac{1}{3}$  în ecuația 3.6 pentru  $C_P$ , obținem:

$$C_{P,\max} = 4 \left(\frac{1}{3}\right) \left(1 - \frac{1}{3}\right)^2 = 4 \left(\frac{1}{3}\right) \left(\frac{2}{3}\right)^2 = 4 \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{4}{9} = \frac{16}{27} \approx 0.593 \quad (3.9)$$

Astfel,  $C_{P,\max} = 0.593$ , adică 59.3%.

Cu toate acestea, în practică,  $C_P$  nu va atinge niciodată valoarea teoretică maximă. Astfel, în funcție de parametrii de proiectare a turbinei,  $C_P$  se definește după cum urmează:

$$C_P(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3\beta - c_4\right) \exp\left(\frac{c_5}{\lambda_i}\right) + c_6\beta, \quad (3.10)$$

iar  $\lambda_i$  este definită ca:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}, \quad (3.11)$$

unde  $\beta$  este unghiul de înclinare al palelor turbinei,  $\lambda$  este raportul de viteza la vârf și  $c_1, \dots, c_6$  sunt coeficienți determinați prin metode de regresie sau alte metode empirice.

Raportul de viteza la vârf (engl. *Tip Speed Ratio* - TSR) este definit ca raportul dintre viteza la vârful palei rotorului și viteza vântului. Formula este:

$$\lambda = \frac{R\omega_r}{v}, \quad (3.12)$$

unde: unde  $R$  este raza rotorului,  $\omega_r$  este viteza unghiulară a rotorului și  $v$  este viteza vântului.

Un TSR optim este esențial pentru maximizarea eficienței turbinei. Dacă  $\lambda$  este prea mic, palele nu capturează eficient energia din vânt. Dacă  $\lambda$  este prea mare, rezistența aerodinamică crește, reducând eficiența turbinei.

Unghiul de înclinare ( $\beta$ , sau în engleză Pitch Angle) se referă la unghiul la care sunt setate palele rotorului în raport cu planul rotorului. Controlul activ al unghiului de înclinare permite ajustarea puterii generate de turbină pentru a se adapta la condițiile variabile ale vântului.

Formula generală pentru ajustarea unghiului de înclinare este dată de:

$$C_P(\lambda, \beta) = f(\lambda, \beta), \quad (3.13)$$

unde  $C_P$  este coeficientul de putere care depinde de raportul de viteză la vârf și unghiul de înclinare. Prin modificarea  $\beta$ , se poate optimiza  $C_P$  pentru diferite viteze ale vântului.

Controlul unghiului de înclinare joacă un rol important în protecția turbinei împotriva vânturilor excesive și pentru optimizarea performanței în condiții de vânt variabil.

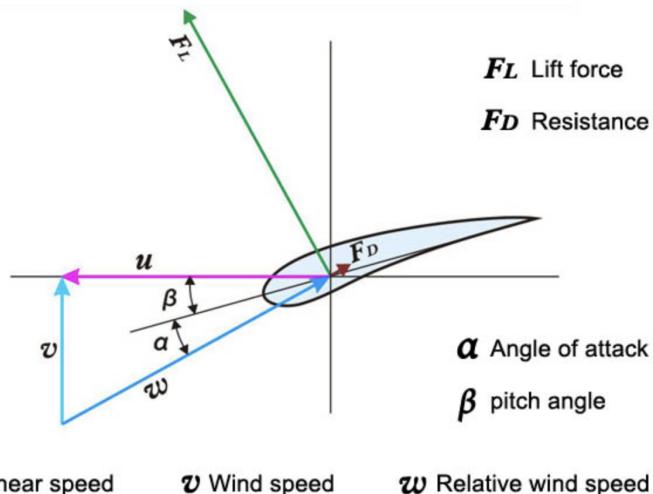


Figura 3.3: Forțele aerodinamice care actionează asupra palelor turbinei eoliene

În figura 3.3 sunt reprezentate forțele de portanță ( $F_L$ ) și rezistență aerodinamică ( $F_D$ ). De asemenea, este ilustrat triunghiul vitezelor, format din vectorii  $v$  (viteza vântului),  $w$  (viteza relativă/indusă a vântului) și  $u$  (viteza unghiulară), dar și unghiul de înclinare ( $\beta$ ) și unghiul de atac ( $\alpha$ ).

### 3.2. Ecuatiile Fundamentale ale Generatorului PMSG

Generatorul sincron cu magneti permanenti (PMSG) este o componenta cheie in conversia energiei mecanice in energie electrica in sistemele eoliene. PMSG-urile sunt preferate pentru aplicatiile eoliene datorita eficienței lor ridicate, lipsei pierderilor de excitație și designului compact. Funcționarea unui PMSG este guvernată de două seturi principale de ecuații: ecuațiile electrice, care descriu comportamentul curenților și tensiunilor în stator, și ecuațiile mecanice, care descriu interacțiunea dintre cuplul generatorului și miscarea rotorului.

Ecuatiile fundamentale care descriu comportamentul electric al unui generator PMSG sunt:

$$\begin{cases} V_S = R_S I_S + \frac{d\psi_S}{dt} \\ \psi_S = L_S I_S + \psi_m \end{cases}, \quad (3.14)$$

unde  $V_S$  este tensiunea din stator,  $I_S$  este curentul din stator,  $R_S$  este rezistența statorului,  $\psi_S$  este fluxul magnetic în stator,  $L_S$  este inductanța statorului și  $\psi_m$  este fluxul magnetic produs de magnetii permanenti.

Cuplul electromagnetic produs de generatorul PMSG este dat de relația:

$$T_e = \frac{3}{2}p(\psi_d I_q - \psi_q I_d), \quad (3.15)$$

unde  $p$  este numărul de perechi de poli,  $\psi_d$  și  $\psi_q$  sunt componentele fluxului magnetic în sistemul de coordonate d-q, și  $I_d$  și  $I_q$  sunt curenții în sistemul d-q.

Pentru a facilita analiza și controlul generatoarelor sincrone, sunt utilizate transformările Clarke și Park. Aceste transformări permit conversia curenților și tensiunilor statorice dintr-un sistem de coordonate trifazat într-un sistem de coordonate ortogonal, denumit sistemul dq0. Această conversie simplifică ecuațiile mașinii și permite o analiză și control mai eficient.

Într-un sistem trifazat, tensiunile statorice sunt date de:

$$\begin{cases} V_A = V_m \sin(\omega t) \\ V_B = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_C = V_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases}, \quad (3.16)$$

unde  $V_A$  este tensiunea fazei A,  $V_B$  este tensiunea fazei B și  $V_C$  este tensiunea fazei C.

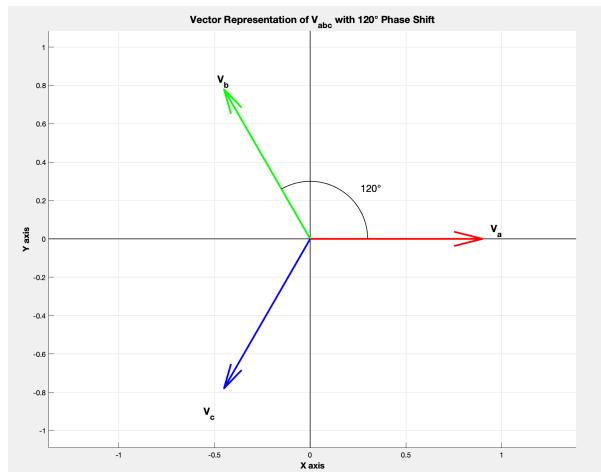


Figura 3.4: Reprezentarea vectorială a tensiunilor trifazate  $V_{ABC}$

### Transformările Clarke și Park

Transformarea Clarke convertește sistemul de coordonate abc în sistemul de coordonate  $\alpha\beta$ . Aceasta este definită ca:

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Totodată se poate defini și inversa ecuației 3.17:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

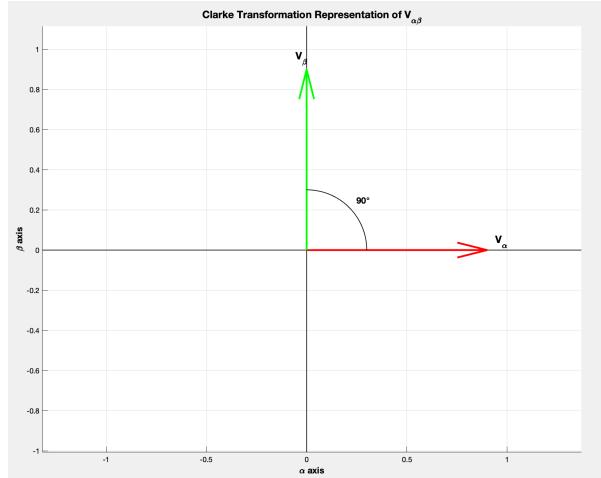


Figura 3.5: Reprezentarea vectorială a tensiunilor în urma transformării Clarke [3.17]

Transformarea Park convertește sistemul de coordonate  $\alpha\beta$  în sistemul final de coordonate  $dq$ . Aceasta este definită ca:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Asemenea transformației Clarke, și transformata Park [3.19] este reversibilă:

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

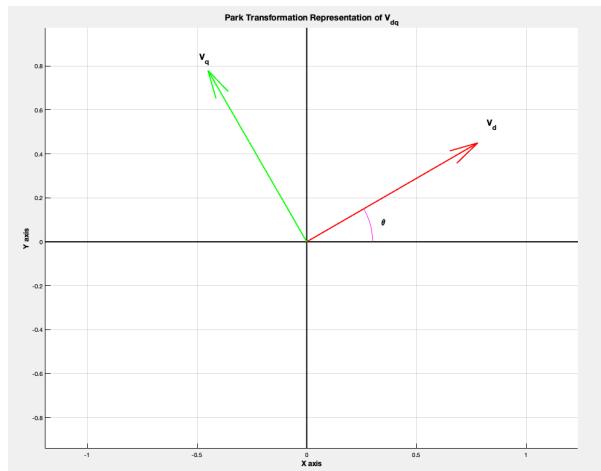


Figura 3.6: Reprezentarea vectorială a tensiunilor în urma transformării Park [3.19]

Astfel, folosind transformările Clarke-Park [3.17] [3.19], ecuațiile părții electrice ale generatorului PMSG se pot scrie astfel:

$$\begin{cases} V_d = R_S i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \\ V_q = R_S i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - \omega_e L_d i_d + \omega_e K_e \\ T_e = \frac{3}{2} p ((L_d - L_q) i_d i_q - K_e i_q) \\ \omega_e = p \omega_r \end{cases}, \quad (3.21)$$

unde  $V_d$  este componenta d a tensiunii statorului în sistemul de coordonate d-q,  $V_q$  este componenta q a tensiunii statorului în sistemul de coordonate d-q,  $i_d$  este componenta d a curentului statorului în sistemul de coordonate d-q,  $i_q$  este componenta q a curentului statorului în sistemul de coordonate d-q,  $R_s$  este rezistența statorului,  $L_d$  este inductanța pe axa directă d,  $L_q$  este inductanța pe axa de cuadratură q,  $\omega_e$  este viteza unghiulară electrică,  $K_e$  este constanta de turație a fluxului magnetic produs de magnetii permanenti,  $T_e$  este cuplul electromagnetic produs de generator,  $p$  este numărul de perechi de poli și  $\omega_r$  este viteza unghiulară mecanică a rotorului.

Mai mult, în controlul FOC (Field Oriented Control), curentii  $i_d$  și  $i_q$  sunt elementele independente care influențează comportamentul generatorului. Astfel, curentul  $i_d$  controlează fluxul magentic al rotorului, fiind elementul de magnetizare a rotorului, iar curentul  $i_q$  controlează comanda cuplului, fiind elementul generator de cuplu.

Partea mecanică a generatorului, care face legatura între elementele mecanice ale rotorului turbinei eoliene și elementele care generează energie electrică, cuprinde ecuațiile:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_{m1} - T_f - F\omega_m, \quad (3.22)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_m, \quad (3.23)$$

unde  $J$  este momentul de inerție al rotorului,  $\omega_m$  este viteza unghiulară mecanică a rotorului,  $T_e$  este cuplul electromagnetic produs de generator,  $T_{m1}$  este cuplul mecanic aplicat rotorului,  $T_f$  este cuplul frecărilor statice,  $F$  este coeficientul de frecare vâscoasă și  $\theta$  este deplasarea unghiulară a axului generatorului.

În aplicațiile mai actuale ale turbinelor eoliene, mai ales ale turbinelor cu amplasare offshore (în larg), nu se mai folosesc cutii de viteze care atenuează cuplul și măresc viteza de rotație a rotorului turbinei eoliene. Motivele sunt numeroase și au fost explicate pe larg în partea de studiu bibliografic. Cu toate acestea, turbinele mai mici, pot beneficia de pe urma unei astfel de cutii de transfer. Așadar, ecuațiilor părții mecanice li se mai poate atașa următoarea relație de transfer:

$$\frac{T_m}{T_{m1}} = \frac{\omega_e}{\omega_m} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (3.24)$$

unde  $T_m$  este cuplul mecanic produs de turbina eoliană,  $T_{m1}$  este cuplul mecanic produs de cutia de transfer,  $\omega_r$  este viteza unghiulară a rotorului turbinei,  $\omega_m$  este viteza unghiulară a rotorului generatorului și  $n_1, n_2$  sunt rapoartele de transmisie a cutiei de transfer.

### 3.3. Redresorul de Tensiune AC-DC

Redresorul de tensiune este un circuit electronic care convertește curentul alternativ (AC) în curent continuu (DC). Aceasta este o componentă a sistemelor eoliene care asigură compatibilitatea cu convertoarele DC-DC și sistemele de stocare a energiei. În cadrul sistemelor eoliene este necesară și o punte de legătură DC (DC-Link) pentru a separa circuitul părții eoliene de circuitul rețelei. În cele mai multe cazuri, redresorul utilizat este de tip punte (bridge rectifier).

$$V_{DC} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{ACrms}, \quad (3.25)$$

unde  $V_{DC}$  este tensiunea de ieșire a redresorului și  $V_{AC_{rms}}$  este tensiunea efectivă a sursei AC.

Un redresor de tip puncte este format din patru diode dispuse astfel încât să permită trecerea curentului într-o singură direcție, asigurând astfel o tensiune DC la ieșire.

În cazul circuitelor trifazate din circuitele eoliene, redresorul este format din 6 diode dispuse în aceeași configurație puncte. Tensiunea de ieșire a unui astfel de redresor este dată de:

$$V_{DC} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL_{rms}}, \quad (3.26)$$

unde  $V_{DC}$  este tensiunea de ieșire a redresorului și  $V_{LL_{rms}}$  este tensiunea efectivă de linie-la-linie a sursei AC.

Un redresor trifazat oferă o tensiune DC cu mai puține fluctuații (ripple) comparațiv cu un redresor monofazat și este mai potrivit pentru aplicații de putere mare, cum sunt cele din sistemele eoliene.

### 3.4. Convertoarele Buck și Boost

Pentru proiectarea sistemelor de stocare de energie în cadrul sistemului eolian prezentat în lucrare, tensiunea legăturii DC a sistemului trebuie ridicată sau coborâtă în funcție de tipul și natura sistemului de stocare. Spre exemplu, în cazul stocării bazate pe baterii, acestea pot fi construite pe arhitecturi de diferite tensiuni: 24 V, 48 V, 400 V sau chiar 800 V.

#### 3.4.1. Convertorul Buck

Convertorul Buck este un tip de convertor DC-DC care reduce/coboară tensiunea de intrare la o valoare mai mică la ieșire. Aceasta funcționează în două regimuri principale: regim de conductie continuă (CCM) și regim de conductie discontinuă (DCM).

În regimul de conductie continuă (CCM), curentul prin bobina de inducție nu ajunge la zero în timpul ciclului de comutare. Ecuațiile fundamentale ale convertorului Buck în CCM sunt:

$$V_{out} = D \cdot V_{in}, \quad (3.27)$$

$$I_{out} = \frac{I_{in}}{D}, \quad (3.28)$$

unde  $V_{out}$  este tensiunea de ieșire,  $V_{in}$  este tensiunea de intrare,  $I_{out}$  este curentul de ieșire,  $I_{in}$  este curentul de intrare și  $D$  este factorul de duty cycle.

În regimul de conductie discontinuă (DCM), curentul prin bobina de inducție ajunge la zero în timpul ciclului de comutare. În acest regim, ecuațiile devin mai complexe și depind de parametrii circuitului și de timpul de comutare.

#### 3.4.2. Convertorul Boost

Convertorul Boost este un tip de convertor DC-DC care mărește/ridică tensiunea de intrare la o valoare mai mare la ieșire. Aceasta funcționează, de asemenea, în două regimuri principale: regim de conductie continuă (CCM) și regim de conductie discontinuă (DCM).

În regimul de conduction continuă (CCM), curentul prin bobină nu ajunge la zero în timpul ciclului de comutare. Ecuațiile fundamentale ale convertorului Boost în CCM sunt:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - D}, \quad (3.29)$$

$$I_{out} = I_{in}(1 - D), \quad (3.30)$$

unde  $V_{out}$  este tensiunea de ieșire,  $V_{in}$  este tensiunea de intrare,  $I_{out}$  este curentul de ieșire,  $I_{in}$  este curentul de intrare și  $D$  este factorul de duty cycle.

În regimul de conduction discontinuă (DCM), curentul prin bobină ajunge la zero în timpul ciclului de comutare. În acest regim, asemenea convertorului Buck, ecuațiile devin mai complexe și depind de parametrii circuitului și de timpul de comutare.

### 3.5. Invertorul de Tensiune DC-AC

Invertoarele sunt dispozitive electronice care convertesc curentul continuu (DC) în curent alternativ (AC). Acestea se regăsesc în sistemele de energie regenerabilă pentru a alimenta sarcini AC sau pentru a injecta energie în rețea electrică. Invertorul, împreună cu redresorul de tensiune, formează legătura DC a sistemului. Există două tipuri principale de invertoare: monofazate și trifazate.

#### 3.5.1. Invertoarele Monofazate

Invertoarele monofazate sunt utilizate în aplicații de putere mică până la medie, cum ar fi sistemele fotovoltaice rezidențiale și miciile sisteme eoliene. Acestea convertesc DC în AC la o singură fază și sunt relativ simple în construcție și control.

$$v_{AC}(t) = V_{peak} \sin(\omega t), \quad (3.31)$$

unde  $v_{AC}(t)$  este tensiunea de ieșire AC în funcție de timp,  $V_{peak}$  este valoarea de vârf a tensiunii AC și  $\omega$  este frecvența unghiulară a semnalului AC ( $\omega = 2\pi f$ ).

#### 3.5.2. Invertoarele Trifazate

Invertoarele trifazate sunt utilizate în aplicații de putere mare, cum ar fi parcurile eoliene și centralele solare comerciale. Acestea convertesc DC în AC trifazat, oferind o eficiență mai mare și o compatibilitate mai bună cu rețelele electrice industriale și comerciale. Invertoarele trifazate sunt mai complexe decât cele monofazate, necesitând tehnici avansate de control pentru a gestiona corect cele trei faze.

Formulele pentru tensiunile de ieșire ale unui invertor trifazat ideal este:

$$\begin{cases} v_a(t) = V_{peak} \sin(\omega t) \\ v_b(t) = V_{peak} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_c(t) = V_{peak} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases}, \quad (3.32)$$

unde  $v_a(t)$ ,  $v_b(t)$ ,  $v_c(t)$  sunt tensiunile de ieșire AC pentru fiecare fază în funcție de timp,  $V_{peak}$  este valoarea de vârf a tensiunii AC pentru fiecare fază și  $\omega$  este frecvența unghiulară a semnalului AC ( $\omega = 2\pi f$ ).

Pentru controlul tensiunii și frecvenței de ieșire, invertoarele moderne folosesc tehnici de modulare a lățimii pulsului (PWM, Pulse Width Modulation). Această metodă

permite ajustarea precisă a formei de undă și a parametrilor de ieșire, îmbunătățind performanța și eficiența sistemului.

### 3.6. Sisteme de Stocare a Energiei - Baterii

Bateriile sunt componente pentru stocarea energiei în sistemele eoliene, care permit utilizarea energiei produse în perioadele de vânt slab, vânt prea puternic sau absența acestuia. Principalele caracteristici ale bateriilor includ capacitatea, tensiunea nominală, ciclurile de încărcare/descărcare și eficiența energetică.

Ecuatia fundamentală pentru energia stocată într-o baterie este:

$$E = V_{nom} \cdot Q, \quad (3.33)$$

unde  $E$  este energia stocată,  $V_{nom}$  este tensiunea nominală a bateriei și  $Q$  este capacitatea bateriei (în Ah).

Tipurile comune de baterii utilizate în aplicațiile eoliene includ bateriile cu plumb-acid, bateriile Li-ion și bateriile NiMH, fiecare având avantaje și dezavantaje specifice în funcție de aplicație și condițiile de operare.

### 3.7. Proiectarea Subcomponentelor

Sistemul eolian propus în lucrare este proiectat din mai multe subcomponente: Partea mecanică a turbinei eoliene, Generatorul Sincron cu Magnetă Permanenți, Invertorul PWM al PMSG, Redresorul de Tensiune AC-DC, Legătura DC (DC-Link) a sistemului, Convertorul Buck, Convertorul Boost, Sistemul de Stocare pe Baterii [3.7].

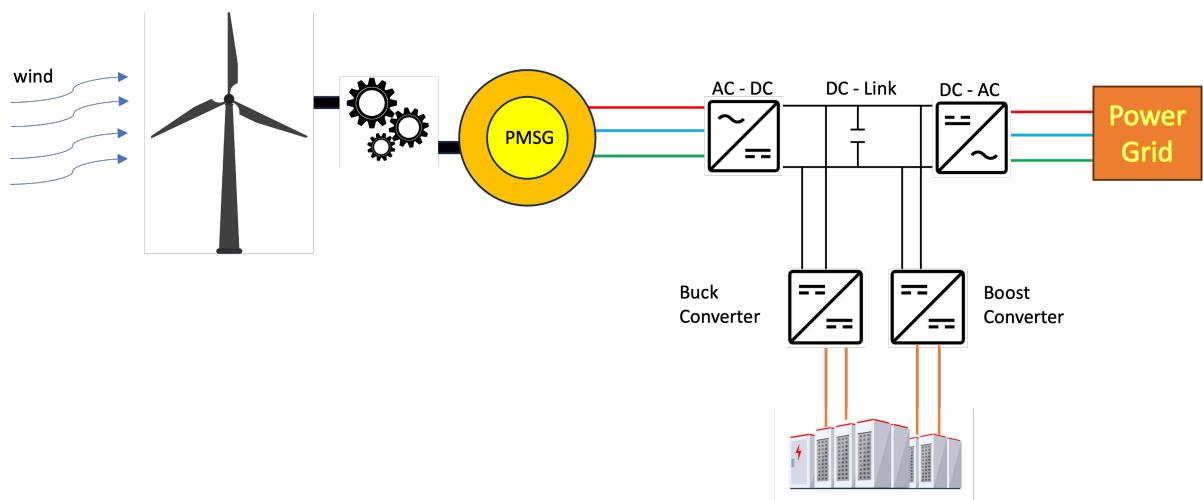


Figura 3.7: Schema bloc a sistemului eolian cu stocare de energie

Controlul turbinei eoliene va consta în proiectarea unui sistem MPPT (Maximum Power Point Tracking), care urmărește să maximizeze coeficientul de putere extrasă din viteza vântului. Utilizând algoritmul MPPT, se va realiza un control pe curentii statorului generatorului PMSG. Un alt tip de control prezentat în sistem este asupra convertorului Buck, iar la nivel de sistem, un control supervisor se va ocupa de logica de funcționare.

### 3.7.1. Proiectarea Părții Mecanice a Turbinei

Pentru proiectarea mecanică a turbinei se vor utiliza formulele [3.4], [3.10], [3.11], [3.12] și [3.13]. Pe lângă aceste relații, se mai adaugă și:

$$T_{mech} = \frac{P_{mech}}{\omega_r}, \quad (3.34)$$

unde  $T_{mech}$  este cuprul mecanic produs de rotorul eolienei,  $P_{mech}$  este puterea mecanică produsă de rotorul eolienei și  $\omega_r$  este viteza unghiulară a rotorului eolienei.

Coeficienții  $c_1 \dots c_6$  ai ecuației [3.10], cât și valorile celorlalți parametrii ai turbinei eoliene au fost selectați pe baza unei combinații de studii teoretice și date experimentale disponibile în literatură. Scopul este de a oferi un model cât mai precis pentru  $C_P$  care să poată fi utilizat în simulările și analizele ulterioare.

Pentru alegerea unui  $\lambda_{optimal}$  (TSR optim) [3.12], s-au scris ecuațiile [3.10] și [3.11] utilizând mediul de dezvoltare Matlab pentru a projecța o figură care să ilustreze evoluția  $C_P$  în funcție de  $\lambda$  și  $\beta$  (unghiul de înclinare al palelor). Mai mult, pe lângă raportul de viteză la vârf, se poate determina și valoarea maximă a coeficientului de putere pe care îl poate obține turbina eoliană proiectată matematic utilizând coeficienții amintiți mai sus.

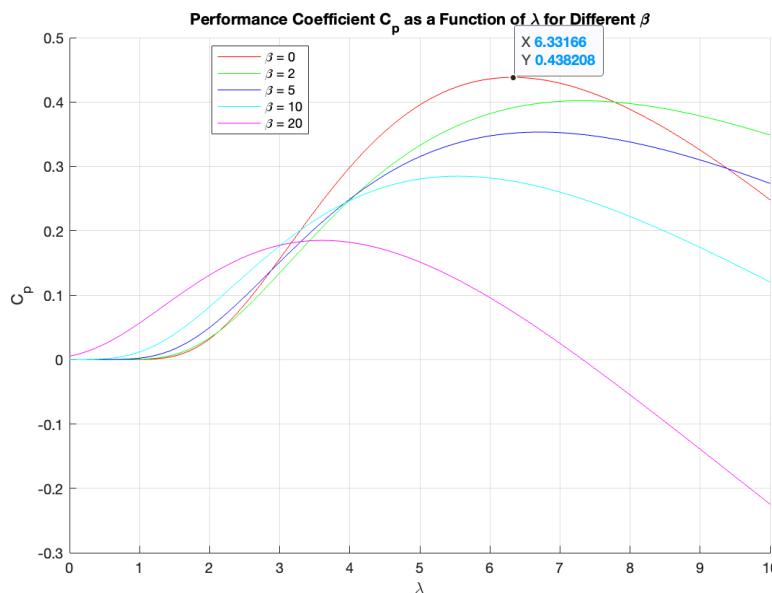


Figura 3.8: Evoluția factorului de putere  $C_P$  în funcție de TSR pentru diferite  $\angle\beta$

În figura [3.8] se pot observa diferențele curbe ale coeficientului de performanță  $C_P$  pentru variația unghiului  $\beta$ . Tot din figură se pot extrage, unghiul  $\beta$  pentru care obținem  $C_P$  maxim, dar și  $\lambda_{optimal}$ . Aceste valori sunt:  $\beta = 0$ ,  $C_{P,max} = 43.8\%$  și  $\lambda_{optimal} = 6.33$ .

Pentru a se calcula viteza unghiulară a rotorului  $\omega_{r,opt}$  în funcție de TSR optim se poate utiliza relația [3.12], însă trebuie să fie cunoscută și viteza optimă a vântului, astfel încât să fie menținut coeficientul de putere  $C_{P,max}$  impus.

Din figura [3.9] se pot extrage următoarele concluzii: Pentru a obține coeficientul de putere impus anterior, la o viteza a vântului de 12 m/s se va obține o viteza a rotorului turbinei de 15 rad/s. Dacă se verifică această afirmație utilizând formula [3.12], va rezulta o viteza unghiulară a rotorului turbinei de 15.19 rad/s pentru  $\lambda_{optimal} = 6.33$ . Astfel,

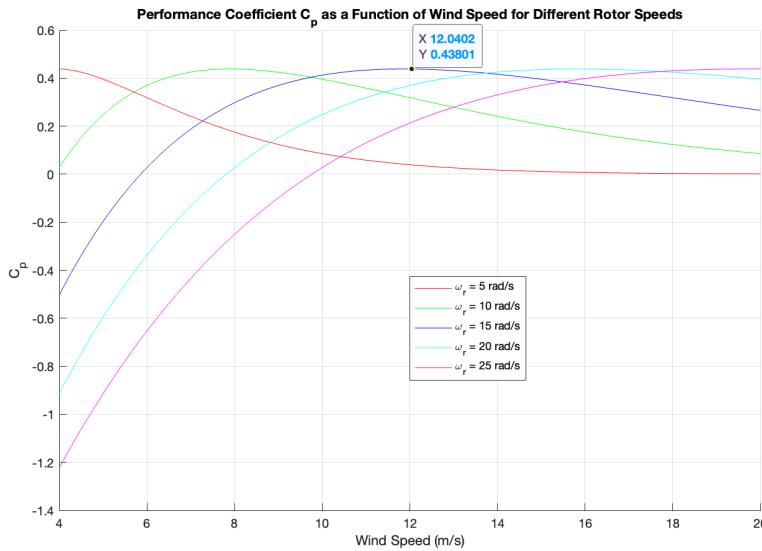


Figura 3.9: Evoluția factorului de putere  $C_P$  în funcție de vânt pentru diferite  $\omega_r$

Pentru a fi proiectat mai departe sistemul, se alege un punct optim de funcționare al turbinei eoliene la o viteza a vântului  $v_{wind} = 12 \text{ m/s}$  și o viteza unghiulară a rotorului  $\omega_r = 15.19 \text{ rad/s}$ . Cunoscând toți parametrii calculați anterior, se pot determina puterea mecanică  $P_{mech}$  [3.4], cât și cuplul mecanic  $T_{mech}$  [3.34] generate de către turbina eoliană. Ca și rezultate, se definește tabelul parametriilor [3.1]:

Parametru	Valoare
$\rho$ (Densitatea aerului) [ $\text{kg/m}^3$ ]	1.225
$R$ (Raza palelor) [m]	5
$A$ (Aria palelor turbinei) [ $\text{m}^2$ ]	$\pi \times R^2$
$c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$	0.22, 116, 0.4, 0, 5, 12.5
$\beta$ (Unghiul de înclinare)	0
$\lambda_{opt}$ (TSR)	6.33
$C_{P,\max} [\%]$	43.82
$P_{mech}$ (Puterea mecanică) [kW]	36.42
$T_{mech}$ (Cuplul mecanic) [Nm]	2397
$\omega_r$ (Viteza unghiulară a rotorului) [rad/s]	15.19

Tabela 3.1: Parametrii turbinei eoliene

### 3.7.2. Proiectarea Generatorului Sincron cu Magneți Permanenți (PMSG)

Pentru proiectarea generatorului PMSG, s-a ales un generator de mici dimensiuni, cu 4 perechi de poli, care va fi cuplat la rotorul turbinei eoliene printr-o cutie de transfer de cuplu cu raportul 15/1000, pentru a mări turată și pentru a scădea cuplul rotorului care învârté generatorul.

Valorile parametriilor din [3.2] vor fi utilizate în relațiile generatorului descrise anterior [3.21], [3.22], [3.23], [3.24]. Însă, pentru modelarea procesului, ecuațiile [3.22] și [3.21] trebuie rescrise pentru a evidenția părțile diferențiale.

Parametru	Valoare
$R_s$ (Rezistența statorului) [ohm]	2.875
$L_d$ (Inductanța pe axa d) [mH]	1.53
$L_q$ (Inductanța pe axa q) [mH]	1.53
$K_e$ (Fluxul magnetului permanent) [Wb]	0.175
$p$ (Perechi de poli)	4
$J$ (Momentul de inerție) [Nm <sup>2</sup> ]	$0.8 \times 10^{-3}$
$F$ (Frecare vâscoasă) [Nm/s]	$10^{-3}$
$T_f$ (Cuplul frecărilor statice) [Nm]	0
$n_1$	15
$n_2$	1000

Tabela 3.2: Parametrii generatorului sincron cu magneti permanenti (PMSG)

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{V_d - R_S i_d + \omega_e L_q i_q}{L_d} \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{V_q - R_S i_q - \omega_e L_d i_d - \omega_e K_e}{L_q} \\ T_e = \frac{3}{2} p ((L_d - L_q) i_d i_q - K_e i_q) \\ \omega_e = p \omega_r \end{cases} \quad (3.35)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{T_e - T_{m1} - T_f - F\omega_m}{J} \quad (3.36)$$

Se observă faptul că în ecuațiile 3.35 și 3.36 au fost folosite transformările Clarke-Park 3.17|3.19 pentru a transforma atât tensiunile cât și curenții în sistemul de coordonate dq0. Subsistemul generatorului PMSG are ca intrări tensiunile trifazate  $V_{abc}$  și cuplul rotorului eolienei 3.34|3.24 trecut prin cutia de transfer de cuplu, iar ca și output se pot vizualiza diferite semnale ale procesului, de la curenții și tensiunile trifazate generate, până la vitezele unghiulare, poziția lui theta și puterea. Pentru ca generatorul să fie mereu legat de modelul mecanic al turbinei, viteza unghiulară a rotorului generatorului este transmisă înapoi modelului turbinei pentru a actualiza valoarea cuplului. Pentru a fi realizată partea de control a generatorului, vor fi manipulați curenții de pe stator, astfel că aceștia vor produce de fapt tensiunile trifazate de referință pentru PMSG-ului.

Generatorul produce o putere activă de aproximativ 4200 W la funcționarea turbinei eoliene în condiții optime de vânt. De asemenea, acestor tipuri de generatoare le este specifică o frecvență de 40-50 Hz la o tensiune de 120 V și curent de 35 A. Pentru calculul elementelor din subsistem se folosesc curenții și tensiunile în sistem dq0, iar pe intrări și ieșiri se pot observa aceleasi semnale în sistem trifazat abc.

### 3.7.3. Proiectarea Invertorului PWM

Invertorul PWM transformă diferența de curenți  $I_{abc,\text{ref}}$  și  $I_{abc,\text{PMSG}}$  în intrarea de tensiune trifazată de referință a generatorului PMSG, amintită anterior. Semnalul de eroare rezultat din diferența curenților este procesat printr-un relee care simulează comportamentul diodelor generând un semnal PWM de tensiune  $V_{abc,\text{ref}}$ . Semnalul PWM obținut are o frecvență și un factor de umplere variabil, care modelează deschiderea și închiderea tranzistorilor din invertor, modulând tensiunea de ieșire. Tensiunea de

ieșire  $V_{abc,\text{ref}}$  este aplicată statorului din generatorul PMSG pentru a asigura funcționarea optimă.

Cu toate acestea, semnalul modulat trebuie normalizat și scalat pentru a obține o tensiune apropiată de cea de 220 V. Pentru un control precis al curentului, releu comută în momentul în care eroarea este de  $\pm 0.05$ . Valoarea de ieșire a releului, simulând comutarea rapidă, este setată la  $\pm 155$  V amplitudine pentru semnalul PWM. Într-un sistem trifazat, valoarea vârfului tensiunii vârfului tensiunii de fază pentru un sistem cu o tensiune efectivă de 220 V este aproximativ 311 V. Utilizând valoarea de 155 V, se asigură că tensiunea de linie este la un nivel corespunzător pentru a atinge această valoare de vârf:

$$V_{\text{peak}} = \sqrt{2} \times 220 \approx 311 \text{ V}$$

Tensiunea pe o fază este apoi scalată conform formulei:

$$V_{a_{\text{ref}}} = \frac{2V_a - V_b - V_c}{3}$$

Aceasta este o formă de mediere a tensiunilor pentru a obține un echilibru între faze. Formula poate fi interpretată și în termeni de tensiuni de linie:

$$V_{a_{\text{ref}}} = \frac{V_{ab} - V_{ca}}{3}$$

unde  $V_{ab} = V_a - V_b$  și  $V_{ca} = V_c - V_a$ .

Formula similară se aplică pentru celelalte faze:

$$V_{b_{\text{ref}}} = \frac{2V_b - V_a - V_c}{3}$$

$$V_{c_{\text{ref}}} = \frac{2V_c - V_b - V_a}{3}$$

În urma scalării și utilizării tehnicii PWM, semnalele de tensiune  $V_{abc,\text{ref}}$  din inverter pot ajusta eficient tensiunile furnizate statorului din PMSG, reducând pierderile de energie. Semnalul PWM rezultat are o amplitudine aproximativă de 220 V RMS, ceea ce este tipic pentru multe aplicații cu alimentare trifazată.

### 3.7.4. Proiectarea Controlului MPPT

Controlul MPPT (Maximum Power Point Tracking) constă în creșterea eficienței sistemului eolian prin impunerea turației generatorului sincron, astfel ca ansamblul să dezvolte putere la randament maxim. În subsecțiunea 3.7.1 s-a constatat faptul că punctul optim de funcționare al turbinei este  $\lambda_{\text{opt}} = 6.3$ . Algoritmul MPPT, în acest caz, este bazat pe controlul TSR al turbinei. Pentru proiectarea algoritmului, se realizează o buclă de reglare, în care ca și semnal de feedback se va prelua viteza unghiulară electrică a generatorului sincron, viteza care este folosită și pentru calculul cuplului mecanic  $T_{\text{mech}}$ . Această viteza unghiulară de feedback se scade din viteza unghiulară de referință calcualtă cu ajutorul relației 3.37.

$$\omega_{\text{ref}} = \frac{n_2}{n_1} \frac{\lambda_{\text{opt}}}{R} v_{\text{wind}} \quad (3.37)$$

Pentru a controla turația generatorului PMSG, trebuie controlat cuplul produs de acesta. Deoarece se lucrează în sistem dq0 pentru simplitate, iar elementul generator de cuplu este chiar curentul  $i_q$ , comanda se va aplica pe acest element din circuit. În acest caz, curentul  $i_d$  va fi neglijat, deoarece elementul de magnetizare al rotorului nu se ia în seamă.

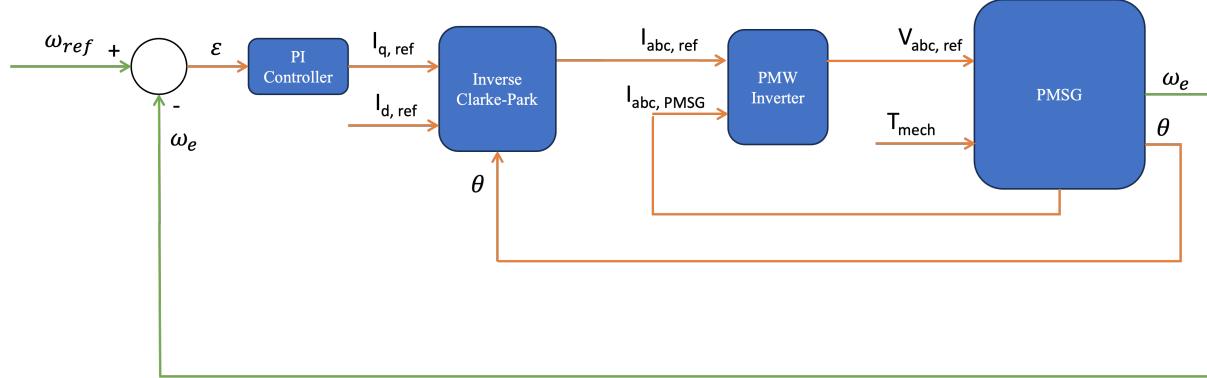


Figura 3.10: Schema bloc a structurii de control în cascadă bazată pe MPPT

În figura 3.10 este ilustrată schema de control în cascadă a algoritmului MPPT. Controlul turației generatorului este completat de un regulator PI proiectat empiric, care trebuie să anuleze eroarea staționară la poziție. Totodată, se mai poate observa bucla internă proiectată în invertorul PWM, și care controlează partea mai rapidă, electrică, a sistemului.

### 3.7.5. Proiectarea Redresorului SVPWM

Subsistemu care realizează redresarea tensiunii și a curentului din curent alternativ în curent continuu este implementat cu tehnica Space Vector Modulation (SVPWM). Această tehnică, numită în română "Modularea vectorului spațial" este o metodă avansată de generare a semnalelor PWM pentru controlul redresoarelor trifazate. Aceasta maximizează tensiunea disponibilă și reduce armonicele generate în curentii de ieșire, îmbunătățind performanța și eficiența sistemului. În acest context, redresorul este proiectat pentru a scala și media tensiunile produse de către generatorul sincron cu magneti permanenți și pentru a le transforma în semnale PWM adecvate pentru controlul elementelor de execuție a comutației (IGBT/Diode), care vor genera secvențele necesare pentru producerea curentului continuu.

Tensiunile de ieșire ale generatorului PMSG ( $V_{abc}$ ) sunt inițial scalate pentru a le adapta la nivelurile de tensiune ale elementelor de comutare. Tensiunile sunt scalate utilizând următorul raport:

$$V_{abc\_scaled} = V_{abc} \times \frac{1.975}{220} \quad (3.38)$$

Această scalare reduce tensiunile la un nivel care poate fi manipulat în mod eficient de către componente de comutare ale redresorului.

După scalare, tensiunile sunt mediate pentru a se obține o formă specifică, necesară pentru utilizarea tehnicii SVPWM.

$$V_{abc\_med} = \left( V_{abc\_scaled} - \left( \frac{\min(V_{abc\_scaled}) + \max(V_{abc\_scaled})}{2} \right) \right) \times \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (3.39)$$

Pentru generarea semnalelor PWM necesare, tensiunile trifazate mediate sunt comparate cu o secvență repetitivă. Se va considera o frecvență de comutație de 10 kHz, asigurând un control rapid și precis al semnalelor PWM.

Time values: [0, 0.25, 0.5, 0.75, 1] / 10000

Output values: [1, 0, -1, 0, 1]

Fiecare secvență PWM corespunzătoare vectorului spațial (a, b, c), care este rezultatul parametrilor anteriori, este înmulțită la curenții corespunzători fazei pentru a genera semnalele de comandă:

$$S_a \times i_a, \quad S_b \times i_b, \quad S_c \times i_c, \quad (3.40)$$

unde  $S_a$ ,  $S_b$ , și  $S_c$  sunt secvențele generate de SVPWM.

Formula generală pentru tensiunea DC în acest context este:

$$C \frac{d(u_{dc})}{dt} = \sum_{k=1}^3 (i_k \times S_k) - i_{dc}, \quad (3.41)$$

unde  $C$  este capacitatea de filtrare,  $I_k$  sunt curenții de fază,  $S_k$  sunt secvențele de comutare generate și  $i_{dc}$  este curentul continuu generat.

Formula 3.41 descrie dinamica tensiunii pe partea de curent continuu.

### 3.7.6. Proiectarea Convertoarelor Buck și Boost

Proiectarea convertoarelor DC-DC Buck și Boost este realizată ținând cont de fazele de operare ale acestora. Pentru ambele convertoare, se pot considera următoarele trei faze:

1. Tranzistor - ON și Diodă - OFF
2. Tranzistor - OFF și Diodă - ON
3. Tranzistor - OFF și Diodă - OFF

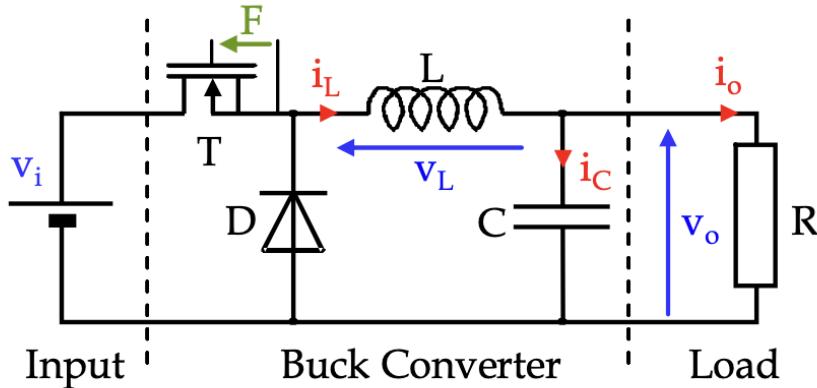


Figura 3.11: Circuitul Convertorului Buck [19]

Pentru convertorul **Buck** 3.11 în faza de operare 1, dioda D nu conduce curentul și se comportă ca și un întrerupător deschis, în timp ce tranzistorul T primește comanda  $F = 1$ . Curentul va circula astfel prin bobina L, prin condensatorul C, încăr căndu-l, cât și prin rezistența R. Dacă circuitul se află în faza de operare 2, atunci tranzistorul T și dioda D fac schimb de roluri, circuitul fiind inchis de către diodă, iar sursa  $V_i$  va fi izolată.

în acest timp, condensatorul C se descarcă, inducând curent prin celelalte elemente ale circuitului. În faza 3 de operare,  $T = D = 0$ , circuitul va fi închis doar în bucla RC, condensatorul descărcându-se complet. Relațiile care guvernează stările circuitului sunt:

$$\begin{cases} i_C(t) = i_L(t) - i_o(t) = C \frac{dv_o}{dt} \\ v_o(t) = \frac{1}{C} \int i_C(t) dt = \frac{1}{C} \int (i_L(t) - i_o(t)) dt \\ v_L(t) = (v_i(t) - v_o(t)) \cdot F - v_o(t) \cdot \bar{F} \cdot \text{sign}(i_L) \end{cases} \quad (3.42)$$

Prima ecuație din [3.42] descrie variația curentului prin condensatorul C, cea de a doua, variația tensiunii prin același condensator, iar cea de a treia reprezintă variația tensiunii prin bobina L, tensiune care depinde faza de operare a circuitului. Totodată pentru modelarea generării secvenței de comutație F este utilizat un comparator care calculează diferența dintre tensiunea continuă dorită  $V_m$  și o tensiune triunghiulară  $V_t$ , care în final, controlează deschiderea și închiderea tranzistorului T. Astfel, F este 1, dacă  $V_m >= V_t$ , și 0, dacă  $V_m < V_t$ . Se va utiliza o frecvență de 50 kHz pentru comutarea fazelor.

Convertorul **Buck** este prevăzut și cu un regulator de tip PI pentru a asigura o eroare staționară la poziție nulă. Controlul este realizat asupra elementului de execuție al comutației, F, sau altfel spus, asupra tranzistorului.

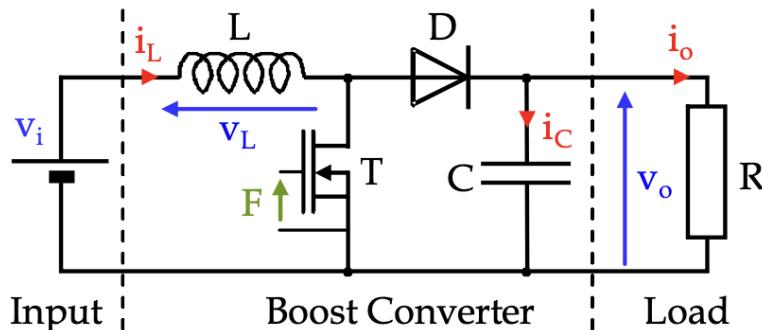


Figura 3.12: Circuitul Convertorului Boost [19]

Convertorul **Boost** [3.12] funcționează tot pe principiul celor trei faze de operare ca și convertorul Buck. Dacă tranzistorul T conduce ( $F = 1$ ), curentul trece prin bobină și energia este stocată sub formă de câmp magnetic, iar condensatorul C se descarcă pe rezistența  $R_{load}$ . În cazul în care tranzistorul T nu conduce, curentul va circula prin dioda D. Pentru acest mod de operare, curentul trece prin  $R_{load}$  și prin condensatorul C, care se va încărca. Dacă circuitul se află în starea 3 de operare, condensatorul se va descarcă de tot, și nu vor mai fi prezenti curenți pe sarcină.

$$\begin{cases} v_L(t) = v_i(t) \cdot F + (v_i(t) - v_o(t)) \cdot \bar{F} \cdot \text{sign}(i_L) \\ i_C(t) = -i_o(t) \cdot F + i_L(t) \cdot \bar{F} \cdot \text{sign}(i_L) = C \frac{dv_o}{dt} \\ v_o = \frac{1}{C} \int i_C(t) dt = \frac{1}{C} \int (-i_o(t) \cdot F + i_L \cdot \bar{F} \cdot \text{sign}(i_L)) dt \end{cases} \quad (3.43)$$

Ecuatiile [3.43] din [19] descriu comportamentul circuitului Boost modelat. Prima relație este variația tensiunii prin bobina L, iar cea de a doua este variația curentului

prin condensatorul C. Aceste două ecuații depinzând de modul de operare al circuitului. Pentru convertorul Boost, nu este prevăzută o structură de control.

Parametrii pentru cele trei tipuri de convertor: redresorul de tensiune AC-DC și convertoarele Buck și Boost sunt reprezentate în tabelul 3.3. Pentru funcționalitatea sistemului eolian cu stocare de energie, rezistențele sarcinilor sunt variabile, pentru a produce constant cei 220 V ai legăturii DC, variind curentul, în funcție de puterea necesară.

Parametru	Valoare
$L_{buck}$ (Inductanța convertorului Buck) [ $\mu\text{H}$ ]	300
$C_{buck}$ (Capacitatea convertorului Buck) [ $\mu\text{F}$ ]	5
$L_{boost}$ (Inductanța convertorului Boost) [ $\mu\text{H}$ ]	200
$C_{boost}$ (Capacitatea convertorului Boost) [ $\mu\text{F}$ ]	50
$C_{rectifier}$ (Capacitatea redresorului) [F]	$10^{-3}$

Tabela 3.3: Parametrii redresorului și a convertoarelor Buck și Boost

### 3.7.7. Proiectarea Sistemului de Stocare pe Baterii

Pentru sistemul de stocare a energiei s-a ales proiectarea unui sistem pe baterii de tip Litiu-Ion. Cel mai simplu mod de a se modela un astfel de sistem este printr-un circuit echivalent electric. Pentru modelarea dinamicii circuitului bateriei, sunt folosite elemente RC. Pentru simplitate, se pretează un circuit echivalent de ordinul I sau de ordinul al II-lea.

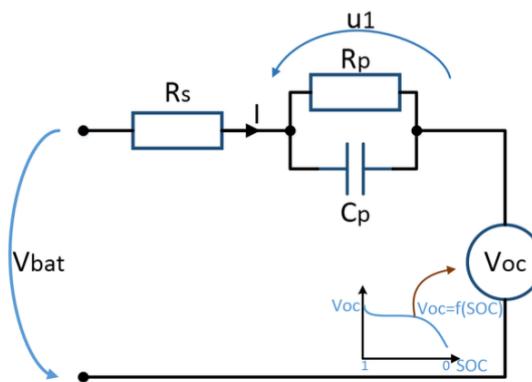


Figura 3.13: Circuitul Echivalent Electric de ordinul I al Bateriei [18]

În figura 3.13 este ilustrat circuitul de ordinul I al bateriei, cu ecuațiile corespunzătoare implementate în relația 3.44. Dinamica este data de așezarea în paralel a elementelor RC peste care cade o tensiune.  $V_{oc}$  este tensiunea circuitului deschis (sau Open Circuit Voltage, OCV) și reprezintă tensiunea la bornele bateriei când aceasta nu este supusă nici unui stimул. Caracteristica OCV se lasă observată sub forma unei curbe care reprezintă tensiunea  $V_{oc}$  în funcție de SOC-ul bateriei (SOC - State of Charge [%]). Se mai definește o rezistență  $R_s$  peste care cade tensiunea direct în momentul aplicării unei sarcini.

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_p C_p} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_p} \\ \frac{1}{Q} \end{bmatrix} \cdot I \\ V_{bat} = V_{oc}(u_2) + [1 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} + R_s \cdot I \\ \frac{du_2}{dt} = \frac{I}{Q} \end{cases}, \quad (3.44)$$

unde  $I$  este curentul prin baterie,  $Q$  este capacitatea bateriei în Ah,  $R_s$  este rezistența ohmică a bateriei,  $RC$  este rezistența polarizării și capacitatea bateriei,  $V_{bat}$  este tensiunea bateriei pe terminale și  $V_{oc}$  este tensiunea la bornele bateriei fără sarcină conectată.

Pentru proiectarea sistemului pe baterii, trebuie luate în considerare mai multe specificații precum: capacitatea bateriei, tensiunea sistemului pe baterii, puterea dorită, materialele chimice din care este construită bateria, timpul de descărcare. Dacă se consideră consumul mediu de energie electrică de 2 kWh al unei gospodării, și înmulțim această valoare cu 24 ore intr-o zi cu o eficiență energetică de 90%, obținem o capacitate de 53.33 kWh a bateriei. Această capacitate ar putea susține o gospodărie timp de 24 de ore, timp în care o eoliană nu ar produce energie din vânt deloc. Totodată arhitectura sistemului este pe 48 V.

Parametrizarea circuitului RC care redă dinamica sistemului este realizată prin identificarea parametriilor unei celule de baterie Panasonic NCR186500 Li-ion. Această celulă de baterie are o capacitate de 3.2 Ah și o tensiune nominală de 3.6 V. Dacă se dorește o tensiune a sistemului de 48 V este nevoie de un numar de 13 celule de 3.6 V, acestea fiind legate în serie. Pentru obținerea capacitatii dorite de 53.33 kWh, care reprezintă 1111 Ah, celulele de baterie trebuie să fie așezate în paralel. Astfel, considerând capacitatea unei celule de 3.2 Ah, rezultă 347 celule în paralel.

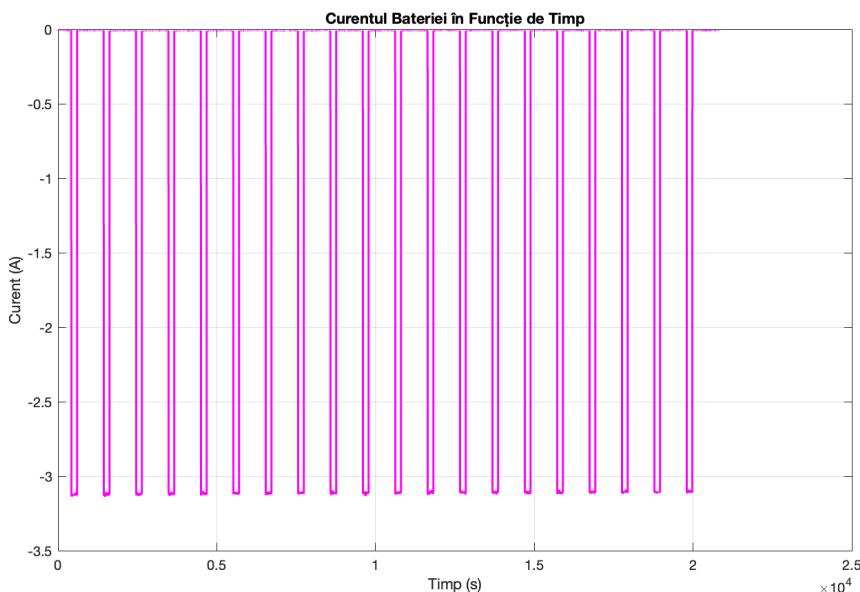


Figura 3.14: Curentul de descărcare aplicat celulei NCR186500 [18]

Conform [18], pentru a aduna datele de identificare a parametriilor celulei NCR186500, trebuie aplicați curenți de descarcare a bateriei de -3.12 A pentru un timp de 60 de se-

cunde, urmăți de un timp de relaxare de 180 secunde după cum se poate observa în figura 3.14. Răspunsul sistemului la aplicarea curentului de descărcare este ilustrat în figura 3.15.

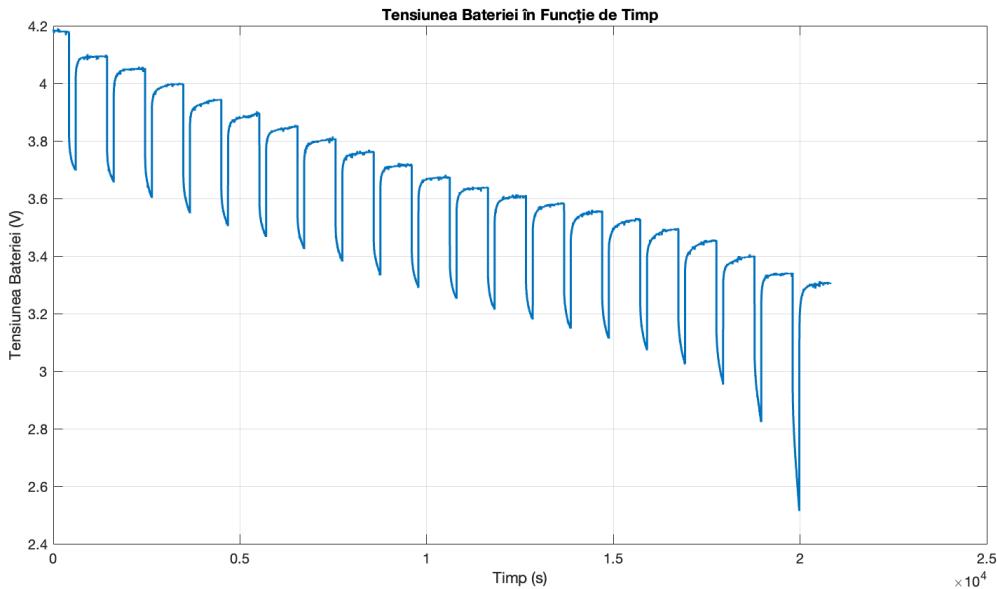


Figura 3.15: Răspunsul tensiunii de pe celula NCR186500 la curentul de descărcare [18]

Pe baza răspunsului, se va alege un interval pentru identificarea parametrilor  $R_S$ ,  $R_P$  și  $C_P$ , cele două din urmă fiind elementele RC ale circuitului. Utilizând formula 3.45, s-au identificat tensiunile  $V_1 = 3.8V$ ,  $V_2 = 3.5V$ ,  $I_{bat}$  fiind cunoscut și egal cu 3.12 A. Se obține deci o rezistență  $R_S = 0.0962 \Omega$ . Aplicând relațiile 3.46 și 3.47 rezultă parametrii RC ai celulei ca fiind  $R_P = 0.0385 \Omega$  și  $C_P = 4772 F$ . Alegerea valorilor pentru identificare este ilustrată în figura 3.16.

$$R_S = \frac{V_1 - V_2}{I_{bat}} \quad (3.45)$$

$$R_P = \frac{V_2 - V_3}{I_{bat}} \quad (3.46)$$

$$\tau = R_P \cdot C_P \quad (3.47)$$

Celor 3 ecuații li se mai adaugă și calculul pentru obținerea parametrilor sistemului pe baterii pe arhitectură de 48 V și capacitate de 53.33 kWh. Așadar, conform numărului de celule în paralel și serie, se definesc și următoarele formule:

$$\begin{cases} R_{S_{Sys}} = \frac{N_{serie} \cdot R_S}{N_{paralel}} \\ R_{P_{Sys}} = \frac{N_{serie} \cdot R_P}{N_{paralel}} \\ C_{P_{Sys}} = \frac{N_{paralel} \cdot C_P}{N_{serie}} \end{cases} . \quad (3.48)$$

Prin utilizarea 3.48 se obține tabelul parametrilor sistemului de stocare de energie pe baterii 3.4.

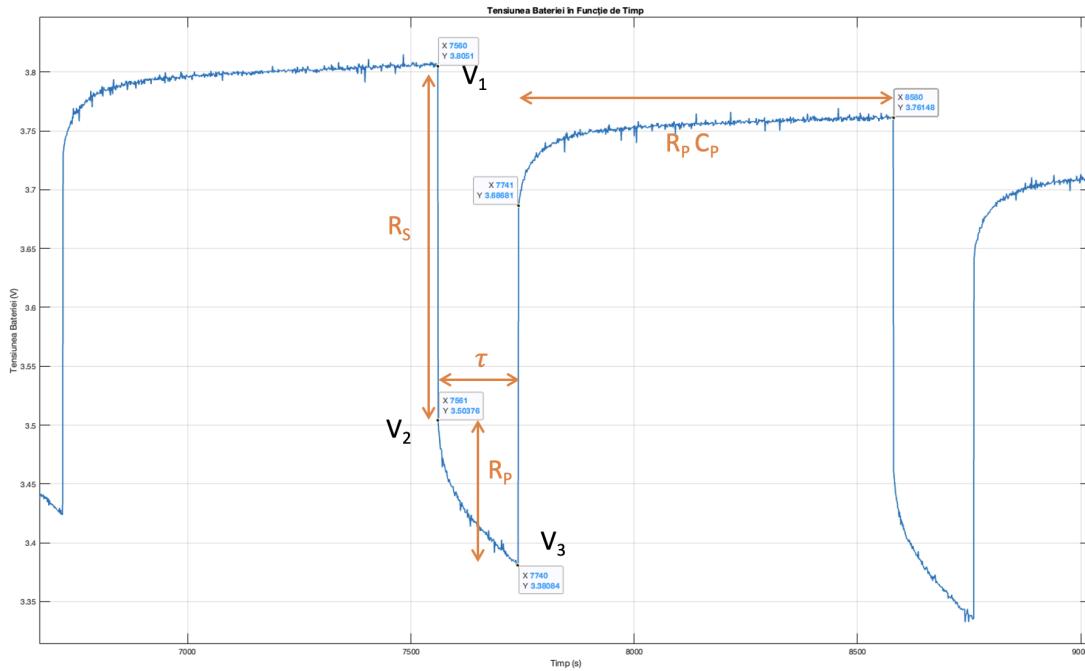


Figura 3.16: Identificarea parametrilor pe baza dinamicii răspunsului [18]

Parametru	Valoare
Cap_sys (Capacitatea sistemului) [Ah]	1111
Cap_cell (Capacitatea celulei) [Ah]	3.2
V_nom_sys (Tensiunea nominală a sistemului) [V]	48
V_nom_cell (Tensiunea nominală a celulei) [V]	3.6
N_serie (Numărul de celule în serie)	13
N_parallel (Numărul de celule în paralel)	347
Lbat (Curentul de impuls aplicat bateriei) [A]	3.12
T (Timpul) [sec]	1020
Tau ( $\tau$ ) [sec]	180
Rs_cell (Rezistența serie a celulei) [ $\Omega$ ]	0.0962
Rp_cell (Rezistența paralelă a celulei) [ $\Omega$ ]	0.0385
Cp_cell (Capacitatea paralelă a celulei) [F]	4772
Rs_sys (Rezistența serie a sistemului) [ $\Omega$ ]	0.0036
Rp_sys (Rezistența paralelă a sistemului) [ $\Omega$ ]	0.0014
Cp_sys (Capacitatea paralelă a sistemului) [F]	124920

Tabela 3.4: Parametrii și valorile sistemului de baterii

În cel de-al doilea paragraf al subsecțiunii este menționată caracteristica tensiunii circuitului deschis al bateriei  $V_{OC}$  în funcție de starea de încarcare a bateriei (SOC). Aceasta este preluată din specificațiile unui sistem real pe 48 V, fiind reprezentată în figura 3.17. Curba OCV-SOC este o caracteristică interesantă a bateriilor Li-Ion, deoarece cu toate că sistemul este pe o arhitectură de 48 V, acesta nu are o curbă liniară a tensiunii circuitului deschis. Influențată de către materialele chimice din care este construită bateria, curba OCV-SOC se modifică crește și scade brusc la capetele stării de încărcare.

De aceea, pentru bateriile fabricate din Li-Ion se preferă un SOC stabil între 20% și 80%, interval în care tensiunea nu are variații brusăte. Totodată și configurația sistemului, adică aranjarea celulelor în serie paralel, influențează curba OCV-SOC.

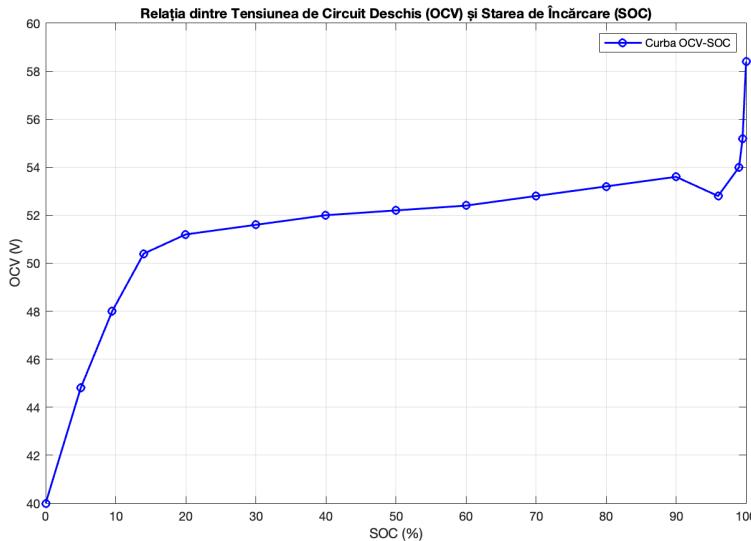


Figura 3.17: Caracteristica OCV-SOC

### 3.8. Proiectarea Sistemului Supervizor de Control

Pentru controlul supervisor al sistemului s-a ales proiectarea unei logici de tip Flow Chart bazat pe stările sistemului. În figura 3.19 sunt ilustrate cele 4 stări principale ale sistemului, fiecare înglobând alte substări care conțin regimuri de funcționare. Regimurile de funcționare se pot observa și în figura 3.18. Așadar, sistemul este proiectat să comute între cele 4 stări în funcție de viteza vântului. Substările, în schimb, comută în funcție de alți parametri, cum ar fi starea de încărcare a bateriei (SOC) și cererea de la rețea.

Spre exemplu, în cazul stărilor No Wind Power și High Wind Shut Down, dacă nu există cerere de la rețea și SOC-ul bateriei  $\leq 20\%$ , atunci sistemul este oprit. Dacă în schimb, apare o cerere de la rețea și avem suficientă energie în baterie, sistemul compensează deficitul de energie din lipsa vântului cu energie venită din sistemul de stocare. Dacă, SOC-ul scade sub 20%, se ajunge în substarea Battery Maintenance, în care, sistemul este ca și oprit, doar că se cunoaște faptul că există cere din rețea.

Pentru celelalte două stări principale, dacă sistemul produce mai multă energie decât cererea din rețea, convertorul Buck va redirecționa energie către baterie, aceasta încărcându-se până la maxim 80%. Altfel, dacă cererea este mai mare decât poate să producă turbina eoliană de una singură, sistemul va utiliza energie din baterie prin convertorul Boost. Fiecare substare execută un control de tip on sau off asupra subsistemelor care alcătuiesc sistemul eolian cu stocare de energie. Logica proiectată urmărește o eficientizare a costurilor, prin utilizarea puterii vântului și a energiei din sistemul de stocare pe baterii. Aceasta trebuie ori să anuleze, ori să minimizeze deficitul cererii din rețea.

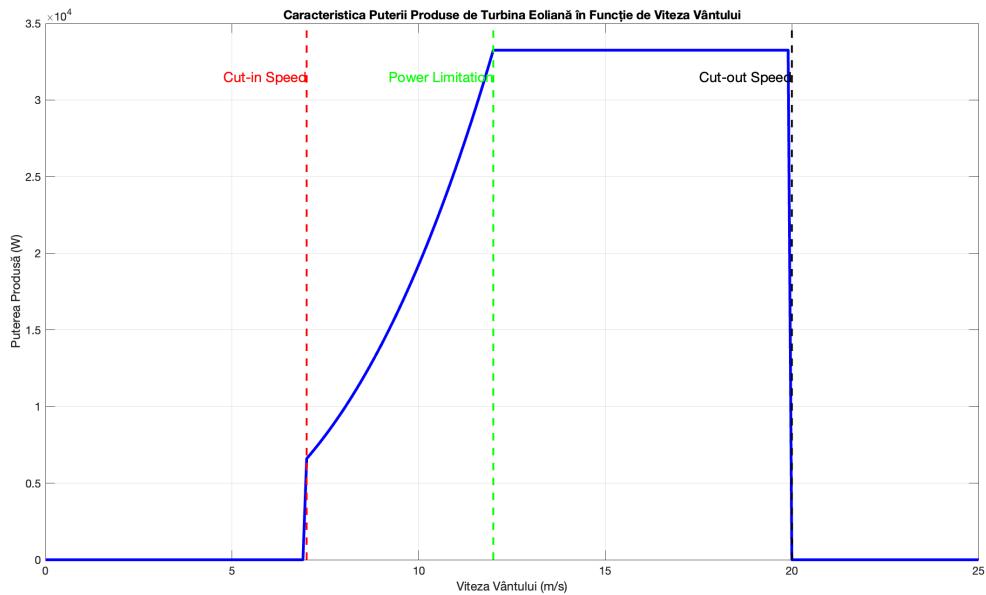


Figura 3.18: Puterea produsă de turbina eoliană în funcție de Viteza Vântului

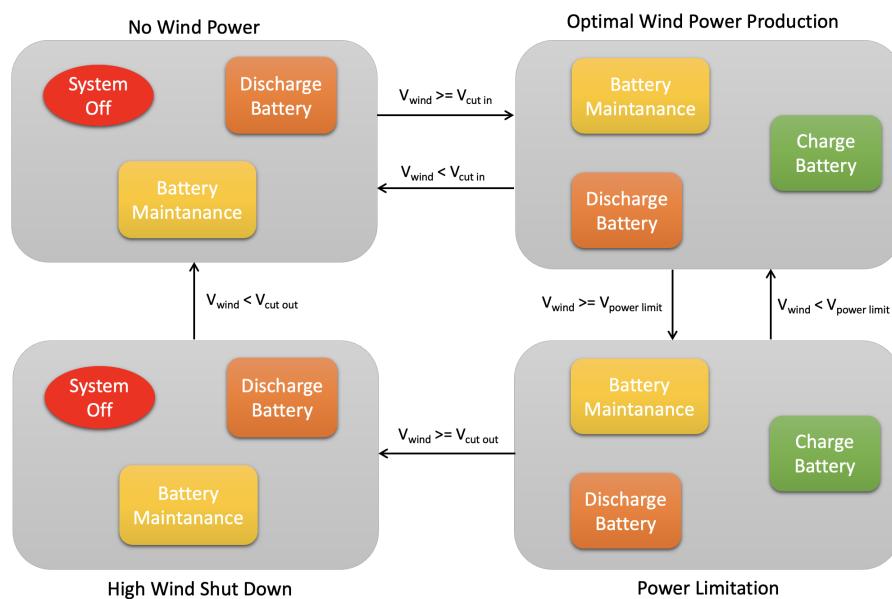


Figura 3.19: State Chart-ul sistemului eolian

## Capitolul 4. Implementare și Testare

Implementarea sistemului eolian cu stocare de energie proiectat este realizată utilizând mediul de dezvoltare și simulare MATLAB/Simulink. Capitolul acesta descrie procesul de implementare al fiecărei componente și subcomponente din cadrul sistemului. Toate elementele descrise la capitolul de proiectare vor fi implementate. Pe lângă modul de implementare, vor fi prezentate diagrame cu rezultatele simulărilor pentru a ilustra modul de funcționare al sistemului modelat. Mai mult, acest capitol va aborda și testarea întregului sistem în diferite scenarii de funcționare, demonstrând dinamica acestuia.

#### 4.1. Implementarea Turbinei Eoliene si a generatorului PMSG

Subsistemu turbinei eoliene si a generatorului PMSG lucrează ca un întreg pentru a putea fi vizualizată întreaga dinamică. Ca și intrări în acest subsistem denumit WTx-PMSG este viteza vântului, iar ca și ieșiri ne interesează curenții produși  $I_{abc}$ , tensiunile  $V_{abc}$  și putre activă  $P_e$ . Pentru legarea subsistemului la restul sistemului, se va considera și o intrare de la controlul supervisor.

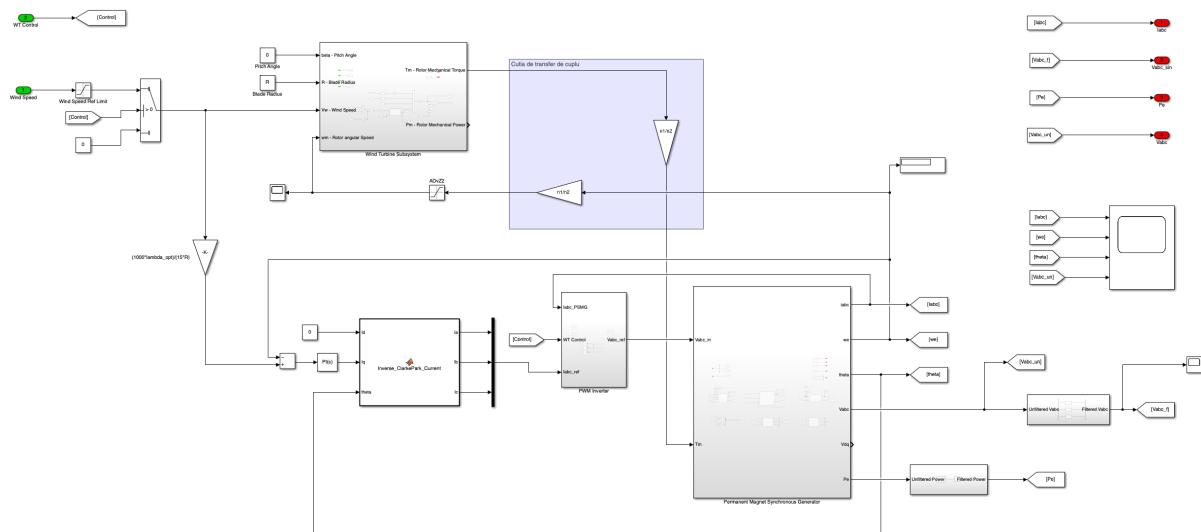


Figura 4.1: Modelul Simulink al Subsistemu Turbinei Eoliene și al generatorului PMSG

Figura 4.2 ilustrează ecuațiile 3.4, 3.10, 3.11, 3.12 și 3.13 implementate în subsistemul părții mecanice a turbinei eoliene. În figura 4.3 se observă multitudinea subsistemelor care realizează dinamica generatorului PMSG. Transformatele Clarke-Park sunt implementate utilizând blocurile Matlab Functions. Ecuațiile părțiilor mecanice și electrice ale generatorului sunt implementate în alte două subsisteme. Pentru ecuațiile diferențiale 3.36, 3.35 s-au folosit blocuri Integrator.

Schema bloc de control a algoritmului MPPT prezentată în capitolul anterior [3.10] poate fi observată în implementarea ilustrată în figura 4.4. Algoritmul MPPT [3.37] este implementat utilizând un bloc Gain care transformă intrarea vitezei vântului în referință

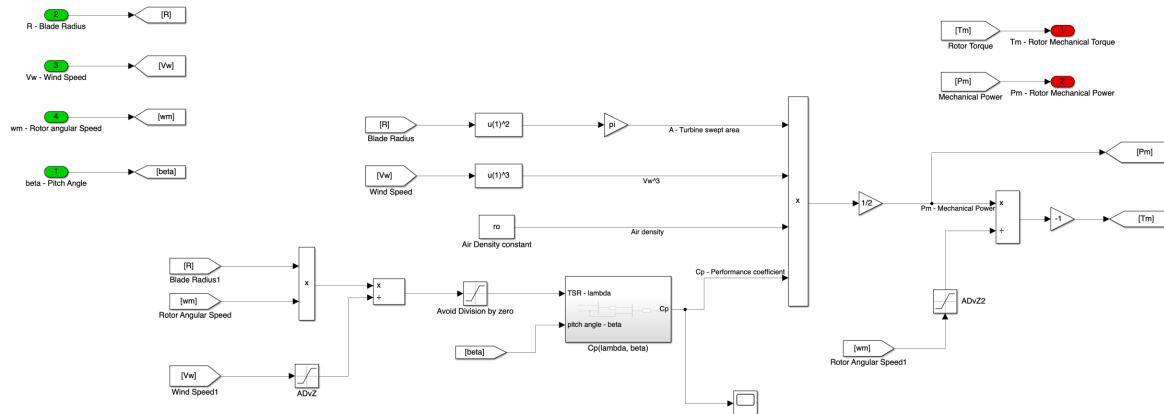


Figura 4.2: Modelul Simulink al Turbinei Eoliene

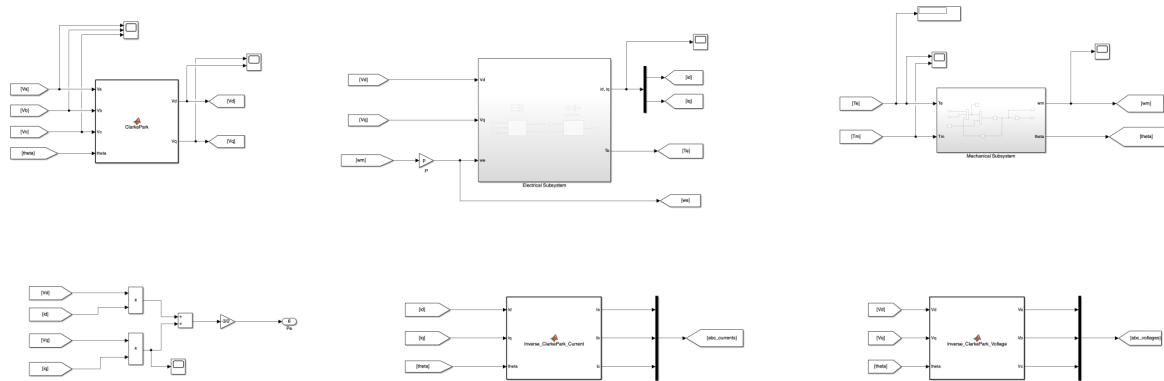


Figura 4.3: Modelul Simulink al generatorului PMSG

pentru sistemul de control, măsurată în viteză unghiulară. Eroarea generată de diferența referinței și viteza unghiulară a generatorului este aplicată ca intrare unui bloc PID proiectat empiric pentru a satisface anumite performanțe dorite în ciuda neliniarităților generatorului sincron cu magneti permanenți. Comanda este apoi aplicată curentului  $i_q$  din blocul ecuațiilor Clarke-Park, care generează curenți trifazați pentru invertorul PWM. Aceasta va crea referința pentru PMSG.

Pentru testarea subsistemului turbinei eoliene și a generatorului PMSG s-a aplicat un semnal de tip treaptă pe viteza vântului, care reprezintă intrarea în subsistem. Valoarea inițială a semnalului de tip treaptă a fost 7 m/s, urmând ca după 0.075 secunde să fie aplicată o valoare a semnalului de 12 m/s. Aceste viteze ale vântului pot fi considerate ca și viteza la care turbina începe să se rotească, respectiv viteza optimă a vântului pentru care eoliană produce un coeficient de putere de  $C_{P,\max} = 43.8\%$ . În figura 4.5 se pot observa mai multe semnale generate de PMSG. Primul chenar reprezintă curenții trifazici  $I_{abc}$ , iar cel de-al patrulea chenar reprezintă tensiunile trifazice sub formă de semnal PWM. Un generator PMSG de 4200 W, produce curenți de 35 A la o tensiune de aproximativ 120V [4.6]. Acești curenți se pot observa în primul chenar al figurii, după momentul când intrarea de 12 m/s este aplicată. Viteza de referință electrică a generatorului în condiții optime de vânt este de 1012 rad/s. Această viteză este atinsă și în răspunsul PMSG-ului, în cel de-al doilea chenar. Răspunsul și referința sunt ilustrate

și în figura 4.7. Iar în cel de-al treilea chenar se poate observa poziția unghiulară  $\theta$  a generatorului, integrată din viteza unghiulară. De asemenea, frecvența obținută este de aproximativ 50 Hz. Pentru performanțe mai ideale, ar fi nevoie de o parametrizare mai bună a subsistemelor. De asemenea, neliniaritatea ridicată generatorului poate pune probleme performanțelor.

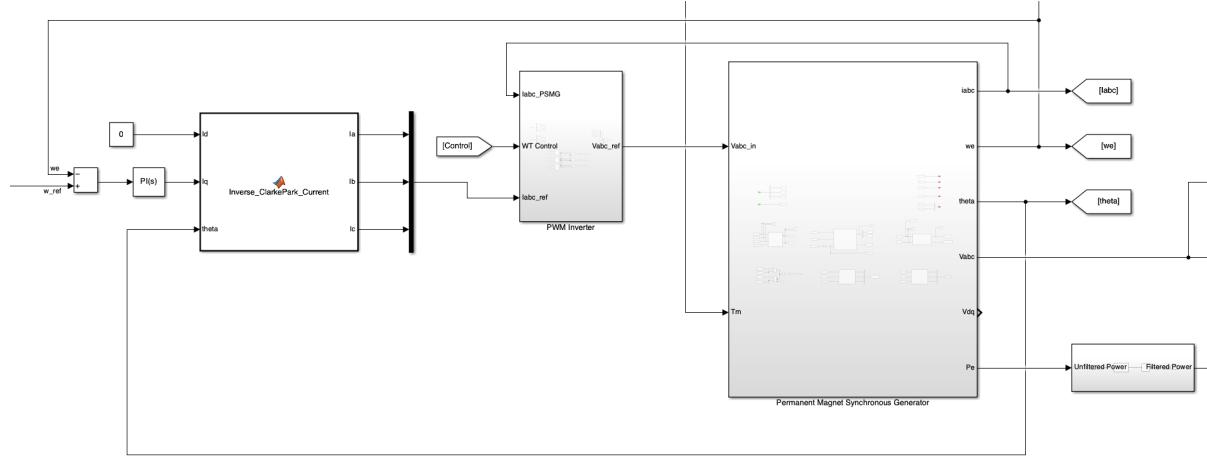


Figura 4.4: Modelul Simulink al controlului generatorului PMSG

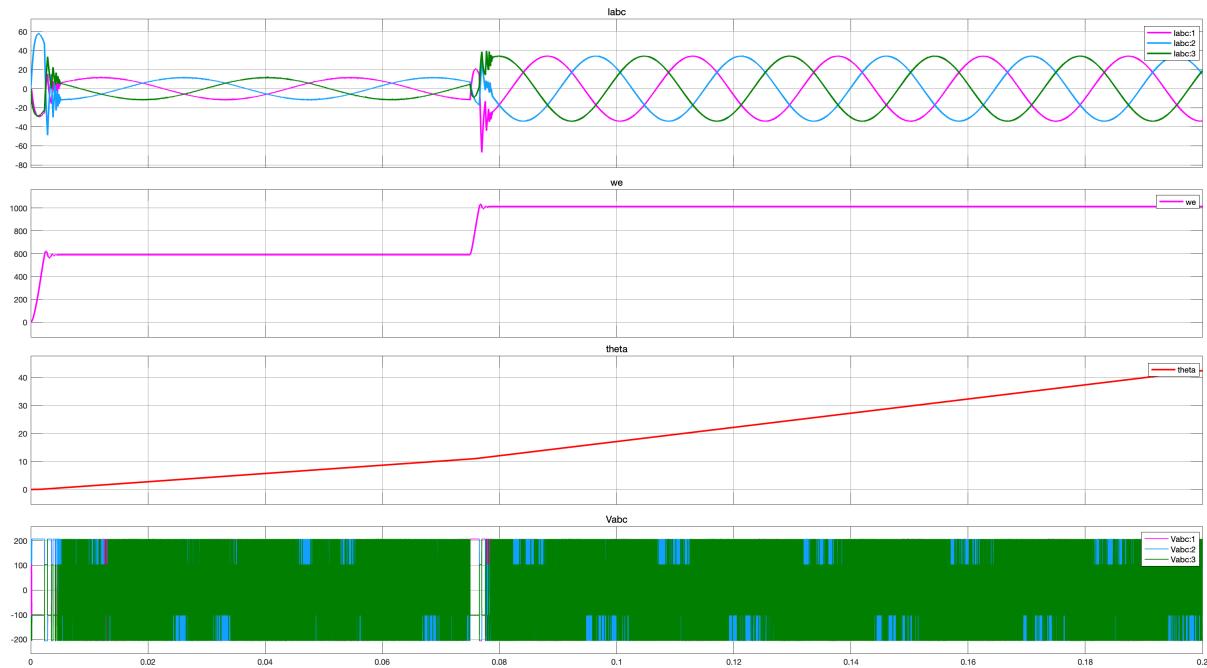


Figura 4.5: Răspunsul generatorului PMSG la o treaptă aplicată pe viteza vântului

## 4.2. Implementarea Converteoarelor de Putere

Această secțiune acoperă implementarea următoarelor convertoarelor de putere: redresorul AC DC, și convertoarele Buck și Boost.

**Redresorul de tensiune AC DC** este modelat utilizând tehnica Modulației Vecotriilor Spațiali (SVPWM) detaliată în capitolul anterior. Prin implementarea subsistemului

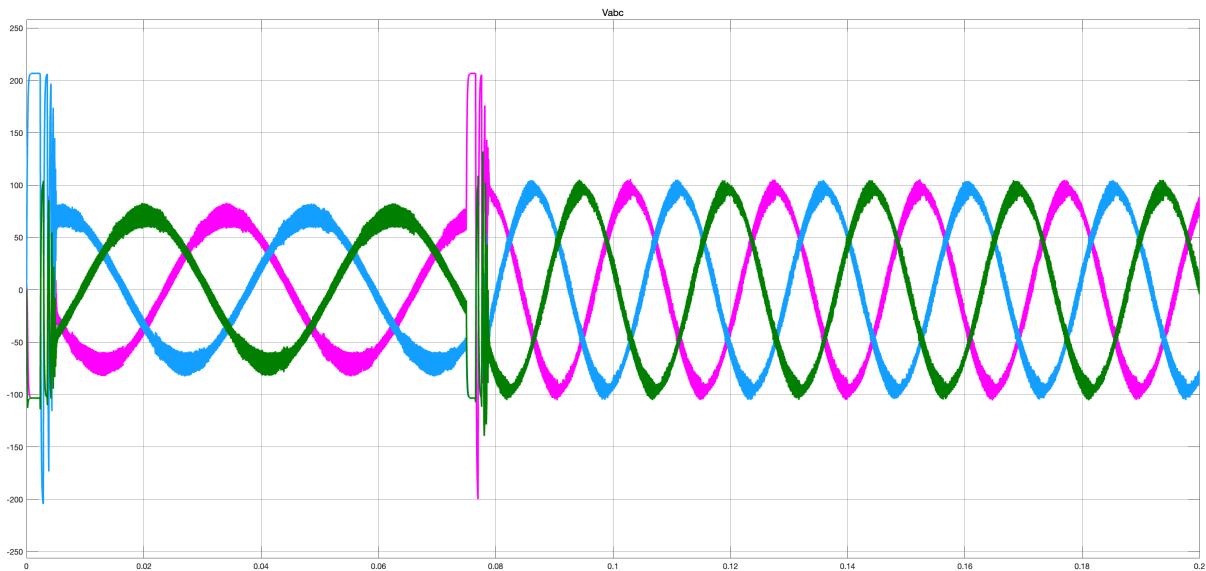


Figura 4.6: Tensiunea de ieșire filtrată a PMSG

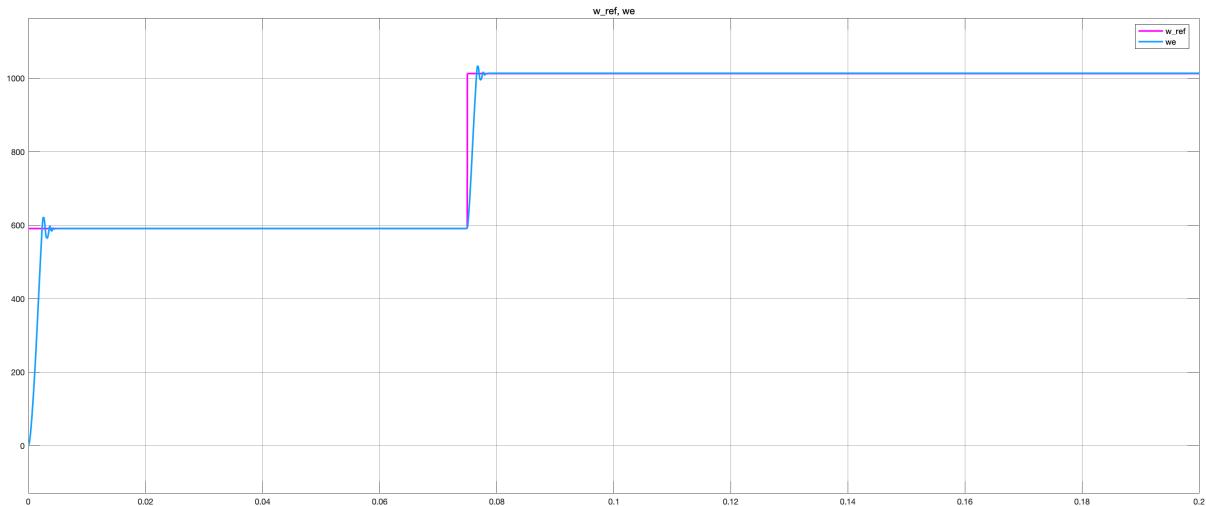


Figura 4.7: Urmărirea referinței de către PMSG

SVPWM Rectifier 4.9 urmărim o tensiune DC de legătură în valoare de 220V. Puterea produsă variind în funcție curent de fapt. Din formula 3.41 tragem concluzia că pentru a obține o tensiune constantă cu valoarea dorită, trebuie să modificăm curentul  $i_{DC}$ , care în consecință va varia puterea produsă. Problema intervine în alegerea rezistenței sarcinii (a Load-ului). Aceasta a fost deci implementată utilizând un bloc de tip Look-up Table 4.1 care în funcție de puterea produsă de către generator, va varia rezistența corespunzător pentru a obține aceeași valoare. Desigur se pot considera pierderi, redresorul având doar 95% eficiență la putere maximă.

Asupra subsistemului format din turbina eoliană și redresor 4.8, s-a aplicat o viteza a vântului de la 7 m/s la 12 m/s utilizând un semnal de tip rampă. Astfel, în figura 4.11 se pot observa tensiunea DC care atinge valoarea de 220 V. În cel de al doilea chenar, se poate observa curentul care crește până la valoarea la care puterea DC (cu roz, în chenarul 3) atinge valoarea puterii produse de către turbina eoliană și generatorul PMSG. Se mai poate observa și faptul că până când tensiunea nu atinge valoarea de 220 V, puterea

Putere Redresor și Boost (W)	Rezistență Sarcină Redresor (Ohm)
10	4840
418.0	115.8
836.0	57.9
1254.0	38.6
1386.0	34.9206
1672.0	28.9
2090.0	23.2
2508.0	19.3
2926.0	16.5
3344.0	14.5
3762.0	12.9
4180.0	11.6
4547.4	10.6434

Tabela 4.1: Tabelul 1D Rectifier - Boost Look-Up [Putere - Rezistență Sarcină]

produsă de redresor nu ține pasul cu cea produsă de către PMSG. Acesta fiind oricum un comportament normal și firesc având în vedere regimul tranzitoriu și neliniaritățile sistemului.

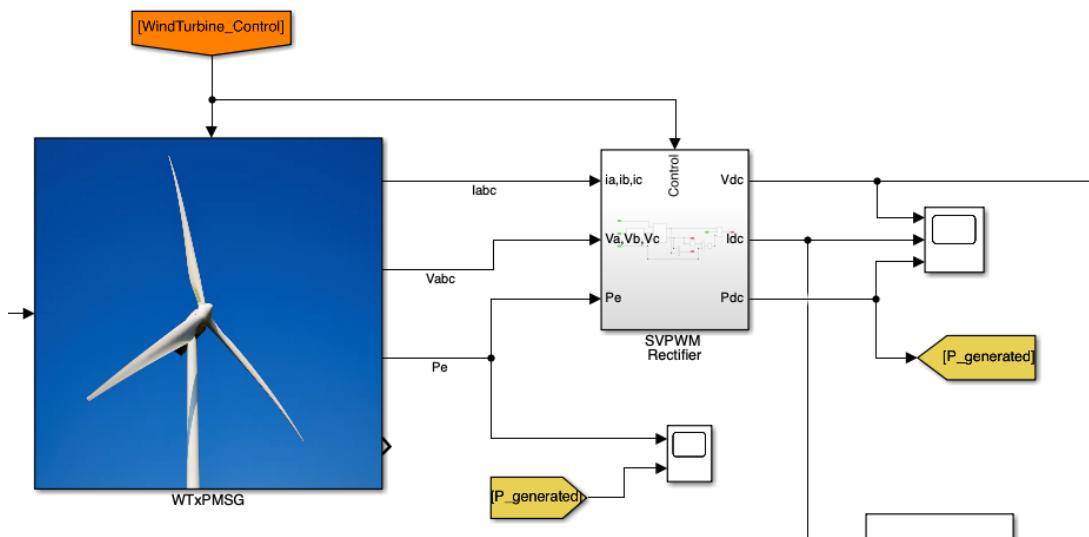


Figura 4.8: Modelul Simulink al Turbinei cu PMSG și al Redresorului AC DC

**Convertoarele Buck și Boost** sunt implementate utilizând formulele descrise în capitolul Analiză și Proiectare [3.43] [3.42]. Convertorul Buck trebuie să coboare tensiunea de legătură DC de la valoarea de 220 V la valoarea de 48 V a arhitecturii sistemului de stocare pe baterii. Asemenea, convertorul Boost va extrage energie din baterie și va ridica tensiunea de 48 V la valoarea legăturii DC. Pentru cele două convertoare de putere DC-DC a trebuit aplicată aceeași metodă pentru rezistența sarcinii din ecuații. De data aceasta a fost luată în considerare o eficiență a convertoarelor de 95% față de puterea generată de către PMSG.

Precum și la redresorul AC DC, pentru a obține tensiunile dorite, sunt utilizate

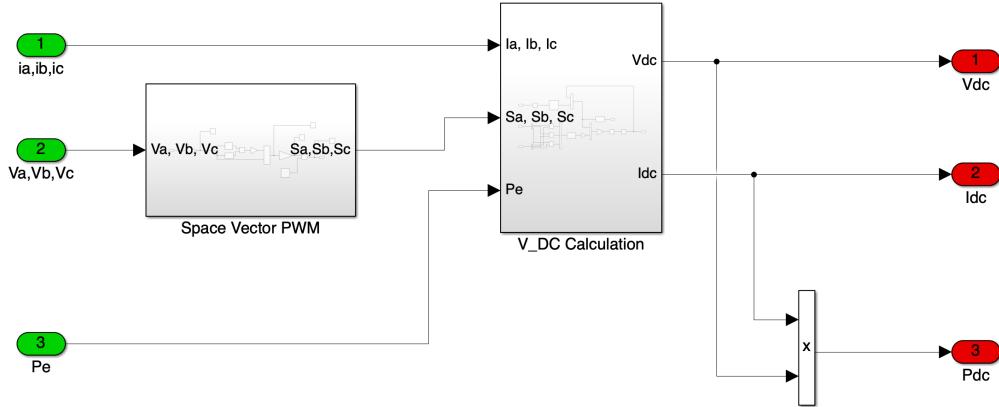


Figura 4.9: Modelul Simulink al Redresorului AC DC

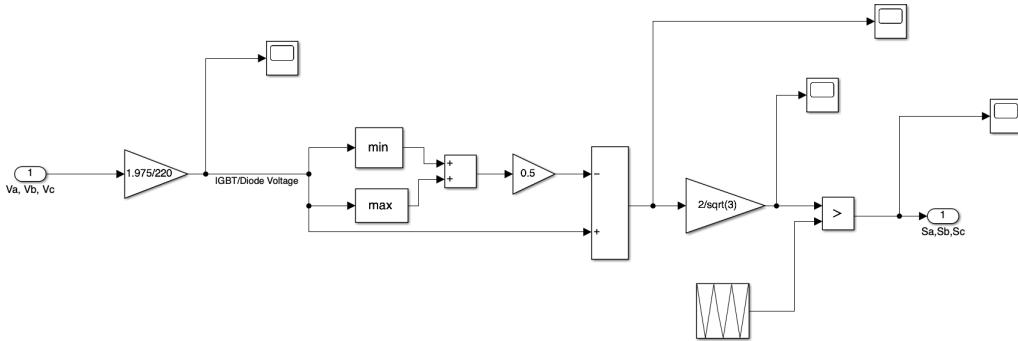


Figura 4.10: Modelul Simulink al Modulației Spațiale Vectoriale

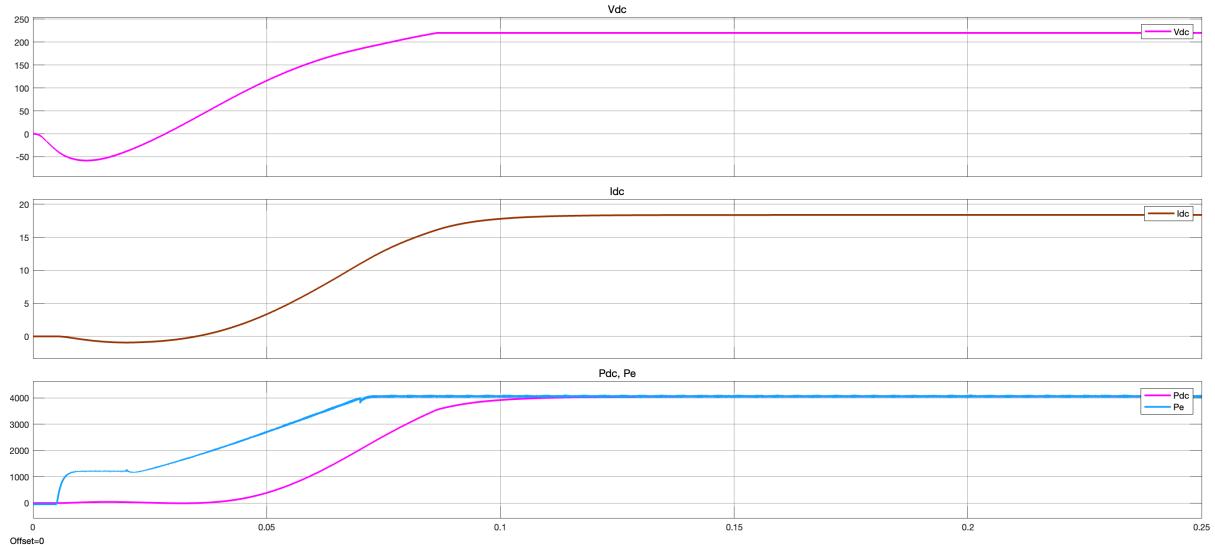


Figura 4.11: Răspunsul Redresorului de tensiune AC DC

blocuri de tip Look-up Table 4.2 care în funcție de surplusul sau deficitul de putere față de cererea din rețea vor varia rezistența sarcinii. Această rezistență variază în final curentul introdus sau extras din baterie prin intermediul convertoarelor Buck și Boost.

Modelele Simulink superioare ale celor două convertoare sunt ilustrate în figura 4.12. Pentru primul subsistem se poate observa tensiunea de intrare  $V_{in} = 220$  V și tensiunea de referință care este necesară pentru sistemul cu baterii, tensiune mai mică de 48V. Pentru convertorul Boost, s-a folosit raportul 3.29, astfel încât valoarea lui D este 0.782 pentru a obține o tensiune de 220 V din 48 V.

Putere Buck (W)	Rezistență Sarcină Buck (Ohm)
10	230.4000
427.2	5.3933
854.4	2.6966
1281.6	1.7978
1708.8	1.3483
2136.0	1.0787
2563.2	0.8989
2990.4	0.7705
3417.6	0.6742
3844.8	0.5993
4272.0	0.5393

Tabela 4.2: Tabelul 1D Buck Look-Up [Putere - Rezistență Sarcină]

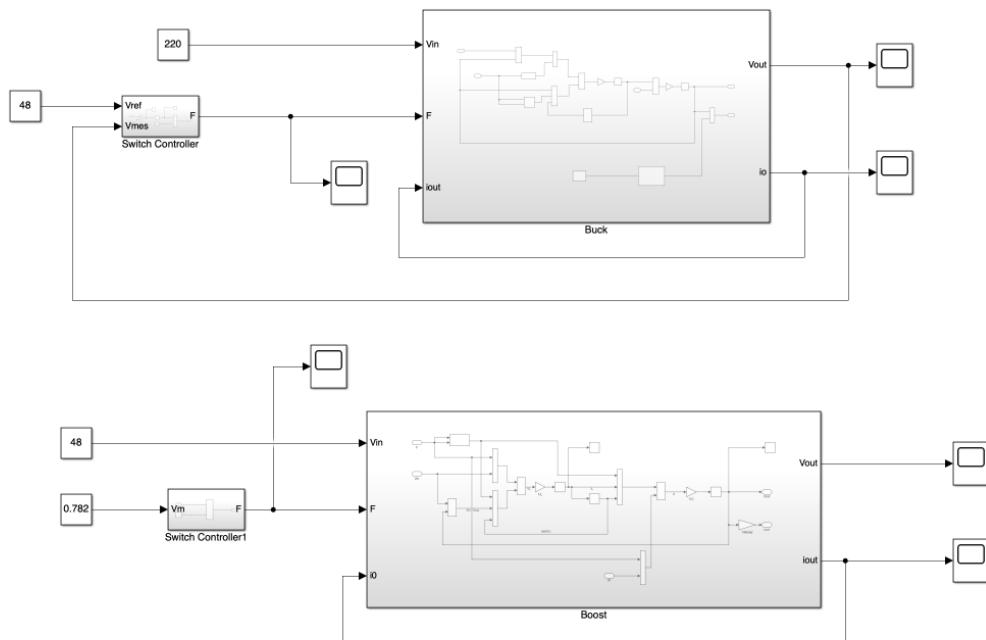


Figura 4.12: Modelul Simulink inițial al convertoarelor Buck și Boost

În figura 4.13 se poate observa răspunsul subsistemului Buck la o intrare constantă de 220 V și o referință de 48 V. Performanțele subsistemului sunt un timp de răspuns de 0.005 secunde, un suprareglaj acceptabil de 18.75% și o eroare staționară la poziție de nulă. Aceste performanțe satisfac buna funcționare a întregului sistem când toate

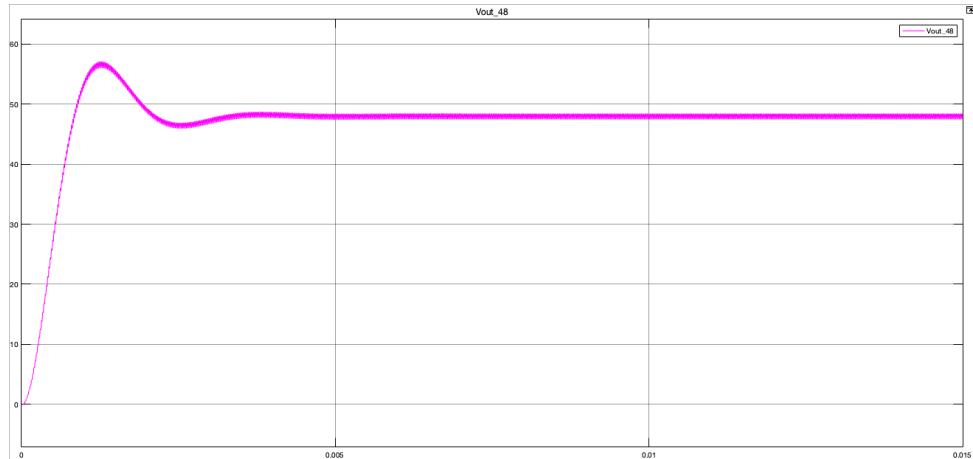


Figura 4.13: Răspunsul Subsistemu Buck la o tensiune de intrare de 220 V si o referință de 48 V

subcomponentele sunt puse cap la cap pentru a funcționa împreună. Si în cazul convertorului Boost avem performanțe asemănătoare, doar că în acest caz, timpul de răspuns este mai lent, și există oscilații mai mari. Însă, dacă subsistemul este conectat în sistemul complet și îi este adăugat Look-up Table-ul pentru sarcina rezistivă, comportamentul subsistemului Boost se schimbă și are performanțe mai bune.

### 4.3. Implementarea Sistemului de Stocare pe Baterii

Subsistemu ansamblului de baterii de 48 V este implementat utilizând parametrii obținuți prin identificare la partea de proiectare [3.4], cât și ecuațiile circuitului echivalent [3.13]. Pentru caracteristica OCV-SOC [3.17] s-a utilizat, din nou, un bloc de tip Look-up Table. Modelul de ordinul I implementat în Simulink este ilustrat în figura [4.14].

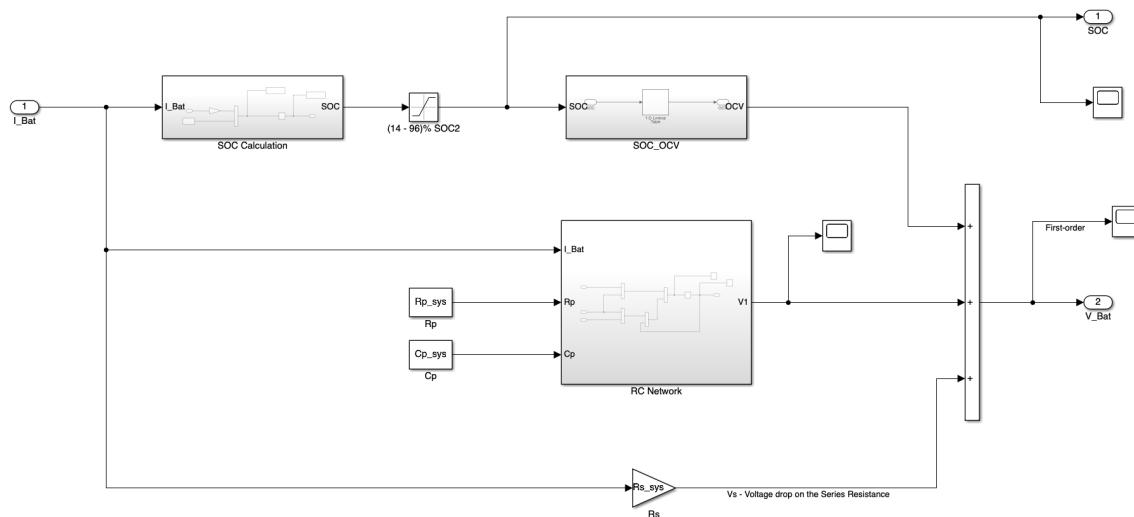


Figura 4.14: Modelul Simulink de ordinul I al bateriei

Ca și intrare în subsistemul bateriei avem curentul de descărcare sau încărcare, în funcție de polaritatea acestuia, iar ca și ieșiri ne interesează tensiunea bateriei și starea de încărcare SOC. Pentru a simula și verifica corectitudinea identificării parametriilor,

bateria ar trebui să se descarce complet într-o oră dacă se aplică un curent constant maxim, egal cu capacitatea bateriei, în acest caz 1111 A. Iar pe tensiunea bateriei ar trebui să urmeze caracteristica OCV-SOC [3.17], inversată, de la 100% la 0%. În figura 4.15 se poate observa faptul că modelul răspunde conform aşteptărilor. Un alt test la care poate să fie supus modelul bateriei sunt impulsurile de descărcare. În acest caz trebuie să fie vizibile curbe de descărcare ca și în figura 3.15. A fost utilizat un curent negativ de 93.75 A timp de 200 secunde, apoi au urmat 800 secunde de relaxare. Si această caracteristică de descărcare este obținută și este ilustrată în figura 4.16.

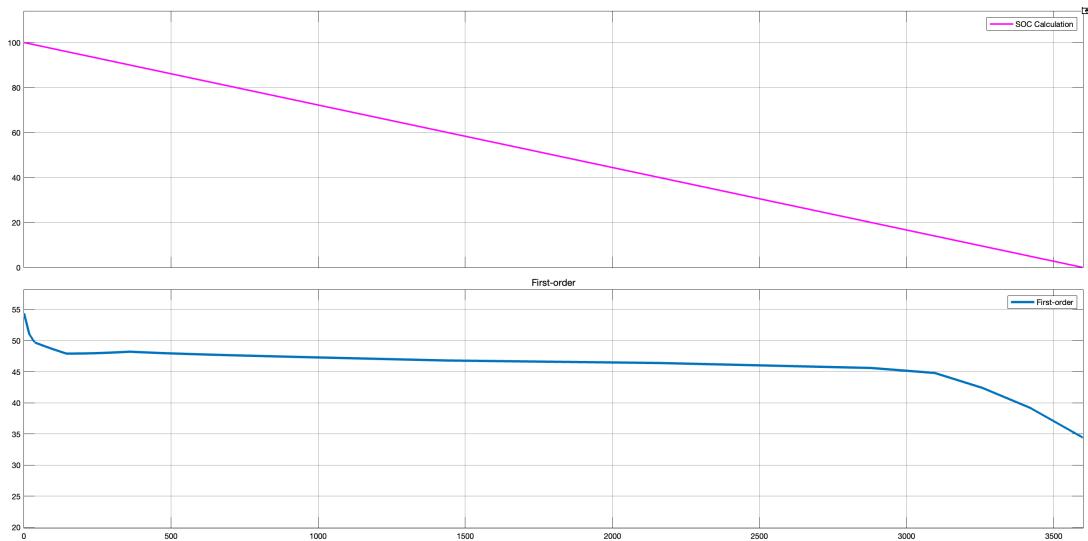


Figura 4.15: Descărcarea bateriei de la 100% la 0%

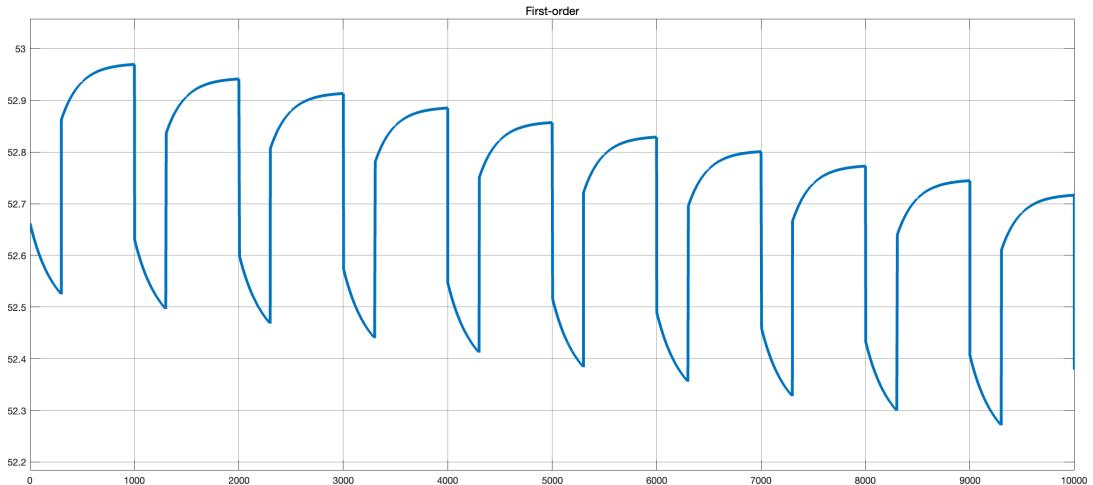


Figura 4.16: Răspunsul bateriei la impulsuri de descărcare

În sistemul final, intrarea bateriei va fi legată la un switch care va comuta în funcție de polaritatea curentului. Dacă există cerere din rețea, bateria va suplini lipsa de putere. Dacă există surplus de putere, switch-ul se va conecta la convertorul Buck pentru a introduce energie în baterie. Ieșirea este conectată la intrarea în convertorul Boost pentru când bateria este în regim de descărcare.

#### 4.4. Implementarea Controlului Supervizor

Controlul stărilor sistemului și activării sau dezactivării anumitor subsisteme este implementat în Simulink utilizând blocul Flow Chart. Pentru acest bloc există semnale de intrare, variabile interne pentru calcule sau condiții și semnale de ieșire care pot fi utilizate mai departe în sistem, în acest caz controlând subsistemele. În contextul sistemului eolian, folosind blocul Flow Chart s-a implementat schema din figura 3.19. Ceea ce nu apare în acea schema sunt condițiile de tranziție între substațiiile înglobate în cele 4 stări principale.

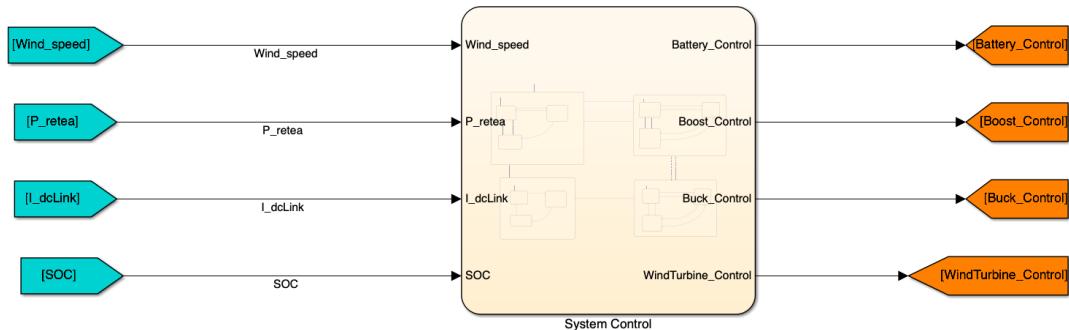


Figura 4.17: Implementarea Simulink utilizând blocul FlowChart

În figura 4.17 se pot observa semnalele de intrare utilizate în FlowChart, viteza vântului, puterea cerută de către rețea, diferența de curent din legătura DC și starea de încărcare a bateriei. Pe cealaltă parte, aflându-se semnalele de ieșire care acționează ca și semnale de comandă pentru subsistemele din sistemul eolian. Astfel, se controlează flow-ul energiei către baterie sau invers, prin semnalele Buck, Boost și Battery Control, și producerea de energie de către eoliană prin Wind Turbine Control.

La momentul activării sistemului, FlowChart-ul definește câțiva parametrii interni, aceștia fiind vitezele vântului de activare și oprire a eolienei, dar și viteza ideală de funcționare a acesteia. Vitezele vântului sunt utilizate pentru a respecta diagrama din figura 3.18. Pentru prima și ultima stare, No Wind Speed și High Wind Shut Down se intră inițial în substația de System Off în care toate semnalele de control sunt setate pe 0, mai puțin bateria (în No Wind Speed), care trebuie să țină cont de SOC-ul de pornire. Dacă există cerere din rețea, dar nu există vânt, se trece în starea de Battery Discharge, unde se activează subsistemele Boost și Battery. Această stare este menținută până în cazul în care starea de încarcare a bateriei SOC scade sub 20%. Din Battery Discharge, dacă cererea din rețea este 0, sistemul trece în System Off, dacă în schimb există cerere, și  $SOC < 20\%$ , se trece în starea de Battery Maintenance, unde controlul Boost și Battery trec pe 0, până când cererea dispare.

Pentru stările Optimal Wind Power Production și Power Limitation, se intră inițial în Battery Maintenance, unde semnalele de control pentru convertoare și baterie sunt 0, dar Wind Turbine Control se activează încrucișat există putere produsă de eoliană. Apoi, în funcție de SOC și diferența de curent din legătura DC, se trece în Charge sau Discharge Battery. Dacă eoliană produce mai mult decât cererea de la rețea, bateria este încărcată cu diferența din legătura DC, dacă în schimb există deficit de energie și această diferență este negativă, bateria se descarcă. Pentru Charge Battery, Buck și Battery sunt activate, iar pentru Discharge Battery ca și în cazurile anterior discutate.

## 4.5 Simularea și Testarea Sistemului Eolian cu Stocare de Energie

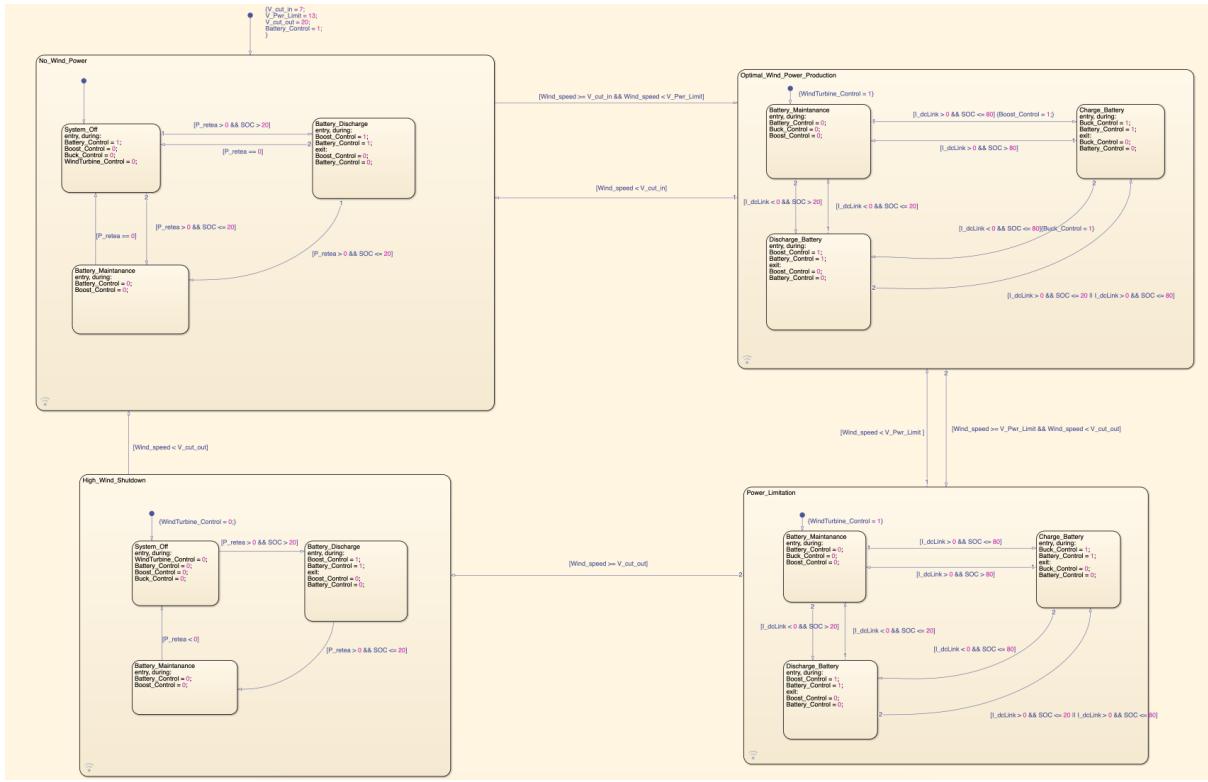


Figura 4.18: Implementarea stărilor de control ale sistemului eolian utilizând FlowChart

## 4.5. Simularea și Testarea Sistemului Eolian cu Stocare de Energie

Simularea și testarea sistemului eolian constă în legarea tuturor subcomponentelor între ele, crearea unui sau unor scenarii de testare și validarea rezultatelor prin verificarea semnalelor importante din sistem. În figura 4.19 este ilustrată schema întregului sistem eolian cu stocare de energie. Subsistemele eoliene și a PMSG-ului sunt încorporate în primul subsistem, acesta este legat prin trei semnale (curenți, tensiuni, putere) la subsistemul redresorului de tensiune AC DC. Aceasta din urmă formează legătura DC. În subsistemul legăturii DC se face diferența dintre puterea produsă de sistemul eolian și puterea cerută din partea rețelei. Cererea este simulată simplu, fără a mai realiza alte conversii de tensiune și curenți din DC în AC. Se consideră strict o valoare de putere sub formă de cerere provenită din partea rețelei. Mai departe, deoarece se operează cu curenți, considerăm diferența discutată anterior sub formă de curent pozitiv sau negativ. Ieșirea sub formă de tensiune DC a redresorului de tensiune este legată la convertorul Buck, totodată, acesta are ca intrări și diferența de putere pentru Look-up Table-ul dintre putere și rezistență și controlul provenit de la controlul supervisor. Curentul DC produs de convertorul Buck este legat la un bloc Switch, împreună cu diferența în curent a legăturii DC. Dacă diferența este negativă, curentul negativ descarcă bateria, altfel, curentul pozitiv provenit din convertorul Buck, o încarcă. Ieșirea bateriei este legată la intrarea Vin a convertorului Boost care va genera energie, dacă există deficit, adică se descarcă bateria. În colțul stânga jos se calculează surplusul sau deficitul de energie, însumând puterile. Pentru o vizualizare mai clară a sistemului s-au utilizat blocuri From și GoTo pentru a nu aglomera sistemul cu fire pentru semnale, colorarea acestora fiind un plus de lizibilitate. Așadar, semnalele care sunt utilizate în FlowChart sunt colorate cu turcoaz, cele de control cu portocaliu și puterile cu galben (exceptând puterea sub

formă de cerere de la rețea). Semnalele de referință pentru sistem sunt viteza vântului și cererea de la rețea, în m/s, respectiv Watts. Generarea scenariilor se poate realiza cu blocul Signal Editor. Astfel, utilizând acest bloc, se generează cele două semnale de referință pentru sistem.

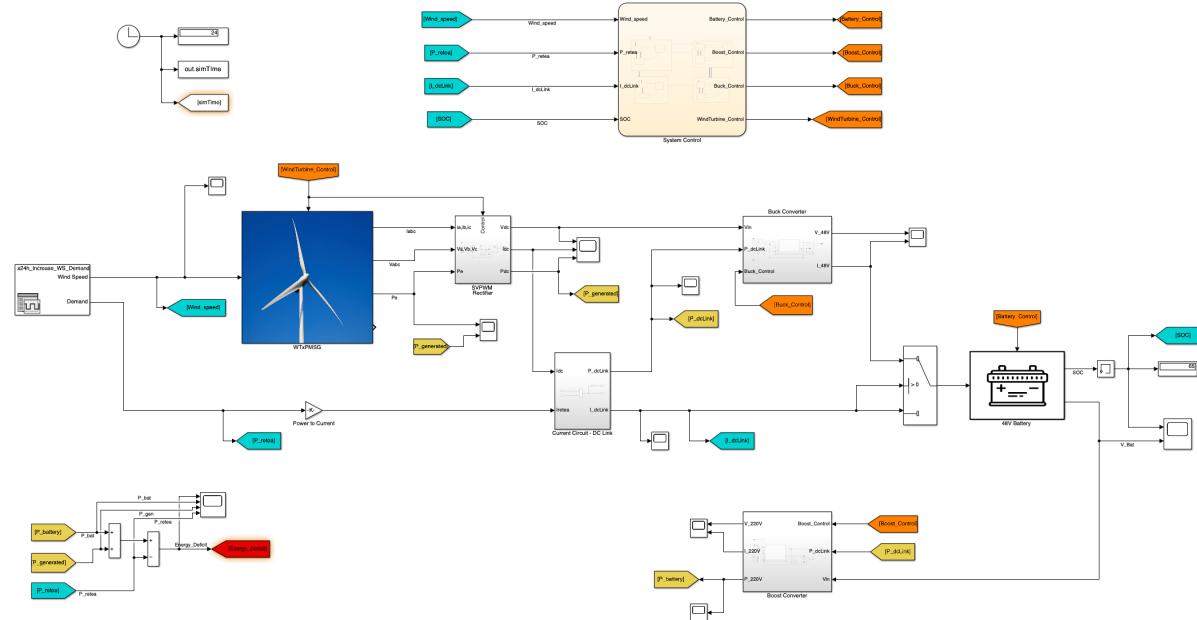


Figura 4.19: Implementarea Simulink a întregului sistem

Simularea are un Stop Time de 24 secunde, deoarece sistemul rulează greoi din pricina perioadei de eșantionare în valoare de  $10^{-6}$ , fără de care dinamica generatorului PMSG nu ar putea fi surprinsă. De altfel, timpii de tranziție între stările staționare sunt foarte mici, astfel că nu influențează negativ sistemul și se poate simula pentru perioade scurte de timp, dar cu multe puncte de tranziție pentru a cuprinde cât mai multe scenarii în care să se afle sistemul. Singurul subsistem unde nu sunt vizibile schimbări mari într-un timp atât de scurt este bateria. Se poate observa încărcarea cât și descărcarea acesteia, dar diferențele sunt mici. De altfel, pentru monitoarizarea semnalelor sunt folosite blocuri de tip Scope, dar se poate utiliza și Data Inspector, împreună cu Log Signal și Log State. Log State este utilizat pentru vizualizarea schimbării stărilor din FlowChart.

În figura 4.20 este ilustrat scenariul de testare utilizând blocul Signal Editor. În partea de sus este reprezentată viteza vântului, iar în cea de jos, cererea de la rețea în Watts. După cum se poate observa, viteza vântului crește ușor pentru reprezentarea scenariilor de funcționare. Într-adevăr, în acest caz este omisă o viteză de vânt foarte ridicată pentru scenariul High Wind Shutdown, dar restul stărilor sunt acoperite. În același timp, cererea provenită de la rețea crește puțin, în acest caz fiind așteptată o compenșare a deficitului de la baterie, deoarece nu există o viteză a vântului suficient de mare pentru a porni eoliană. După ce se ajunge la cererea maximă de 5000 W, sistemul va trebui să furnizeze puterea maximă extrasă din viteza vântului disponibil, cât și de la baterie, pentru a compensa deficitul existent.

Din răspunsul sistemului ilustrat în figurile 4.21, 4.22 se poate extrage un set de concluzii. Pentru o claritate mai mare, în figura 4.21 cu verde este ilustrată puterea provenită de la rețea, cu albastru puterea extrasă din baterie, cu portocaliu puterea generată de către eoliană și cu roz diferența de putere dintre puterea totală produsă și puterea cerută de la rețea. În primele secunde de funcționare a sistemului apare o cerere

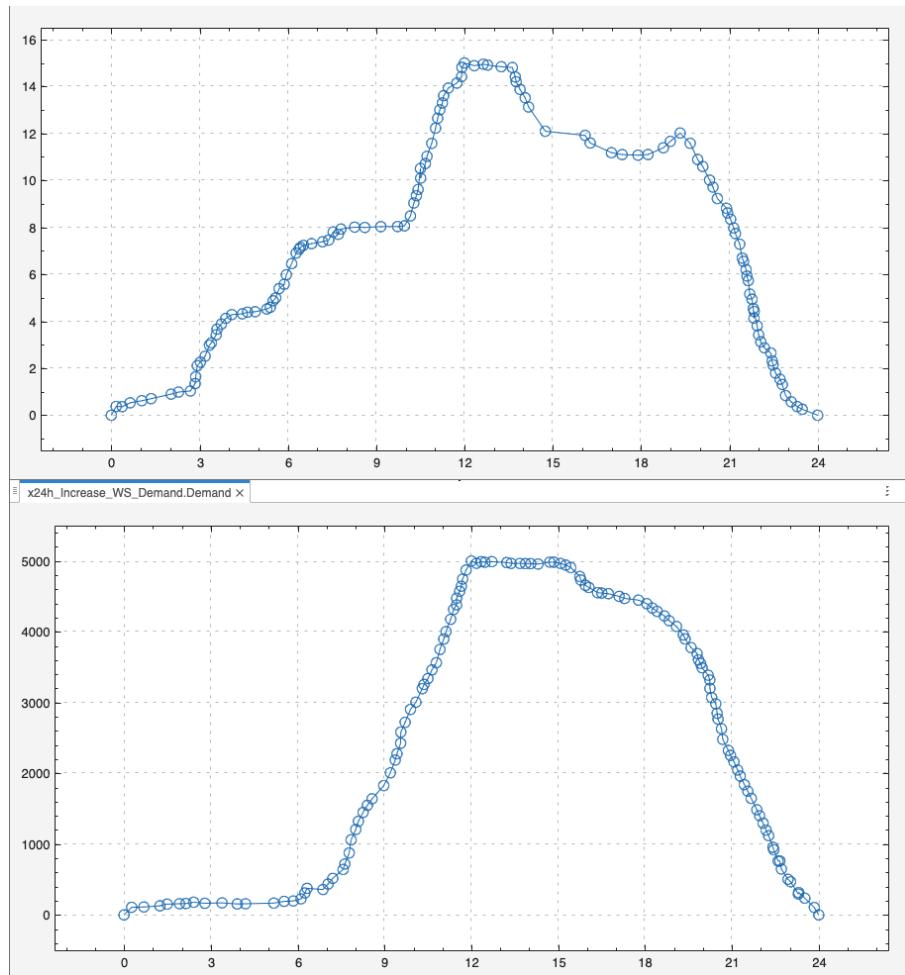


Figura 4.20: Semnalele generate utilizând Signal Editor (sus - viteza vântului, jos - cererea rețelei)

destul de mică de la retea, iar sistemul intră în substarea Battery Discharge din cadrul stării No Wind Power. Pe această porțiune se poate constata faptul că sistemul reușește să extragă din baterie suficientă energie astfel încât să acopere deficitul de energie produs de către cererea din rețea. Astfel, graficul albastru mulându-se după cel verde al cererii, fiind insesabil pe grafic, diferențele care apar în unele situații între cele două semnale fiind de sub 10 W. Așadar, parametrizarea folosită în tabelele Look-Up din Simulink este una suficientă pentru a urmări cererea de putere, variind sarcina rezistivă chiar și la curenți mici care trebuie extrași din sistemul de stocare pe baterii, reducând aproape de, sau chiar la zero deficitul de energie. Mai departe, pe la secunda 7 de simulare, eoliană pornește, producând pentru o perioadă o putere mai mare decât cererea provenită de la rețea. Faptul că în acest moment, excesul de energie încarcă bateria se poate observa și în figura 4.22. În scenariul descris de la secunda 7, este vizibilă diferență pozitivă și în figura 4.21. În continuare, se poate observa că în momentul în care cererea din rețea depășește puterea generată de către turbină, bateria începe să compenseze din acea diferență, menținând aproximativ zero deficitul de energie, oscilațiile pe deficitul de energie fiind foarte scurte, până când sistemul pe baterii reușește să răspundă schimbării cererii din rețea. Faptul că bateria compensează deficitul chiar și la o diferență foarte mică se poate observa și în jurul secundei 12, sau pe final când apare din nou un mic deficit de energie. De altfel, se poate observa în jurul secundei 12 și intrarea în regimul

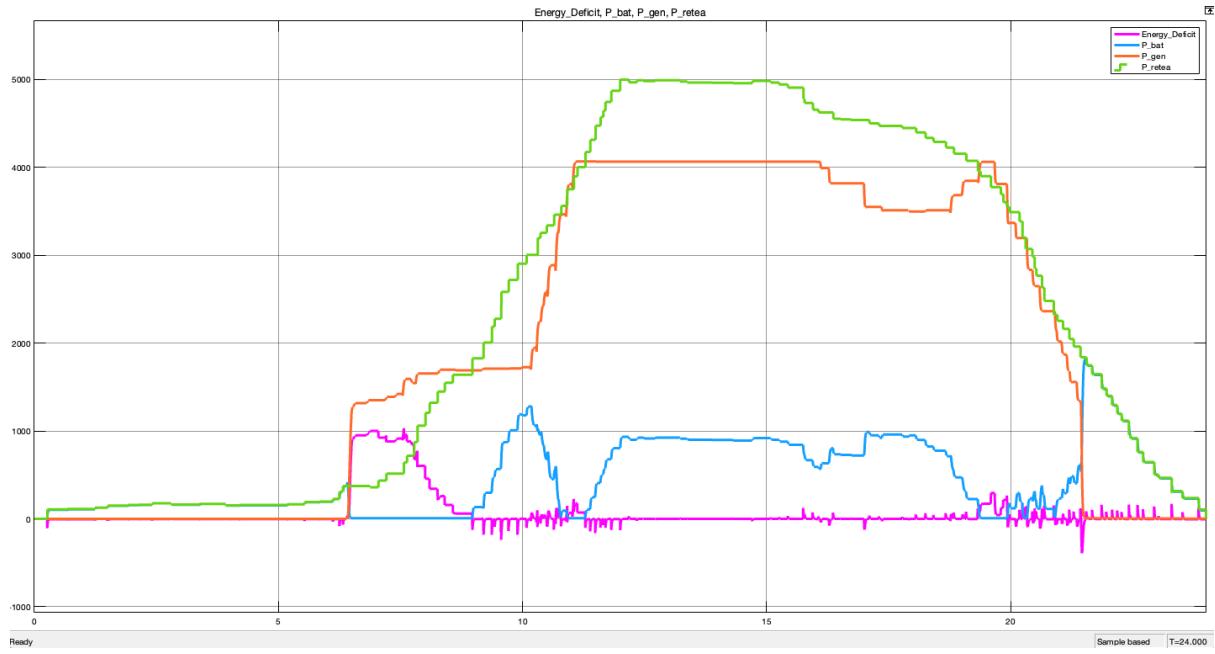


Figura 4.21: Răspunsul sistemului la semnalele de referință reprezentate în figura 4.20

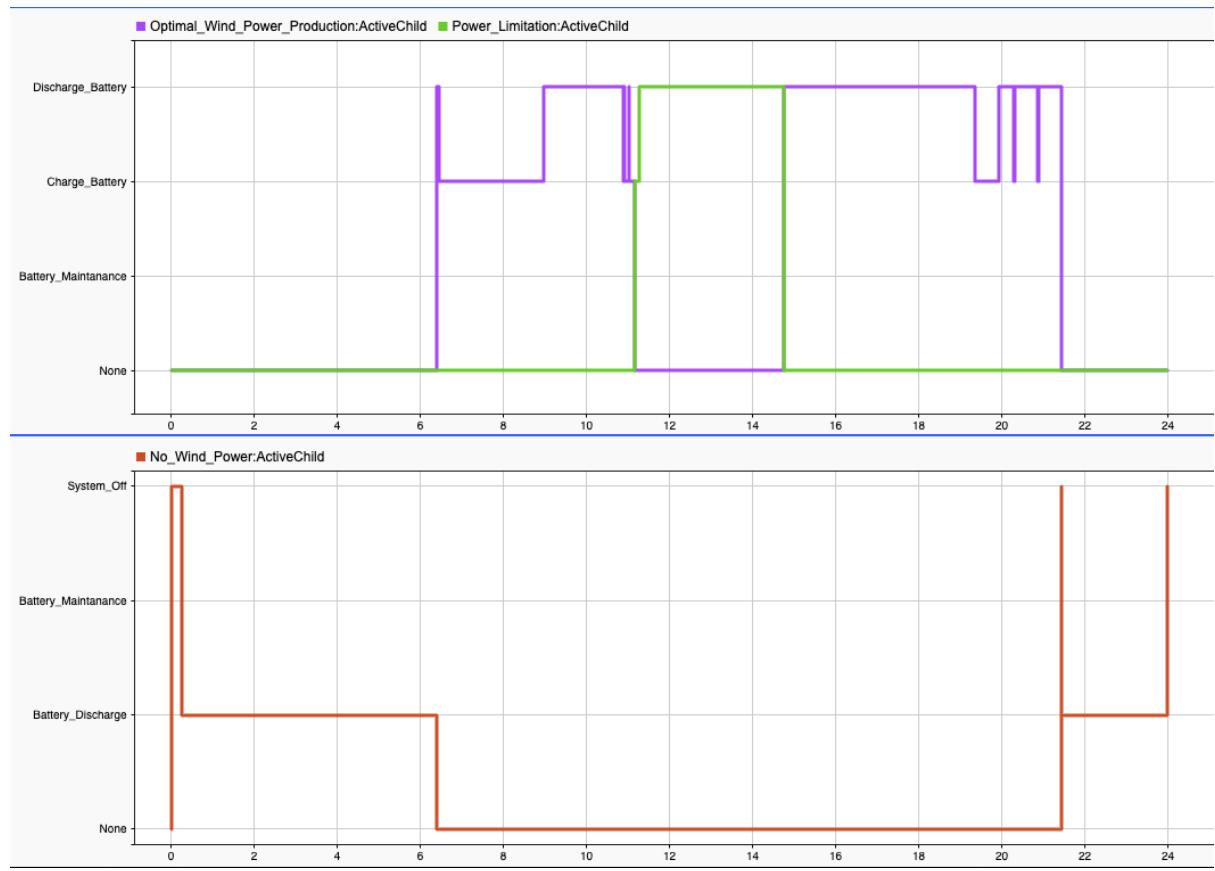


Figura 4.22: Comutarea stărilor sistemului ca răspuns la semnalele de referință 4.20

de Power Limitation, deoarece viteza vântului a depășit pragul de 12 m/s. Aproape de secunda 22, se poate observa din nou o schimbare de regim, în care nu există vânt, iar bateria reușește să elimine cu brio deficitul de energie, chiar și în momentul final, în care

cererea de energie a ajuns din nou foarte mică. Schimbarea de regim mai este sesizabilă și prin prisma faptului că a apărut o mică oscilație pe graficul deficitului, până când sistemul pe baterii compensează lipsa vântului, deci implicit a energiei produse de către sistemul eolian. Iar, pe scăderea cererii, se pot remarca chiar oscilații de surplusuri de energie, din nou, până când sistemul pe baterii se adaptează la schimbările din rețea. În încheierea acestui paragraf, se poate concluziona faptul că sistemul răspunde bine, eliminând cererile provenite de la rețea, atât în prezență, cât și în lipsa vântului, totodată fiind vizibilă și dinamica subcomponentelor ca și răspuns la schimbările din sistem.

## **Capitolul 5. Concluzii**

În concluzie, pe parcursul realizării acestei lucrărari s-au efectuat diferite cercetări și analize de funcționare a diferitelor fenomene fizice mecanice și electrice, dar și a funcționalității elementelor care au trebuit să fie simulate pentru obținerea unui sistem operațional al unei turbine eoliene cu generator PMSG și stocare de energie pe baterii. Mai mult, lucrarea conține de la documentarea întregului proces până la implementarea întregului sistem în mediul de dezvoltare și simulare MATLAB/Simulink.

### **Rezultate obținute**

Conceptul de bază de la care s-a plecat în partea de analiză a fost realizat, având în final un sistem operațional care obține o dinamică reală a fiecărei componente care îl alcătuiesc. Pe lângă dinamica fiecărei componente a fost realizată și conectarea acestora într-un sistem final complet funcțional. Mai mult, s-a realizat și un control atât local pentru unele componente, cât și unul supervizor, care urmărește stările sistemului și ia decizii în consecință, bazat pe o logică de funcționare proiectată. Astfel, partea de "Modelare, control și simulare" din titlul lucrării prezentate a fost obținută cu rezultate bune, sistemul de stocare de energie acopărind sistemul eolian cu brio. De altfel, s-a obținut și un sistem modular scalabil, care poate să fie extins la rang de parc eolian, iar modularitatea vine și din felul în care a fost implementat sistemul, deoarece prin schimbarea parametriilor sistemului, se poate schimba ușor și comportamentul acestuia.

### **Contribuții personale**

În cadrul acestei lucrări, am realizat o serie de contribuții personale pentru soluționarea obiectivelor propuse, amintite și în începutul tezei. În primul rând, am efectuat o analiză și cercetare amănunțită a sistemelor eoliene, pentru a înțelege mai bine principiile și tehnologiile implicate în această industrie. Pe baza acestei cercetări, am proiectat sistemul turbinei eoliene, având în vedere optimizarea performanțelor și eficienței acesteia, mai exact strategia de control MPPT.

Proiectarea generatorului PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator) a fost realizată asigurându-mă că acesta este compatibil cu specificațiile turbinei eoliene. În continuare, am realizat proiectarea convertoarelor de putere necesare pentru conversia și gestionarea energiei generate, astfel încât să fie asigurată o funcționare stabilă și eficientă a întregului sistem.

Proiectarea sistemului de stocare a energiei pe baterii a fost, de asemenea, un aspect important al contribuției mele, deoarece acesta permite stocarea energiei în exces și utilizarea acesteia în perioadele de lipsă a vântului. Pentru controlul acestui sistem, dar și pentru coordonarea cu restul componentelor implementate, am dezvoltat un sistem de control supervisor.

Toate aceste subsisteme amintite mai sus au fost implementate și integrate într-un sistem funcțional complet utilizând mediul de dezvoltare Matlab/SIMULINK. Sistemul a fost testat și analizat în condiții variabile de funcționare pentru a evalua performanțele și pentru a identifica eventualele îmbunătățiri necesare.

### **Direcții de dezvoltare**

Pentru viitor, am identificat mai multe direcții de dezvoltare care ar putea îmbunătăți și extinde proiectul actual. Una dintre acestea este dezvoltarea unei strategii de control

---

MPPT (engl., *Maximum Power Point Tracking*) pentru ajustarea unghiului de înclinare  $\beta$  al palelor turbinei, cu scopul de a maximiza mai mult eficiența energetică a sistemului.

De asemenea, consider că implementarea unui model mai complex, și de ordin superior, pentru sistemul de stocare pe baterii, care să includă și regimul termic, ar putea aduce beneficii semnificative în ceea ce privește gestionarea și durabilitatea bateriilor, iar extinderea sistemului prin adăugarea mai multor turbine eoliene ar putea contribui la creșterea capacitatei totale de producție de energie.

Mai mult, un alt aspect interesant ar fi implementarea unui model pentru partea de rețea, ceea ce ar permite o integrare mai bună a sistemului eolian în rețelele electrice existente. Odată proiectat modelul extins al rețelei, o dezvoltare a unei strategii de control supervizor bazată pe cost minim ar putea optimiza costurile de operare și întreținere ale sistemului.

În final, o strategie de control predictiv bazată pe prognoza meteo ar permite ajustarea anticipativă a funcționării sistemului, asigurând astfel o adaptare mai bună la condițiile meteorologice variabile și, implicit, o eficiență sporită.

## Bibliografie

- [1] Global Wind Energy Council, “Annual wind power capacity installations worldwide from 1998 to 2023 (in megawatts) [graph],” April 17 2024. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/268385/global-new-installed-wind-power-capacity/>
- [2] Ember, “Yearly electricity data,” 2024. [Online]. Available: <https://ember-climate.org/data-catalogue/yearly-electricity-data/>
- [3] International Trade Administration, “Romania - energy,” January 12 2024. [Online]. Available: <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/romania-energy>
- [4] W. Bank, “Technical potential for offshore wind in romania [map],” 2020. [Online]. Available: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/141221587050442759/pdf/Technical-Potential-for-Offshore-Wind-in-Romania-Map.pdf>
- [5] Renewable Energy World, “History of wind turbines,” 2024. [Online]. Available: <https://www.renewableenergyworld.com/storage/grid-scale/history-of-wind-turbines/#gref>
- [6] Turbines Info, “Darrieus wind turbines,” April 15 2019. [Online]. Available: <https://www.turbinesinfo.com/darrieus-wind-turbines/>
- [7] Windmills Tech, “Betz limit,” May 23 2024. [Online]. Available: <https://windmillstech.com/betz-limit/>
- [8] P. Kozak, D. Vallverdu, and D. Rempfer, “Modeling vertical-axis wind turbine performance: Blade element method vs. finite volume approach,” vol. 32, 07 2014.
- [9] J. Chen, W. Yao, C.-K. Zhang, Y. Ren, and L. Jiang, “Design of robust mppt controller for grid-connected pmsg-based wind turbine via perturbation observation based nonlinear adaptive control,” *Renewable Energy*, vol. 134, pp. 478–495, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148118313673>
- [10] S. Samanvorakij and P. Kumkratug, “Modeling and simulation pmsg based on wind energy conversion system in matlab/simulink,” in *Proc. of Second Intl. Conf. on Advances in Electronics and Electrical Engineering*, 2013, pp. 37–41.
- [11] M. Mansour, M. Mansouri, S. Bendoukha, and M. Mimouni, “A grid-connected variable-speed wind generator driving a fuzzy-controlled pmsg and associated to a flywheel energy storage system,” *Electric Power Systems Research*, vol. 180, p. 106137, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779619304560>
- [12] S. G. R. Energy, “Offshore wind turbine sg 14-222 dd,” 2024, siemens Gamesa Product. [Online]. Available: <https://www.siemensgamesa.com/products-and-services/offshore/wind-turbine-sg-14-222-dd>

- [13] D. Li, Y. Li, Y. Zhu, G. Pang, S. Yang, and T. Hu, “A novel control strategy for the pmsg wind turbine integration with battery storage system,” in *2022 12th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES)*, 2022, pp. 795–799.
- [14] H. Wang, J. Yang, Z. Chen, W. Ge, Y. Ma, Z. Xing, and L. Yang, “Model predictive control of pmsg-based wind turbines for frequency regulation in an isolated grid,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. PP, pp. 1–1, 03 2018.
- [15] W. Yin, L. Liu, and X. Rui, “Analysis, modeling and control of a hybrid drive wind turbine with hydrogen energy storage system,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 114 795–114 806, 2020.
- [16] A. G. Abo-Khalil and M. Alobaid, “Optimized control for pmsg wind turbine systems under unbalanced and distorted grid voltage scenarios,” *Sustainability*, vol. 15, no. 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/12/9552>
- [17] C. Viveiros, R. Melício, J. Igreja, and V. Mendes, “Supervisory control of a variable speed wind turbine with doubly fed induction generator,” *Energy Reports*, vol. 1, pp. 89–95, 2015. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484715000153>
- [18] R. Nemes, S. Ciornei, M. Ruba, H. Hedesiu, and C. Martis, “Modeling and simulation of first-order li-ion battery cell with experimental validation,” in *2019 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS)*, 2019, pp. 1–6.
- [19] C. Batard, F. Poitiers, C. Millet, and N. Ginot, “Simulation of power converters using matlab-simulink,” in *MATLAB*, V. N. Katsikis, Ed. Rijeka: IntechOpen, 2012, ch. 3. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5772/46419>
- [20] en:former, “Tu dresden builds huge flywheel storage system for wind turbines,” January 24 2024. [Online]. Available: <https://www.en-former.com/en/tu-dresden-builds-huge-flywheel-storage-system-for-wind-turbines/>
- [21] V. Mihaly, M. Stănescu, M. Șușcă, and P. Dobra, “Interior point methods for renewable energy management,” in *2020 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR)*, 2020, pp. 1–6.
- [22] Technical University of Denmark, “Wind turbine technology,” n.d. [Online]. Available: <https://lifelonglearning.dtu.dk/en/wind-energy/master-en/wind-turbine-technology/>
- [23] P. CN, “Aerodynamic of blade,” n.d. [Online]. Available: <https://www.pengky.cn/zz-horizontal-axis-turbine/04-aerodynamic-of-blade/aerodynamic-of-blade.html>

## Anexa A. Secțiuni relevante din cod

```
/** Inversa Transformatei Clarke-Park

function [Ia, Ib, Ic] = Inverse_ClarkePark_Current(Id, Iq, theta)

if isempty(theta)
    theta = 0;
end

Ialpha = Id .* cos(theta) - Iq .* sin(theta);
Ibeta = Id .* sin(theta) + Iq .* cos(theta);

Ia = Ialpha;
Ib = Ialpha * (-1)/2 + Ibeta * sqrt(3)/2;
Ic = Ialpha * (-1)/2 - Ibeta * sqrt(3)/2;

end

/** Transformata Clarke-Park
function [Vd, Vq] = ClarkePark(Va, Vb, Vc, theta)

if isempty(theta)
    theta = 0;
end

Valpha = 2/3 * (Va - 0.5 * Vb - 0.5 * Vc);
Vbeta = 2/3 * (sqrt(3)/2 * Vb - sqrt(3)/2 * Vc);

Vd = Valpha .* cos(theta) + Vbeta .* sin(theta);
Vq = -Valpha .* sin(theta) + Vbeta .* cos(theta);

end
```