



UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚĂ ȘI
TEHNOLOGIE POLITEHNICA BUCUREȘTI



ȘCOALA DOCTORALĂ DE INGINERIE ELECTRICĂ

TEZĂ DE DOCTORAT

-REZUMAT-

**CONTRIBUȚII PRIVIND REALIZAREA UNUI SISTEM HIBRID DE ALIMENTARE
CU SURSE REGENERABILE DE ENERGIE**

Coordonator științific:

Prof.univ.dr.ing. Mihai Octavian POPESCU

Doctorand:

Ing. Ciprian POPA

*București
2025*

CUPRINS

CAPITOLUL 1 - INTRODUCERE	4
1.1. FORMULAREA PROBLEMEI.....	4
1.2. OBIECTIVELE CERCETĂRII	4
1.3. STRUCTURA ȘI CONȚINUTUL TEZEI.....	4
CAPITOLUL 2 - STADIUL ACTUAL AL SURSELOR REGENERABILE DE ENERGIE	6
2.1. CONCEPTE TEHNOLOGICE ALE TURBINELOR EOLIENE	6
2.2. CONCEPTE TEHNOLOGICE ALE PANOURILOR FOTOVOLTAICE	6
CAPITOLUL 3 - PRINCIPII FUNDAMENTALE ALE SURSELOR REGENERABILE DE ENERGIE.....	7
3.1. TEHNOLOGIA TURBINELOR EOLIANE	7
3.2. TEHNOLOGIA PANOURILOR FOTOVOLTAICE	9
3.3. TEHNOLOGIA DE STOCARE A ENERGIEI	9
3.4. STUDII ASUPRA SISTEMELOR HIBRIDE DE GENERARE A ENERGIEI	10
CAPITOLUL 4 - MODELE MATEMATICE ȘI SIMULAREA PERFORMANȚELOR SISTEMELOR HIBRIDE ÎN SIMULINK	11
4.1. TURBINA EOLIANĂ CU AX ORIZONTAL	11
4.1.1. Modele matematice ale sistemului de conversie a energiei eoliene	11
4.1.2. Simularea modelului matematic eolian	12
4.1.3. Rezultate simulate	13
4.2. PANOURI FOTOVOLTAICE.....	14
4.2.1. Modele matematice pentru sistemul de conversie a energiei fotovoltaice.....	14
4.2.3. Simularea modelului matematic fotovoltaic	15
4.2.4. Rezultate simulate	16
4.3. SIMULAREA INTEGRATĂ A SISTEMULUI HIBRID	17
CAPITOLUL 5 - IMPLEMENTARE EXPERIMENTALĂ ȘI CONTRIBUȚII LA OPTIMIZAREA PERFORMANȚELOR SISTEMELOR HIBRIDE	19

Contribuții privind realizarea unui sistem hibrid de alimentare cu surse regenerabile de energie	
5.1. PROIECTAREA SISTEMULUI EOLIAN.....	19
5.1.1. Realizarea experimentală a sistemului eolian.....	19
5.1.2. Rezultate experimentale	20
5.1.3. Validarea datelor experimentale și simulate	21
5.2. PROIECTAREA SISTEMULUI FOTOVOLTAIC.....	21
5.2.1. Realizarea experimentală a sistemului fotovoltaic	21
5.2.2. Rezultate experimentale	22
5.2.3. Validarea datelor experimentale și simulate	23
5.3. PROIECTAREA SISTEMUL HIBRID	24
5.3.1. Realizarea sistemului hibrid de generare a energiei	24
5.3.2. Rezultate experimentale obținute în urma testării sistemului hibrid de energie	25
5.3.3. Validarea datelor experimentale și simulate	26
CAPITOLUL 6 - CONCLUZII ȘI PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE	28
6.1. CONTRIBUȚII PERSONALE	28
BIBLIOGRAFIE	29

CAPITOLUL 1 – INTRODUCERE

1.1. FORMULAREA PROBLEMEI

Cercetarea explorează integrarea eficientă a energiei eoliene și solare într-un sistem hibrid de alimentare, cu scopul de a dezvolta o soluție sustenabilă și optimizată pentru cerințele energetice actuale. Studiul se axează pe două direcții principale:

- *Gestionarea energiei într-un sistem hibrid.* Acest aspect implică coordonarea energiei generate de turbinele eoliene și panourile fotovoltaice, asigurând continuitatea alimentării consumatorilor, în ciuda variabilității condițiilor de mediu. Capitolul 5 abordează proiectarea sistemului hibrid folosind componente tehnologice compatibile, controlere și invertoare performante. Soluțiile implementate au vizat minimizarea pierderilor, maximizarea eficienței și soluționarea problemelor întâmpinate, precum conexiuni sau limitări ale echipamentelor.
- *Validarea experimentală a modelelor matematice.* Experimentele au comparat rezultatele simulărilor realizate în Matlab (Simulink) cu datele obținute din testarea practică a sistemului hibrid. În capitolul 4, s-au dezvoltat modele matematice și scheme bloc detaliate pentru fiecare sursă regenerabilă și pentru sistemul integrat, analizând interacțiunile și performanțele acestora în condiții variate de funcționare. Acest proces a permis evaluarea completă a eficienței și adaptabilității sistemului.

Prin integrarea surselor regenerabile și optimizarea fluxurilor energetice, cercetarea contribuie la dezvoltarea unui sistem hibrid sustenabil, capabil să răspundă cerințelor energetice actuale și să se adapteze la condițiile de mediu schimbătoare.

1.2. OBIECTIVELE CERCETĂRII

Această cercetare urmărește dezvoltarea, optimizarea și validarea unui sistem hibrid de alimentare bazat pe surse regenerabile, combinând turbine eoliene și panouri fotovoltaice. Obiectivele cercetării sunt detaliate și urmăresc îndeplinirea unor direcții esențiale pentru optimizarea și implementarea unui sistem eficient și sustenabil, prin urmare, teza de doctorat își propune să urmărească:

1. *Analiza literaturii de specialitate* - Identificarea progreselor tehnologice și analiza componentelor sistemelor hibride (turbine, panouri fotovoltaice, baterii de acumulatori, invertoare, controlere) pentru un management energetic optim.
2. *Dezvoltarea modelelor matematice* - Crearea și simularea modelelor matematice în Matlab (Simulink), luând în considerare factori meteorologici și variabilele unui mediu fluctuant, pentru a optimiza performanța energetică. Validarea experimentală a modelului prin comparație cu rezultatele simulărilor și elaborarea unui model matematic original, capabil să analizeze influența factorilor de mediu asupra producției de energie
3. *Implementarea și testarea experimentală* - Construirea unui prototip funcțional, realizarea unui sistem hibrid autonom eolian-fotovoltaic, testat în condiții reale pentru calibrarea și validarea modelelor matematice care demonstrează eficiența și aplicabilitatea sistemului.

Studiul contribuie semnificativ la optimizarea sistemelor hibride, îmbunătățind anticiparea și gestionarea producției de energie în funcție de condițiile externe.

1.3. STRUCTURA ȘI CONȚINUTUL TEZEI

Teza de doctorat este structurată în șase capitole care urmăresc dezvoltarea, simularea și validarea unui sistem hibrid eolian-fotovoltaic bazat pe surse regenerabile de energie.

Capitolul 1 - Introducerea, contextualizează cercetarea, evidențiând importanța surselor regenerabile și obiectivele tezei.

Capitolul 2 - Stadiul actual de dezvoltare, analizează progresele din domeniul surselor regenerabile de energie, cu accent pe turbinele eoliene și panourile fotovoltaice.

Capitolul 3 - Principii fundamentale, abordează fundamentele sistemelor hibride, incluzând componente precum turbinele eoliene, panourile fotovoltaice, bateriile de acumulatori, invertoarele și controlerele. Analiza se bazează pe un număr de peste 100 de articole din baze de date internaționale.

Capitolul 4 - Modele matematice și simularea performanțelor sistemelor hibride, prezintă algoritmi matematici pentru estimarea producției energetice, simulați în Matlab (Simulink), și un model original de analiză a performanței sistemului.

Capitolul 5 - Implementare experimentală și contribuții la optimizarea performanțelor sistemelor hibride, descrie realizarea și testarea prototipului sistemului hibrid, validând rezultatele experimentale cu cele simulate.

Capitolul 6 - Concluzii și perspective de dezvoltare, rezumă principalele contribuții originale și propune direcții viitoare de cercetare.

Această cercetare aduce contribuții teoretice și practice importante, validând utilitatea și eficiența sistemelor hibride în diverse condiții de mediu.

CAPITOLUL 2 - STADIUL ACTUAL AL SURSELOR REGENERABILE DE ENERGIE

2.1. CONCEPTE TEHNOLOGICE ALE TURBINELOR EOLIENE

Sistem eolian de turbine fără pale

Turbinele eoliene fără pale utilizează rezonanța aeroelastică pentru a converti energia vântului în electricitate, oferind avantaje precum costuri reduse, lipsa componentelor rotative, și funcționare la viteze mici ale vântului; totuși, eficiența lor variază cu viteza vântului, motiv pentru care cercetările propun soluții precum elastomerii magnetoreologici pentru ajustarea rezonanței, contribuind astfel la o energie mai sustenabilă și ecologică [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7].

Sistem eolian de turbine pasive

Tehnologia turbinelor eoliene pasive se bazează pe efectul Venturi. Când un fluid curge printr-o secțiune îngustată formată între două profile optim configurate, are loc o scădere a presiunii, iar aerul este aspirat din marginile canalului. Astfel prin amplasarea unui rotor de mici dimensiuni captează energia vântului, oferind un sistem silențios, cu întreținere redusă, prietenos cu mediul și eficient în generarea energiei electrice [8], [9], [10], [11], [12].

Sistem eolian modular cu multi-rotor

Sistemul eolian modular cu multi-rotor, bazat pe un design inovator ce integrează turbine mai mici într-o structură verticală, optimizează captarea energiei din fluxurile de vânt prin eliminarea mecanismelor active de orientare și reducerea dependenței de fluctuațiile direcționale, oferind o alternativă eficientă și economică la turbinele convenționale de mari dimensiuni [13], [14], [15], [16], [17].

2.2. CONCEPTE TEHNOLOGICE ALE PANOURILOR FOTOVOLTAICE

Sisteme fotovoltaice bifaciale

Sistemele fotovoltaice bifaciale, dotate cu celule solare pe ambele fețe și un strat transparent, captează atât lumina directă, cât și cea difuză sau reflectată, generând cu până la 35-40% mai multă energie comparativ cu panourile monofaciale, mai ales când sunt integrate cu mecanisme de urmărire a soarelui [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25].

Panourile fotovoltaice transparente

Panourile fotovoltaice transparente, cu aplicații extinse în agricultură și clădiri urbane, combină generarea eficientă de energie cu protecția culturilor și stocarea optimă a produselor agricole, în timp ce sistemele agrivoltaice amplifică producția de biomasă și energie pe aceeași suprafață; utilizând tehnologia concentratoarelor solare luminescente transparente, acestea ating o eficiență de 10,8% și transparență de 45,8%, maximizând conversia radiațiilor ultraviolete și infraroșii [26], [27], [28], [29], [30].

Tehnologia panourilor solare transparente aduce o inovație majoră în energia regenerabilă, integrându-se în suprafețe vitrate ale clădirilor pentru a genera electricitate din spectrul solar fără a compromite iluminatul natural, contribuind astfel la eficiența energetică, reducerea costurilor de climatizare și dezvoltarea de infrastructuri sustenabile compatibile cu diverse tipuri de arhitectură [27], [29], [30].

CAPITOLUL 3 –PRINCIPII FUNDAMENTALE ALE SURSELOR REGENERABILE DE ENERGIE

De-a lungul istoriei, energia a fost un element central în dezvoltarea umanității, însă dependența excesivă de combustibili fosili, precum cărbunele, petrolul și gazele naturale, a generat efecte adverse, inclusiv încălzirea globală și schimbări climatice. Resursele tradiționale sunt finite, iar tranziția către surse regenerabile, cum ar fi energia solară, eoliană, hidroelectrică și geotermală, devine esențială, fiind necesare cercetări pentru a îmbunătăți eficiența, costurile și stabilitatea acestora [31], [32], [33].

Energia regenerabilă, derivată din surse cu auto-regenerare precum soarele, vântul, apa și biomasa, este utilizată pentru a produce energie electrică, combustibili și căldură, având avantaje precum impact redus asupra mediului și potențial practic nelimitat. Deși surse precum energia hidroelectrică, eoliană și solară sunt printre cele mai utilizate la nivel global, acestea se confruntă cu provocări precum intermitența și imprevizibilitatea, ceea ce afectează funcționarea eficientă a sistemelor energetice și fezabilitatea economică [34], [35].

În ultimele două decenii, capacitatea surselor regenerabile de energie a crescut semnificativ, cu ritmuri de creștere remarcabile în cazul energiei eoliene și solare [36], [37].

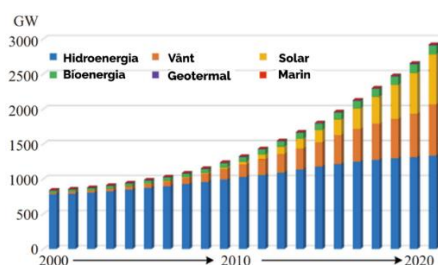


Fig. 3.1. Capacitatea globală acumulată a surselor regenerabile de energie din 2000-2020 pe baza datelor disponibile de IRENA [36], [37]

3.1. TEHNOLOGIA TURBINELOR EOLIANE

Energia eoliană a evoluat semnificativ din 2013, de la turbine mici la turbine cu multimegawați, care sunt acum integrate pe scară largă în rețelele electrice și centrale eoliene. Deși turbinele eoliene sunt tot mai eficiente, cercetările continuă pentru a optimiza performanța și costurile acestora, implementând noi generatoare și tehnologii de control pentru integrarea mai eficientă în rețelele electrice [38], [39], [40], [41].

Turbinele moderne utilizează principiul portanței aerodinamice și pot fi clasificate în două tipuri, cu axă orizontală sau verticală (rezistența aerodinamică), având diverse sisteme de control pentru a maximiza producția de energie, în funcție de viteza vântului. Totuși, în condiții de vânt variabil, turbinele nu funcționează întotdeauna la puterea maximă, iar controlul vitezei de rotație sau al unghiului palelor este esențial pentru optimizarea producției [42], [43], [44].



Fig. 3.2. Clasificarea turbinelor după poziția axului turbinei

Producerea de electricitate prin turbine eoliene aduce beneficii semnificative, cum ar fi eliminarea emisiilor poluante și costurile mici de operare, fără a produce deșeuri. Turbinele eoliene cu axă verticală sunt omnidirecționale și au avantaje precum instalarea mai joasă și întreținerea mai ușoară, dar sunt mai puțin eficiente comparativ cu cele cu axă orizontală, care, deși mai complexe, oferă randamente mai mari și sunt preferate în aplicațiile moderne de energie eoliană [42], [43], [45], [46], [47].

Dezavantajele turbinelor eoliene includ poluarea fonică și vizuală, precum și instabilitatea producției de energie din cauza vântului variabil. Cu toate acestea, prin progrese tehnologice, zgomotul a fost redus semnificativ, iar dezvoltarea ulterioară poate extinde utilizarea acestora în zone cu potențial eolian limitat [45].

Turbinele eoliene captează energia vântului prin rotorul reglat constant pentru a se orienta perpendicular pe direcția vântului, convertind energia cinetică a vântului în energie mecanică. Mișcarea rotorului este generată de diferența de presiune dintre partea expusă și cea opusă a palelor, iar energia mecanică este transformată în energie electrică printr-un generator. În zona de viteză medie a vântului, sistemul optimizează randamentul conversiei prin controlul unghiului de pas și al vitezei de rotație pentru a menține un coeficient de putere optim și un control al cuplului generatorului [45], [48], [49].

Sistemul de conversie a energiei eoliene include trei componente majore: mecanice, electrice și de control, și este structurat în trei etape principale: transformarea energiei cinetice a vântului în energie mecanică, conversia energiei mecanice în electricitate prin generator, și conectarea la rețeaua electrică printr-un convertor de putere. Componentele cheie pentru această conversie sunt rotorul, cutia de viteze (în cazul soluțiilor fără antrenare directă), generatorul electric, convertorul de putere și transformatorul [50], [51], [52].

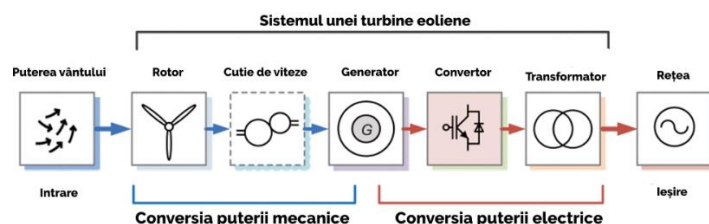


Fig. 3.3. Etape tipice de conversie a puterii într-o turbină eoliană cu ax orizontal [52]

Principalele componente ale unei turbine cu ax orizontal sunt (Fig. 3.4.): 1. Pală 2. Suportul palelor 3. Dispozitiv de acționare pentru unghiul de atac 4. Butuc 5. Carcasa rotorului 6. Suport principal 7. Arbore principal 8. Luminile de avertizare pentru aeronave 9. Cutie de viteze 10. Frâne mecanice 11. Dispozitive hidraulice de răcire 12. Generator 13. Convertor de putere și dispozitive electrice de control, protecție și deconectare 14. Transformator 15. Anemometru 16. Cadru al nacelei 17. Turn de susținere 18. Sistem de pivotare [53].

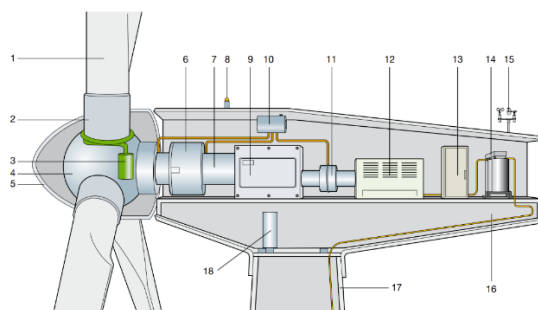


Fig. 3.4. Principalele componente ale unei turbine cu ax orizontal [53]

3.2. TEHNOLOGIA PANOURILOR FOTOVOLTAICE

Sursele regenerabile de energie sunt considerate o opțiune tehnologică pentru generarea de energie curată. Unul dintre aceste sisteme care a atras un interes deosebit este cel fotovoltaic, fiind considerat una dintre cele mai promițătoare surse de energie regenerabilă [54]. Sistemul de energie fotovoltaică atrage din ce în ce mai mult interes, datorită utilizării energiei solare nepoluante, regenerabile și gratuite, odată cu preocupările tot mai mari cu privire la problemele de mediu și criza energetică mondială [55], [56], [57], [58].

Principiul de funcționare al celulelor solare (Fig. 3.5.), se bazează pe efectul fotovoltaic, care presupune unirea a două materiale semiconductoare de tip n și p, creând o diferență de potențial, iar fotonii din radiația solară transferă energie electronilor, eliberându-i din rețeaua cristalină. Această diferență de potențial provoacă un flux organizat de purtători foto-generați (electroni și goluri), iar prin intermediul contactelor din celulă, se formează un circuit extern ce permite circulația unui curent electric pentru a furniza energie utilă [59].

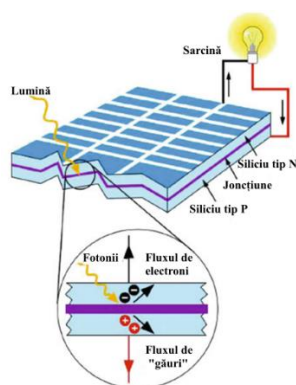


Fig. 3.5. Principiul de funcționare a celulei solare [59]

Sistemul fotovoltaic este alcătuit din patru blocuri principale: sursa de energie, convertorul c.c. - c.c., sarcina și controlerul, iar rolul convertorului static de putere este de a ajusta impedanța pentru a asigura livrarea maximă de energie de către panou. Modulul fotovoltaic are o caracteristică neliniară de putere-tensiune cu un punct de vârf (punctul de putere maximă - MPPT) unde sistemul funcționează la randament maxim, iar intensitatea radiației solare determină variabilitatea puterii generate. Tehnica MPPT, combinată cu un convertor c.c. - c.c., optimizează puterea extrasă din sistemul fotovoltaic, maximizând astfel randamentul panourilor în condiții climatice schimbătoare [60], [61], [62].

3.3. TEHNOLOGIA DE STOCARE A ENERGIEI

Stocarea energiei a devenit o componentă esențială în dezvoltarea sistemelor energetice inteligente, atrăgând atenția organizațiilor internaționale și a țărilor care au formulat strategii pentru implementarea acestora. Tehnologiile recente de stocare oferă o soluție pentru a face față intermitenței energiei eoliene și fotovoltaice, care sunt influențate de condițiile meteorologice, iar fluctuațiile de putere pot afecta frecvența și tensiunea rețelei. Integrând sisteme de stocare a energiei în producția de energie regenerabilă, se pot reduce fluctuațiile de putere, menținând stabilitatea sistemului și minimizând impactul asupra rețelei [63], [64], [65], [66], [67], [68], [69], [70], [71].

Tehnologia de stocare a energiei implică transformarea energiei dintr-o formă într-alta, astfel încât să poată fi păstrată pentru o utilizare ulterioară. Energia ar putea fi rezervată în diferite medii și apoi convertită înapoi în energie electrică atunci când este necesar.

3.4. STUDII ASUPRA SISTEMELOR HIBRIDE DE GENERARE A ENERGIEI

Energia solară și eoliană sunt surse regenerabile larg utilizate, dar din cauza variabilității impuse de factori precum sezonul, geografia și clima, ele prezintă o incertitudine ridicată, ceea ce poate duce la instabilitate energetică. Combinarea celor două surse, cu ajutorul unui sistem hibrid c.c. - c.a., permite o generare complementară a energiei, îmbunătățind fiabilitatea și reducând dependența de o singură sursă. În sistemele izolate, problema excesului de energie trebuie gestionată, dar acest lucru poate afecta performanța sistemului [72], [73], [74], [75], [76].

Sistemul hibrid este alcătuit în principal din următoarele părți, cum ar fi grupul generator de energie fotovoltaică, partea generatoare de energie eoliană, controler, baterii de acumulatori și invertor, iar structura sistemului este prezentată în Fig. 3.6. [72], [77].

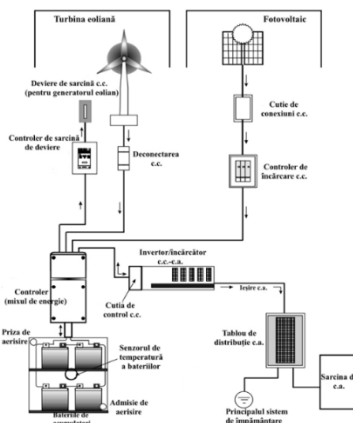


Fig. 3.6. Diagrama schematică a sistemului hibrid eolian fotovoltaic autonom [77]

Energia fotovoltaică are ca rezultat producerea unui curent continuu din radiația solară, în timp ce energia eoliană provine din energia cinetică a vântului care produce energie electrică adesea sub formă de curent alternativ. Dacă combinăm cele două surse de energie putem obține nu doar o putere maximă, ci și un sistem optim și o productivitate mai favorabilă, care să se potrivească nevoilor noastre [78], [79].

Capacitatea totală a unui sistem hibrid eolian fotovoltaic este determinată pe baza cererii anuale estimate de putere, a vitezei medii a vântului și a radiației solare. Fiecare sursă regenerabilă de energie este definită pe baza condițiilor reale de mediu. Pentru a îmbunătăți performanța unui sistem hibrid în diferite condiții de funcționare și de mediu, este luată în considerare urmărirea punctului de putere maximă a sistemului fotovoltaic și controlul pasului de înclinare a palelor turbinelor [80]. Sistemul hibrid este ales datorită faptului că utilizarea a două surse conectate are o rată mai eficientă decât sistemele convenționale bazate doar pe o singură sursă regenerabilă de energie [81].

Există două obiective importante în proiectarea strategiei de control pentru sistemele hibride cu surse regenerabile de energie. O problemă importantă este extragerea maximă de energie, deoarece aceste surse de energie furnizează o cantitate diferită de putere a sistemului de alimentare în diferite condiții [82]. Panoul fotovoltaic și turbina eoliană oferă o energie foarte fluctuantă și depinde enorm de condițiile meteorologice. Pentru a depăși aceste probleme, randamentul energetic poate fi supravegheat de algoritmi MPPT [83]. Cealaltă problemă este reglarea tensiunii de ieșire în jurul unei valori predeterminate, în acest caz, tensiunea de ieșire a convertorului c.a./c.c. trebuie controlată astfel încât invertorul c.c./c.a. să livreze tensiunea corespunzătoare pe partea c.a. [82]. Prin urmare, este foarte important să oferim soluții pentru o sursă continuă și fiabilă de energie electrică în zonele îndepărtate. Sistemele de alimentare hibride s-au dovedit a fi o opțiune viabilă [84].

CAPITOLUL 4 - MODELE MATEMATICE ȘI SIMULAREA PERFORMANTELOR SISTEMELOR HIBRIDE ÎN SIMULINK

4.1. TURBINA EOLIANĂ CU AX ORIZONTAL

4.1.1. Modele matematice ale sistemului de conversie a energiei eoliene

Generarea de energie electrică prin turbinele eoliene este rezultatul interacțiunii dintre vânt și palele rotorului, proces prin care energia cinetică a vântului se transformă în energie mecanică de rotație, care ulterior este transformată în energie electrică [53].

În vederea determinării energiei cinetice al unui flux de aer care se deplasează cu viteza, v_1 (m/s), se poate folosi formula astfel [53], [86], [87]:

$$E_c = \frac{m \cdot v_1^2}{2} \quad (4.1)$$

Prin urmare, puterea specifică disponibilă $P_{\text{disponibilă}}$ al unei mase de aer cu capacitate este [53], [87]:

$$P_{\text{disponibilă}} = \frac{dE_c}{dt} = \frac{q \cdot v_1^2}{2} \quad (4.2)$$

Capacitatea poate fi exprimată prin formula:

$$q = \frac{dm}{dt} = m = \rho \cdot S \cdot v_1 \quad (4.3)$$

, numită ecuația continuității, unde m este masa de aer în mișcare (kg/s) și care este influențată la rândul ei de densitatea aerului ρ și de volumul care străbate o suprafață S (m²) a secțiunii transversale a tubului de curent al aerului luat în considerare [53], [86], [87].

Densitatea aerului variază în funcție de presiune și temperatură [42], în conformitate cu legea gazului ideal. Deoarece presiunea și temperatura variază în funcție de altitudinea locului de instalare, combinația lor afectează densitatea aerului, care poate fi derivată din relația simplificată (valabilă până la o altitudine de 6000m) [53]:

$$\rho = \rho_0 - 1.194 \cdot 10^{-4} \cdot h \quad (4.4)$$

, unde ρ_0 reprezintă densitatea aerului standard la nivelul mării (kg/m³), iar h este înălțimea pilonului turbinei deasupra nivelului mării [53].

Având informațiile necesare despre densitate, suprafața expusă și viteză se poate calcula puterea specifică disponibilă al fluxului de aer exprimată în Watt [53], [86], [87]:

$$P_{\text{disponibilă}} = \frac{\rho S v_1^3}{2} \quad (4.5)$$

Un model simplificat, dezvoltat de Albert Betz, este utilizat frecvent pentru a calcula producția de energie a unei turbine eoliene ideale, având o putere incidentă disponibilă descrisă de formula (4.5). Cu cât turbina poate extrage mai multă energie cinetică din vânt, cu atât viteză vântului la ieșirea din turbină va fi mai redusă.

Coeficientul de putere C_p (sau coeficientul de randament) este raportul dintre puterea extrasă și puterea disponibilă a vântului. Acest coeficient se mai numește „limita lui Betz” și care se referă la următorul concept fundamental: „Puterea maximă care poate fi extrasă teoretic din fluxul de aer utilizând o turbină ideală nu poate depăși 59% din puterea disponibilă a vântului incident.”

Pentru determinarea coeficientul de performanță al turbinei, C_p , o ecuație generică este utilizată [53], [87]:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (4.6)$$

unde,

$$\frac{1}{\lambda_t} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (4.7)$$

Coeficienții c_1 până la c_6 sunt: $c_1 = 0.5176$, $c_2 = 116$, $c_3 = 0.4$, $c_4 = 5$, $c_5 = 21$ și $c_6 = 0.0068$. Valoarea maximă a c_p este atinsă pentru $\beta = 0$, unde β este unghiul de înclinare al palelor rotorului [87], [88].

Caracteristicile aerodinamice ale unei pale sunt de obicei definite prin relația dintre viteza la vârf și coeficientul de putere. Raportul vitezei la vârf, identificat prin parametrul λ , este raportul dintre viteza tangențială a vârfurilor palelor și viteza vântului la intrarea în tubul de curgere [53], [87], [88]:

$$\lambda = \frac{v_t}{v_1} = \frac{\omega_r \cdot R}{v_1} \quad (4.8)$$

$$\omega_r = \frac{2\pi n}{60} \quad (4.9)$$

unde, ω_r este viteza unghiulară de rotație a rotorului [rad/s], R este raza rotorului [m], iar n este turația rotorului [rot/min].

Deoarece puterea generată de o turbină eoliană depinde de coeficientul de putere C_p și de puterea disponibilă a vântului, aceasta poate fi exprimată astfel [53]:

$$P = C_p \cdot \frac{\rho S v_1^3}{2} \quad (4.10)$$

Puterea mecanică generată poate fi calculată după cum urmează [53]:

$$P_m = \eta_m \cdot C_p \cdot \frac{\rho S v_1^3}{2} \quad (4.11)$$

Puterea electrică generată poate fi calculată după cum urmează [53]:

$$P_e = \eta_e \cdot \eta_m \cdot C_p \cdot \frac{\rho S v_1^3}{2} \quad (4.12)$$

Puterea electrică utilă generată poate fi calculată după cum urmează [53]:

$$P_u = \eta_{aux} \cdot \eta_e \cdot \eta_m \cdot C_p \cdot \frac{\rho S v_1^3}{2} \quad (4.13)$$

, unde [53]:

- η_m este randamentul mecanic general al sistemului de transmisie;
- η_e este randamentul generatorului electric;
- η_{aux} este randamentul circuitelor auxiliare.

Turbina eoliană cu ax orizontal prin intermediul căreia se dorește colectarea datelor experimentale include pale fixe care rotesc arborele pe care este montat rotorul generatorului sincron cu magneți permanenți. Rotorul este format dintr-un magnet permanent, care generează un câmp magnetic învârtitor obținut pe cale mecanică, ceea ce va duce la generarea de tensiuni electromotoare la nivelul înfășurărilor trifazate ale statorului [89].

4.1.2. Simularea modelului matematic eolian

Prin intermediul software-ului Simulink se va implementa schema bloc al unei turbine eoliene cu ax orizontal analizând modelarea caracteristicilor și al fenomenelor ce apar. Acest lucru implică definirea relațiilor matematice care descriu interacțiunea turbinei cu vântul, generatorul și alte componente ale sistemului. De asemenea, trebuie să se stabilească parametrii turbinei, cum ar fi coeficientul de performanță, unghiul de înclinare al palelor rotorului, etc. pentru a reflecta corect un mediu real.

Pentru a obține valori concrete în simulare, a fost necesar să estimăm pierderile mecanice ale turbinei eoliene din cauza specificațiilor incomplete, luând în considerare pierderi de 1-3% din puterea totală pentru rulmenți de calitate bună și 1-2% pentru frecarea aerodinamică internă.

Astfel, randamentul mecanic general al sistemului de transmisie a fost stabilit la 97%, iar randamentul generatorului la 95%, în timp ce randamentul controlerului eolian a fost considerat 97%. Aceste constante vor fi integrate în schema bloc din Simulink pentru determinarea puterii electrice utile generate de turbina eoliană conform formulei (4.1.).

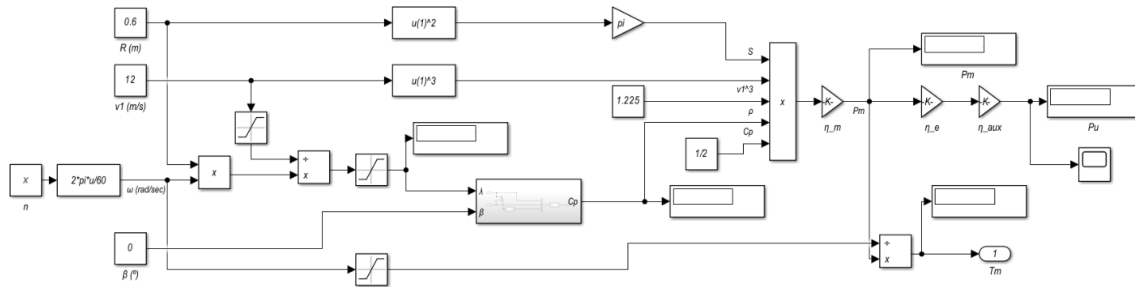


Fig. 4.1. Schema bloc pentru determinarea puterii electrice utile generate de turbina eoliană

În schema bloc din figura 4.1., a fost integrată formula (4.9) pentru determinarea vitezei unghiulare al rotorului în funcție de turație, deoarece în partea experimentală se vor realiza măsurători la diverse viteze ale vântului prin intermediul unui tahometru. Turația rotorului generatorului eolian va fi utilizată ca și dată de intrare în simulare.

4.1.3. Rezultate simulate

Pentru a asigura o precizie cât mai mare a datelor simulate, valorile de intrare au fost preluate din partea experimentală, unde viteza vântului a fost măsurată cu un anemometru, iar turația rotorului a fost determinată cu ajutorul unui tahometru. Această abordare va permite o validare directă a datelor simulate prin compararea lor cu valorile reale măsurate, garantând astfel o corelație strânsă între rezultatele experimentale și cele obținute în simulări.

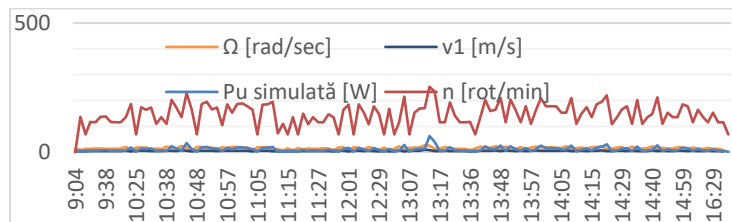


Fig. 4.2. Variația în timp a datelor măsurate și a celor simulate

Analizând graficul valorilor obținute din simulările realizate, se poate observa o relație de proporționalitate directă între puterea electrică utilă generată de turbina eoliană și viteza vântului. Aceasta rezultă din faptul că, pe măsură ce viteza vântului crește, fluxul de aer disponibil pentru rotorul turbinei este mai mare, ceea ce determină o creștere semnificativă a puterii captate și transformate în energie electrică utilă.

Metoda integrării datelor experimentale ca valori de intrare în procesul de simulare a permis o calibrare riguroasă a modelului matematic. Simularea a generat informații detaliate privind coeficientul de performanță, precum puterea electrică utilă generată de turbina eoliană, iar aceste rezultate vor fi ulterior confruntate cu datele experimentale obținute pe parcursul testelor efectuate în condiții reale pe teren.

4.2. PANOURI FOTOVOLTAICE

4.2.1. Modele matematice pentru sistemul de conversie a energiei fotovoltaice

O celulă fotovoltaică poate fi considerată ca un generator de curent și poate fi reprezentată prin circuitul echivalent din Fig 4.3.

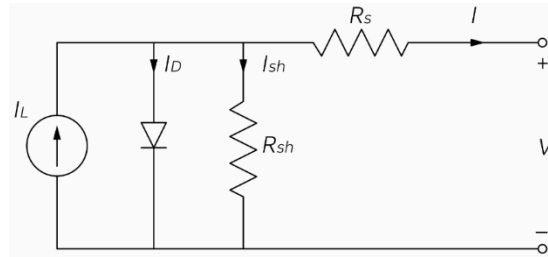


Fig. 4.3. Configurația circuitului echivalent al unei celule fotovoltaice cu o singură diodă [90]

Ecuția de bază pentru configurația circuitului echivalent al unei celule fotovoltaice cu o singură diodă (Fig. 4.3.) este definită folosind legea curenților lui Kirchhoff pentru curentul I [90], [91], [92], [93], [94]:

$$I = I_L - I_D - I_{sh} \quad (4.14)$$

unde:

I , este curentul generat;

I_L , este curentul generat de lumină în celulă;

I_D , este curentul pierdut prin diodă, dependent de tensiune;

I_{sh} , este curentul pierdut din cauza rezistenței în derivație [90], [91], [92], [93].

Curentul generat de lumină în celulă este definit ca:

$$I_L = (I_{sc_T} + K_i(T_c - T_{ref})) \cdot S \quad (4.15)$$

unde:

I_{sc} , este curentul de scurtcircuit în funcție de temperatură;

K_i , reprezintă coeficientul de variație al curentului de scurtcircuit în funcție de temperatură;

T_c , este temperatura unei celule în grade Kelvin (K);

T_{ref} , este temperatura de referință în grade Kelvin (K);

S , este radiația solară în kW/m^2 [91], [92], [93].

Pentru ca radiația solară să fie măsurată în W/m^2 , putem rescrie formula (4.15) astfel:

$$I_L = [I_{sc} + K_i(T_c - T_{ref})] \cdot \frac{S}{1000} \quad (4.16)$$

O altă formulă utilizată în determinarea curentului generat de lumină în celulă este:

$$I_L = [I_{sc} + K_i(T_c - T_{ref})] \cdot \frac{S + S \cdot Alb(1 - \cos \Theta)}{1000} \quad (4.17)$$

unde:

Alb , este albedo-ul;

Θ , este unghiul de incidență al razelor solare pe panoul fotovoltaic.

Curentul de scurtcircuit poate fi definit în funcție de temperatură astfel:

$$I_{sc_T} = I_{sc} [1 + K_i(T_c - T_{ref})] \quad (4.18)$$

În circuitul echivalent la modelul cu o singură diodă, I_D este modelat folosind ecuația Shockley pentru o diodă ideală astfel [90], [91], [92], [93], [94]:

$$I_D = I_0 \cdot \left(e^{\frac{V + IR_s}{nV_T}} - 1 \right) \quad (4.19)$$

unde:

Contribuții privind realizarea unui sistem hibrid de alimentare cu surse regenerabile de energie

n , este factorul de idealitate al diodei, un parametru fără unitate, care pentru o celulă cu o singură joncțiune are valori uzuale cuprinse între 1 și 2;

V , este tensiunea celulei;

R_s , este rezistența serie.

I_0 , este curentul de saturație dat de formula [91], [93]:

$$I_0 = \left(\frac{I_{RS} T_c}{T_{ref}} \right)^3 \cdot e^{\frac{q E_g \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right)}{k n}} \quad (4.20)$$

unde:

E_g , este energia benzii interzise a materialului semiconductor utilizat în celulele solare.

I_{RS} , este curentul de saturație inversă dat de formula [93]:

$$I_{RS} = \frac{I_{sc_T}}{e^{\frac{q V_{oc}}{n k T_c}} - 1} \quad (4.21)$$

unde:

V_{oc} , este tensiunea de circuit deschis

Tensiunea de circuit deschisă poate fi definită în funcție de temperatură astfel:

$$V_{oc_T} = V_{oc} [1 + K_v (T_c - T_{ref})] \quad (4.22)$$

unde:

K_v , este coeficientul de temperatură al tensiunii de circuit deschis;

V_T este tensiunea termică dată de formula [90], [91], [92], [93], [94]:

$$V_T = \frac{k T_c}{q} \quad (4.23)$$

unde:

k , reprezintă constanta lui Boltzmann (1.381×10^{-23} J/K);

q , este sarcina electronului (1.6×10^{-19} C) [90], [91].

I_{sh} , este curentul pierdut din cauza rezistenței în derivație dat de formula [90], [91], [92], [93], [94]:

$$I_{sh} = \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (4.24)$$

unde:

R_{sh} , este rezistența în derivație.

Astfel, curentul furnizat sarcinii este dat de următoarea formulă [90], [91], [92], [93], [94]:

$$I = I_L - I_0 \cdot \left(e^{\frac{V + I R_s}{n V_T}} - 1 \right) - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (4.25)$$

În celulele solare tipice, curentul de scurgere către masă I_{sh} este, de obicei, foarte mic în comparație cu ceilalți doi curenți din ecuație, devenind astfel neglijabil. Astfel, curentul de saturație al diodei poate fi determinat în mod experimental prin aplicarea unei tensiuni de circuit deschis V_{oc} unei celule care nu este expusă luminii și măsurarea curentului care trece prin aceasta [90].

4.2.2. Simularea modelului matematic fotovoltaic

Această secțiune își propune să prezinte procesul de simulare a modelului matematic al unui sistem fotovoltaic în Simulink, subliniind importanța acestuia în evaluarea performanței sistemelor reale. Prin simularea diferitelor situații de operare și prin ajustarea parametrilor de intrare, se pot obține informații valoroase despre comportamentul sistemului fotovoltaic în diferite condiții, contribuind astfel la îmbunătățirea randamentului și fiabilității.

Modelul matematic al panoului fotovoltaic a fost dezvoltat pe baza ecuațiilor fundamentale care descriu comportamentul electric al celulelor solare.

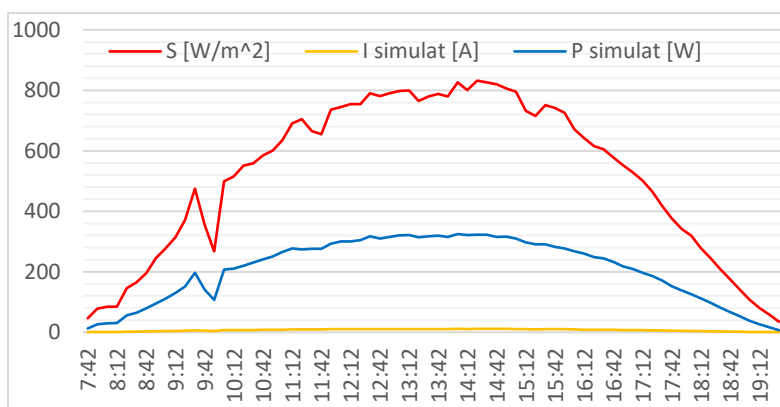


Fig. 4.6. Puterea și curentul simulat în funcție de radiația solară în timp

Metoda utilizării datelor experimentale ca date de intrare în simulare a avut avantajul de a oferi o calibrare precisă a modelului matematic. Simularea a furnizat o serie de date referitoare la puterea generată și curentul produs de panoul fotovoltaic. Aceste rezultate vor fi comparate cu datele experimentale colectate în timpul testelor de pe teren.

4.3. SIMULAREA INTEGRATĂ A SISTEMULUI HIBRID

În acest subcapitol, este prezentată simularea integrată a sistemului hibrid de energie regenerabilă, format din sursele regenerabile de energie: eoliană și fotovoltaică. Simulările pentru fiecare subsistem au fost realizate în Simulink, folosind modele matematice specifice fiecărei tehnologii.

Simularea turbinei eoliene s-a bazat pe parametri cheie, cum ar fi raza rotorului și unghiul de înclinare al palelor, considerate constante, în timp ce variabilele de intrare au inclus viteza vântului și turația rotorului. Pentru sistemul fotovoltaic, albedo-ul a fost tratat ca o valoare constantă, iar variabilele de intrare au inclus radiația solară, temperatura, tensiunea preluată din partea experimentală și unghiul de incidență calculat al razelor solare pe panou.

Simularea sistemului eolian a inclus toate randamentele și pierderile de putere, de la cele mecanice din partea de transmisie până la randamentul generatorului sincron și al controlerului eolian. Ulterior, în cadrul experimentului, se vor obține date privind puterea de ieșire generată de turbină după controlerul eolian, unde a fost integrat un rezistor inteligent pentru măsurarea parametrilor. Aceste valori experimentale vor fi comparate cu datele obținute din simulare.

În simularea sistemului fotovoltaic, raportându-ne la configurația experimentală, măsurătorile vor fi colectate prin intermediul controlerului de încărcare solar, care dispune de porturi de intrare pentru panoul fotovoltaic și de porturi de ieșire pentru bateriile de acumulatori, achiziționând astfel date pentru ambele tipuri de conexiuni. Modelarea matematică a analizat parametrii obținuți de la panoul fotovoltaic, însă pentru o evaluare realistă în etapa finală a sistemului hibrid, datele relevante se referă la încărcarea bateriilor de acumulatori. Prin urmare, este necesară integrarea randamentului controlerului de încărcare solar în schema bloc a simulării sistemului fotovoltaic.

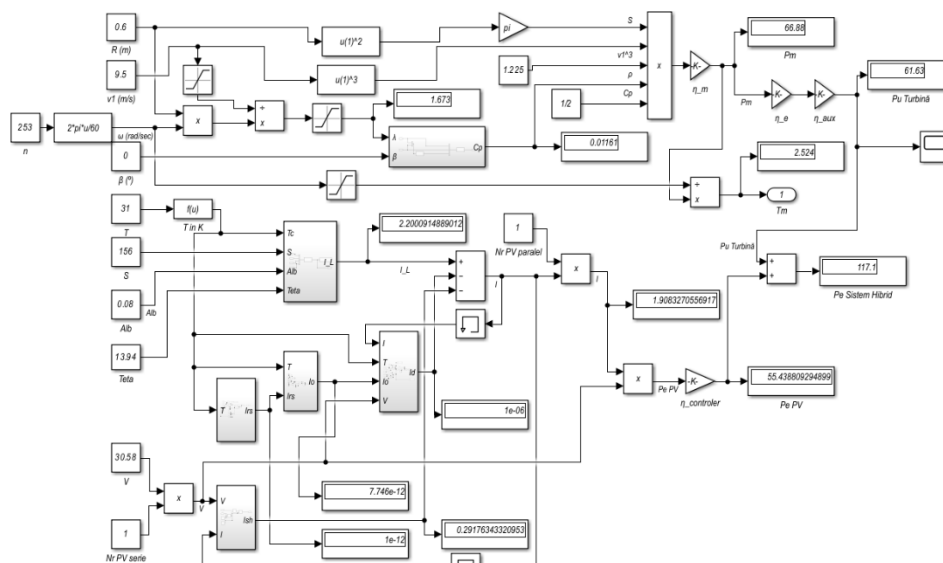


Fig. 4.7. Schema bloc al sistemului hibrid în Simulink

Condițiile de simulare au inclus variațiile parametrilor experimentali menționați anterior ca date de intrare, iar randamentele echipamentelor au fost simplificate, fiind incluse în calcule pentru a evalua performanța globală a sistemului hibrid.

Integrarea simulărilor a fost realizată prin acumularea puterilor generate de fiecare sistem în parte, conform principiului teoretic al conectării surselor regenerabile în paralel, unde puterile electrice se adună [95], [96]. Parametrii de intrare ai simulării au fost preluați din măsurători experimentale efectuate în timp real.

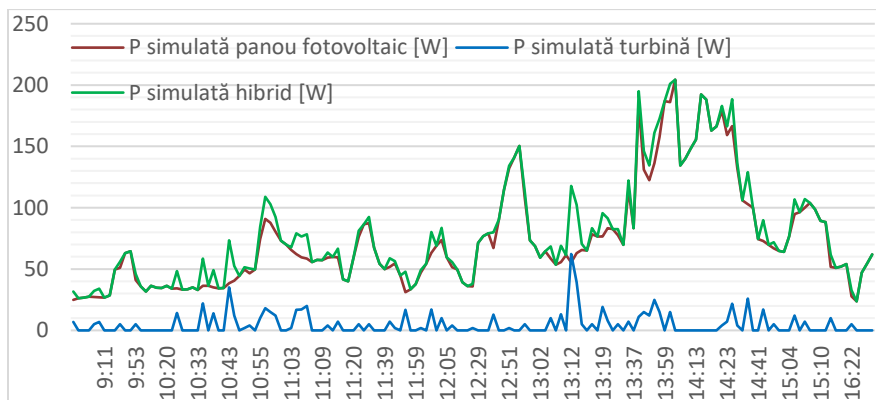


Fig. 4.8. Variația în timp a puterilor simulate în Simulink

După realizarea simulării valorilor pentru sistemul hibrid eolian-fotovoltaic, rezultatele obținute oferă o primă evaluare a comportamentului teoretic al sistemului în diverse scenarii operaționale. Aceste valori simulate ne permit să analizăm potențialul energetic și randamentul general al sistemului. În acest stadiu, sistemul nu a fost încă validat, astfel că datele necesită o comparație cu valorile experimentale (măsurătorile din teren) pentru a confirma acuratețea și viabilitatea modelului teoretic.

CAPITOLUL 5 – IMPLEMENTARE EXPERIMENTALĂ ȘI CONTRIBUȚII LA OPTIMIZAREA PERFORMANȚELOR SISTEMELOR HIBRIDE

În acest capitol, vom prezenta realizările experimentale și contribuțiile aduse în dezvoltarea sistemelor hibride. În cadrul acestui demers, s-a realizat proiectarea și implementarea a două sisteme de energie regenerabilă: un sistem eolian și un sistem fotovoltaic. Datele experimentale obținute pentru fiecare dintre aceste sisteme vor fi detaliate în secțiunile următoare, evidențiind specificațiile tehnice, metodele de testare și performanțele obținute.

Inițial, ne vom concentra pe proiectarea sistemului eolian, explicând etapele de dezvoltare, selecționarea componentelor și criteriile de optimizare utilizate pentru a maximiza randamentul energetic. Vor fi prezentate datele experimentale colectate în timpul testelor de performanță, analiza rezultatelor și concluziile trase.

Ulterior, vom detalia proiectarea sistemului fotovoltaic, urmând o abordare similară. Se vor discuta specificațiile tehnice, metodologia de testare și rezultatele experimentale obținute, cu accent pe factorii care influențează performanța sistemului.

În final, cele două sisteme vor fi integrate într-un sistem hibrid. Această secțiune va include descrierea procesului de integrare, analiza sinergiilor dintre cele două surse de energie și evaluarea performanței globale a sistemului hibrid.

5.1. PROIECTAREA SISTEMULUI EOLIAN

5.1.1. Realizarea experimentală a sistemului eolian

Prin intermediul laboratorului de “Surse regenerabile de energie și mentenanța echipamentelor electrice” din Academia Navală “Mircea cel Bătrân”, am avut acces la echipamente și resurse care au permis dezvoltarea unui sistem eolian optimizat pentru condițiile diferite de testare. Procesul de proiectare a inclus selectarea atentă a componentelor, configurarea și integrarea acestora într-un sistem capabil să genereze și să gestioneze eficient energia produsă de turbina eoliană cu ax orizontal. Proiectul a implicat dezvoltarea unui sistem eolian complet autonom, incluzând componente esențiale precum controlerul, bateriile de acumulatori și inverterul.

După ce am analizat și descris în detaliu toate componentele necesare pentru realizarea unui sistem eolian autonom, am trecut la etapa practică de proiectare și implementare a acestuia. În această etapă, am realizat schema electrică a întregului sistem, care includea conexiunile și interacțiunile dintre generatorul eolian, controlerul de încărcare, bateriile de acumulatori, inverterul și sistemul de consumatori cu sarcină variabilă.

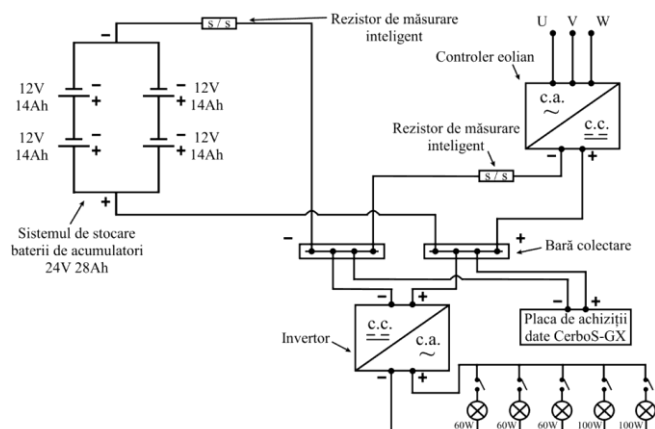


Fig. 5.1. Schema electrică al sistemului eolian autonom cu sarcină variabilă

Pe baza schemei electrice s-a realizat implementarea fizică a sistemului eolian autonom ce a permis colectarea de date experimentale relevante, cum ar fi tensiunea, curentul, puterea generată și randamentul sistemului în diferite condiții de operare pentru evaluarea experimentală a performanțelor și validarea modelului matematic simulat.

5.1.2. Rezultate experimentale

Odată realizat fizic, sistemul eolian a fost montat pe clădirea Facultății de Inginerie Marină din cadrul Academiei Navale “Mircea cel Bătrân”, în vederea ajustării parametrilor de funcționare ai controlerului, rezistorilor de măsurare inteligenți, inverterului, calibrarea plăcii de achiziții de date pentru monitorizarea precisă a variabilelor esențiale, precum și optimizarea conexiunilor electrice pentru a reduce pierderile și a îmbunătăți randamentul energetic. Ulterior au fost colectate date experimentale.

Prin intermediul rezistorului inteligent de măsurare conectat pe borna negativă la ieșire din controler-ul eolian, au fost monitorizate și transmise date către placa de achiziție care a înregistrat următorii parametri: curentul și tensiunea de încărcare, puterea de încărcare a bateriilor de acumulatori (ce se vor specifica în sistemul hibrid) și puterea electrică utilă generată de turbina eoliană. În paralel cu această activitate, a fost măsurată viteza vântului la nivelul turbinei eoliene folosind un anemometru model WT816A. Aceste măsurători au fost esențiale pentru a evalua influența condițiilor de vânt asupra performanței sistemului.



Fig. 5.2. Măsurarea vitezei vântului la nivelul turbinei eoliene cu ax orizontal

Turația rotorului turbinei eoliene a fost măsurată cu ajutorul unui tahometru, permițând astfel determinarea ulterioară a vitezei unghiulare a rotorului, ceea ce va facilita validarea datelor simulate prin compararea acestora cu valorile obținute din partea experimentală.

Datele experimentale utilizate în simulări au fost înregistrate pe 28.08.2024, într-o zi cu vânt moderat. Deși au fost colectate date și în zile cu vânt mai slab, pentru analiza finală au fost selectate doar valorile relevante, corespunzătoare rafalelor de vânt mai intense, când placa de achiziție a colectat valori semnificative ale parametrilor de interes.

Aceste date experimentale sunt esențiale pentru verificarea și validarea modelului simulat al sistemului. Comparând datele obținute în timpul testelor practice cu rezultatele simulărilor, va fi evaluată acuratețea modelului teoretic și vor fi identificate eventualele discrepante.

Placa de achiziție a primit datele experimentale de la rezistorul de măsurare inteligent ce a înregistrat la ieșirea din controler-ul eolian următorii parametri: puterea electrică utilă a turbinei eoliene, curentul, tensiunea și puterea de încărcare pentru bateriile de acumulatori (ultimii 3 parametri se vor utiliza în validarea sistemului hibrid).

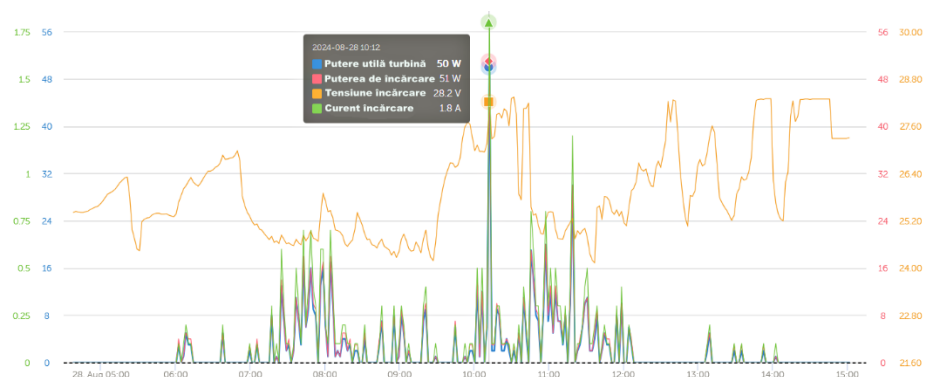


Fig. 5.3. Toți parametrii turbinei achiziționați de rezistorul de măsurare inteligent

5.1.3. Validarea datelor experimentale și simulate

Subcapitolul următor detaliază procesul de validare a datelor experimentale și simulate pentru turbina eoliană de 200W. Validarea reprezintă un pas esențial în asigurarea acurateții modelului matematic în simulările efectuate. Prin compararea datelor experimentale obținute în condiții reale de testare cu rezultatele generate de modelul matematic din simulare, se poate evalua gradul de concordanță între comportamentul real al turbinei și predicțiile teoretice. Această analiză va permite identificarea eventualelor abateri și ajustarea corespunzătoare a parametrilor modelului.

Prin aplicarea metodei de calcul a erorii relative, am putut compara valorile simulate cu cele obținute din experimente reale, identificând orice discrepanțe sau abateri minore. Această abordare a permis o evaluare detaliată a preciziei modelului, oferind în același timp informații esențiale despre posibilele îmbunătățiri necesare. Cu eroarea relativă în limite sub valori de 1.69%, putem confirma că modelul matematic elaborat reușește să reflecte comportamentul sistemului eolian, fiind astfel un instrument de încredere pentru analize și predicții viitoare.

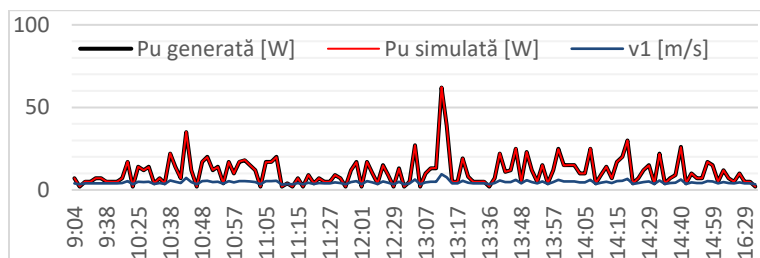


Fig. 5.4. Variația în timp a valorilor reale și simulate ale puterii electrice utile

5.2. PROIECTAREA SISTEMULUI FOTOVOLTAIC

5.2.1. Realizarea experimentală a sistemului fotovoltaic

În cadrul subcapitolului „Proiectarea sistemului eolian”, am detaliat toate componentele necesare pentru un sistem autonom complet, iar sistemul fotovoltaic va include toate elementele specificate anterior, cu excepția turbinei eoliene cu ax orizontal și a controlerului acesteia. În această secțiune, ne vom concentra exclusiv asupra particularităților sistemului fotovoltaic, abordând componentele specifice care nu au fost menționate în contextul sistemului eolian. Vom explora în detaliu aspectele legate de proiectarea și integrarea componentelor fotovoltaice și vom colecta date experimentale relevante pentru evaluarea performanței acestui sistem, asigurând astfel o analiză cuprinzătoare și precisă.

După ce am detaliat componentele specifice care vor fi integrate în sistemul fotovoltaic, am procedat la elaborarea schemei electrice. Această schemă a fost concepută pentru a asigura o funcționare optimă a sistemului, având în vedere toate particularitățile echipamentelor selectate.

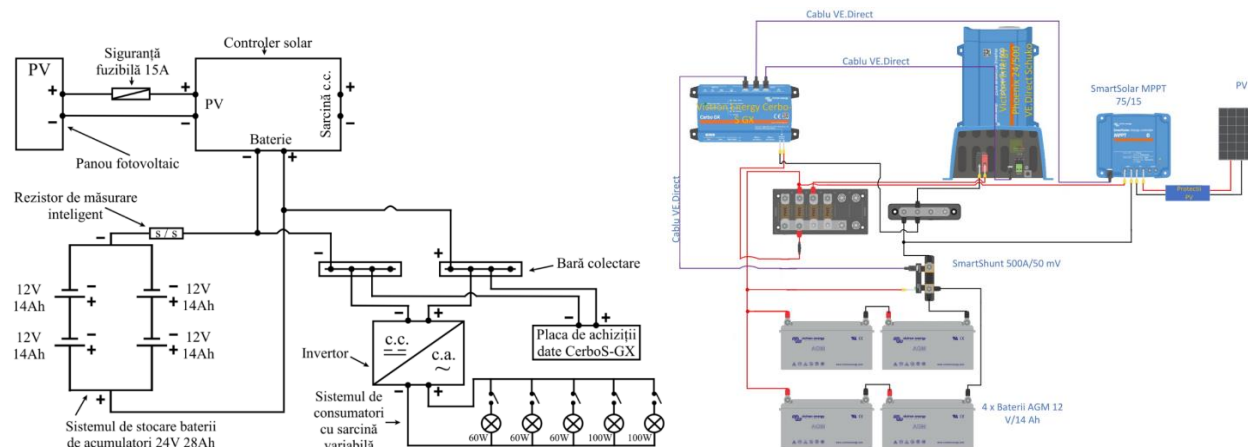


Fig. 5.5. Schema electrică al sistemului fotovoltaic

5.2.2. Rezultate experimentale

După finalizarea sistemului fotovoltaic, am obținut date experimentale privind tensiunea și puterea generată de panoul fotovoltaic, utilizând placa de achiziție de date. În acest subcapitol, ne-am concentrat exclusiv pe analiza producției de energie electrică. Radiația solară incidentă pe suprafață înclinată a fost măsurată cu ajutorul unui piranometru model PYR1307.



Fig. 5.6. Măsurarea radiației solare pe suprafață înclinată cu piranometrul model PYR1307

Datele experimentale au fost colectate într-o zi cu cer senin, având o nebulozitate de 1/8, pentru a valida modelul matematic realizat în cadrul simulării în Simulink. În vederea asigurării acurateței și randamentului modelului, au fost înregistrate măsurători atât în zile însorite, cât și în zile cu cer înnorat, pe parcursul perioadei 02.08.2023 - 13.09.2023. Măsurătorile experimentale din data de 23.08.2023 oferă o bază solidă pentru compararea performanțelor teoretice cu cele reale ale sistemului fotovoltaic realizat.

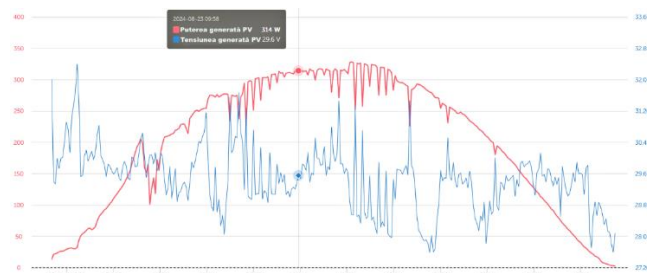


Fig. 5.7. Puterea și tensiunea generate de panoul fotovoltaic de 395W

Placa de achiziții a primit informații în timp real de la controlerul solar de încărcare ce a înregistrat parametri importanți legați de tensiunea și puterea electrică generate de panoul fotovoltaic (date utilizate în validarea modelelor matematice aferente sistemului fotovoltaic), precum și valorile curentului, tensiunii și puterii de încărcare a bateriilor de acumulatori (date folosite în procesul de validare a simulărilor sistemului hibrid).

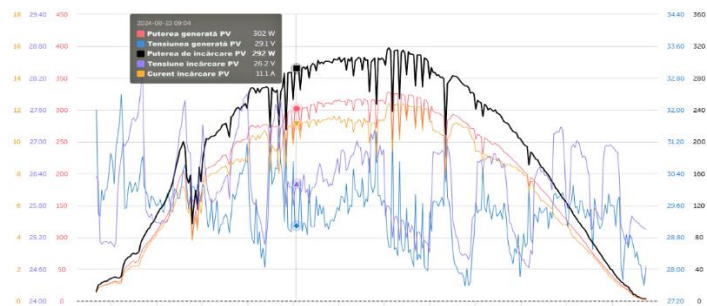


Fig. 5.8. Toți parametrii înregistrați de controler-ul de încărcare solar

5.2.3. Validarea datelor experimentale și simulate

O componentă esențială a oricărui proces de cercetare este verificarea și validarea rezultatelor obținute prin simulare, în raport cu datele experimentale. În cazul de față, pentru a asigura relevanța și acuratețea modelului matematic dezvoltat pentru sistemul fotovoltaic, este crucial să analizăm în ce măsură valorile simulate corespund cu cele obținute experimental.

În cadrul experimentului, placa de achiziții de date a înregistrat din minut în minut valori ale tensiunii și puterii generate de panoul fotovoltaic la nivelul controler-ului solar de încărcare, astfel încât am calculat curentul generat de panoul fotovoltaic în condiții reale.

Pe parcursul simulării, s-a utilizat modelul matematic de bază pentru configurația circuitului echivalent al unei celule fotovoltaice cu o singură diodă și s-au aplicat ca date de intrare: radiația solară, temperatura la nivelul celulei, unghiul de incidență al razelor soarelui pe suprafața înclinată al panoului și tensiunea obținută experimental de către panou. În urma simulării în software-ul Simulink, s-a obținut valoarea curentului și implicit puterea simulată al panoului.

Pentru a valida datele simulate cu cele experimentale, am folosit formula erorii erorii relative. Pe baza formulelor de calcul și utilizând datele obținute atât experimental, cât și prin simulare, a fost elaborat graficul care prezintă diferențele relevante între valorile respective.

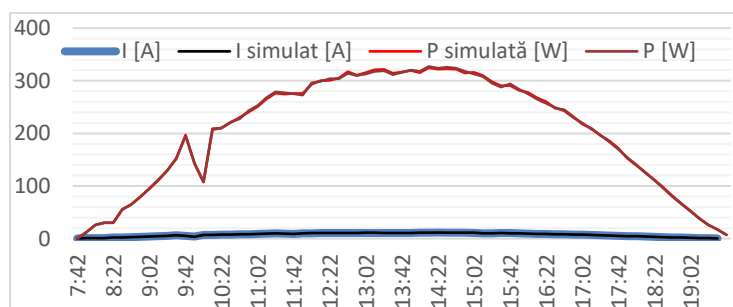


Fig. 5.9. Variația în timp a curentului și puterii obținute experimental raportate la valorile simulate

Datele simulate pentru sistemul fotovoltaic au fost validate printr-o comparație riguroasă cu cele obținute din măsurătorile experimentale, ceea ce a permis o evaluare precisă a acurateții modelului matematic utilizat. În urma acestei analize detaliate, s-a constatat că eroarea relativă maximă între valorile simulate și cele experimentale a fost de doar 1.1%, un rezultat remarcabil



Fig. 5.11. Cele 2 surse regenerabile de energie montate pe clădirea Facultății de Inginerie Marină

Din punct de vedere al managementului energiei și distribuției, controlerele eolian și solar reglează fluxul de energie către bateriile de acumulatori și consumatori, nu există riscuri de desincronizare (cum ar fi în cazul c.a.). Energia produsă de sursele regenerabile va încărca bateriile de acumulatori și alimenta consumatorii în funcție de cerințele sistemului și starea de încărcare al bancurilor. Atunci când energia produsă de ambele surse este mai mare decât consumul, excesul de energie va încărca bateriile de acumulatori. În cazul în care consumul depășește energia produsă, sistemul va extrage energie din bateriile de acumulatori. În funcție de rezistența circuitelor și a componentelor de legătură, pot apărea mici dezechilibre în fluxul de curent dintre surse și bara de distribuție, însă acestea sunt, în general, gestionate de controlere.

5.3.2. Rezultate experimentale obținute în urma testării sistemului hibrid de energie

În acest subcapitol sunt prezentate rezultatele experimentale obținute prin intermediul plăcii de achiziție în urma testelor practice realizate asupra sistemului hibrid, compus din cele două surse regenerabile de energie: eoliană și fotovoltaică. Etapele de măsurare au fost elaborate și detaliate anterior pentru fiecare componentă, utilizând o metodologie riguroasă pentru obținerea valorilor de referință, necesare validării modelului matematic simulat.

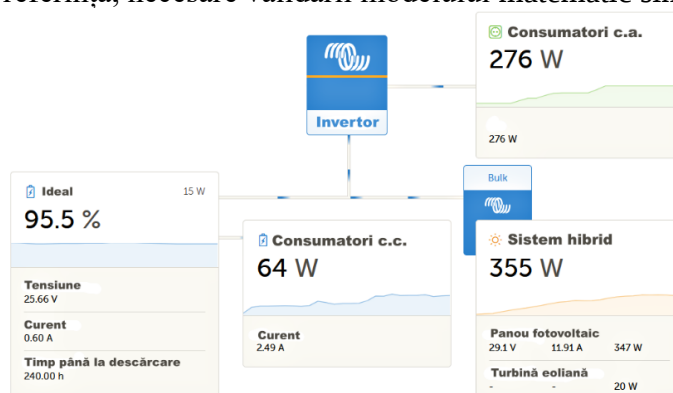


Fig. 5.12. Achiziționare de date în timp real de către placa de achiziție

Ziua de 28.08.2024 a fost aleasă strategic datorită condițiilor meteorologice favorabile unei evaluări detaliate. Nebulozitatea completă (8/8) a limitat performanța panoului fotovoltaic, permițând totodată o analiză aprofundată a producției de energie a turbinei eoliene. În acea zi, rafalele de vânt moderat au generat momente favorabile pentru înregistrarea unor parametri esențiali ai turbinei, contribuind la obținerea unor date precise pentru evaluarea sistemului hibrid. Aceste măsurători experimentale sunt esențiale pentru corelarea rezultatelor cu simulările teoretice și pentru validarea performanței sistemului sub condiții meteorologice variabile.

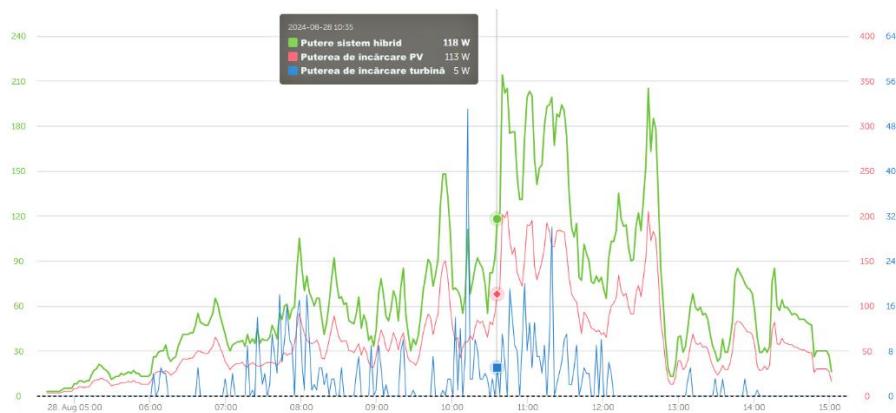


Fig. 5.13. Variația în timp a puterii de încărcare al sistemului hibrid

Sistemul a produs energie electrică în funcție de condițiile de mediu, respectiv vânt pentru turbina eoliană și radiație solară pentru panoul fotovoltaic. Pe lângă producția de energie, sistemul a avut și un consum propriu. Consumul intern de curent continuu (c.c.) a fost generat de echipamentele electronice necesare funcționării, precum placa de achiziție a datelor, rezistorii de măsurare inteligenți și inverterul. De asemenea, la ieșirea din inverter a existat un consum extern de curent alternativ (c.a.), care a alimentat sistemul de consumatori cu trepte variabile.

Energia produsă de întregul sistem a fost utilizată pentru a acoperi atât consumul intern, cât și pe cel extern, iar surplusul a fost direcționat pentru încărcarea bateriilor. În funcție de cererea de energie din partea consumatorilor și de condițiile de mediu, energia stocată în baterii a fost utilizată pentru a suplini producția insuficientă. Algoritmul de încărcare și gestionare al bateriilor a asigurat protecția acestora împotriva descărcării excesive, menținând un echilibru între producția sistemului și consumul total.

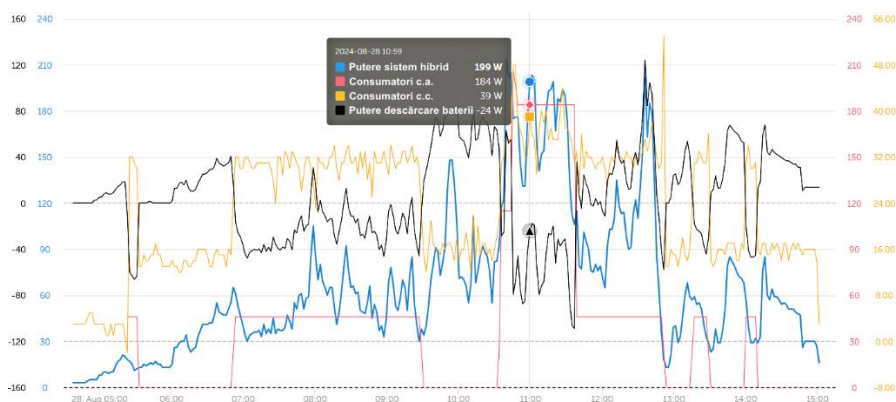


Fig. 5.14. Funcționarea sistemului hibrid conectat la sistemul de consumatori cu sarcină variabilă

5.3.3. Validarea datelor experimentale și simulate

În cadrul simulării sistemului hibrid de energie regenerabilă, valorile obținute pentru puterea generată de fiecare subsistem au fost combinate pentru a analiza performanța generală. Simulările au indicat că puterea totală generată de sistemul hibrid s-a încadrat în limitele anticipate pe baza datelor experimentale. Astfel, pentru turbina eoliană, simulările au produs o putere medie variabilă în funcție de viteza vântului, iar pentru sistemul fotovoltaic, puterea generată a fost corelată cu variațiile radiației solare și temperaturii.

Pe data de 28.08.2024 în condiții de radiație solară mai scăzută și vânturi moderate, puterea combinată a sistemului a atins o valoare maximă de 204 W, iar modelul matematic a

simulat o valoare de 204.38W. Analizând valoarea minimă înregistrată de sistemul hibrid, acesta a generat o putere de 26W, iar simularea în Simulink a determinat o valoare de 26.28W, confirmând o predicție precisă a puterii generate. În urma datelor reale ale sistemului hibrid, s-au obținut următoarele valori: pentru turbina eoliană, puterea generată a variat între 2.42 și 62.59 W, în funcție de viteza vântului real măsurat, iar simularea a determinat valori între 2.01 și 62.27W. Sistemul fotovoltaic a produs valori de putere cuprinse între 23.21 și 210.17 W, în funcție de radiația solară, temperatura celului și unghiul de incidență al razelor soarelui pe panou, iar modelul matematic în Simulink valori cuprinse între 24.78 și 204.38 W.

Obiectivul principal a constat în validarea rezultatelor simulate prin comparația cu datele reale obținute în urma testelor. În cadrul acestui proces de validare, s-a constatat că eroarea relativă nu depășește pragul de 2%, asigurând astfel acuratețea modelului matematic și corelarea cu performanțele practice ale sistemului hibrid.

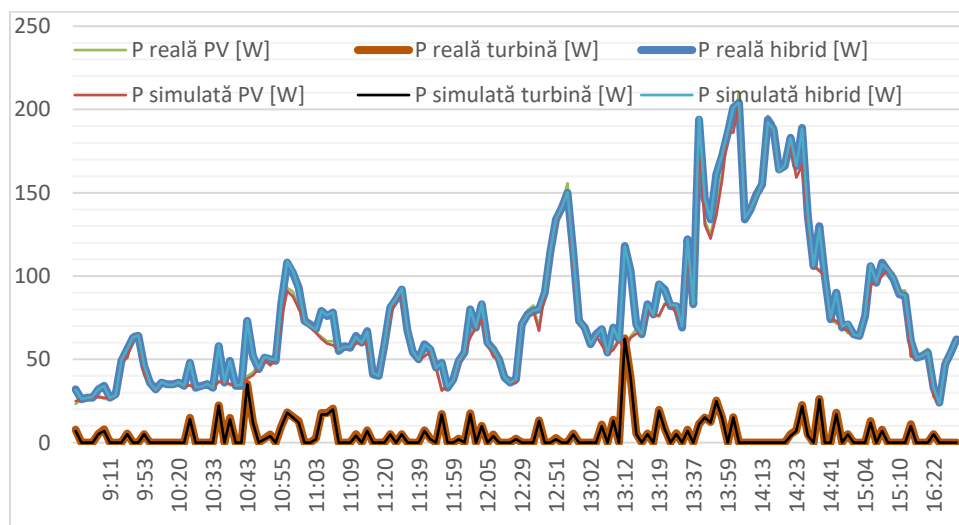


Fig. 5.15. Puterile reale și simulate ale sistemului hibrid eolian fotovoltaic

Modelul simulat pentru componenta eoliană este bine calibrat pentru intervalul de valori experimentale mici, ceea ce indică o validare bună. Simularea pentru partea fotovoltaică prezintă erori puțin mai mari, în special în zona medie a puterii (unde soarele poate fi parțial acoperit de nori) din cauza randamentului controler-ului de încărcare solar la ieșire ce nu-și menține constant randamentul de vârf de 98%. Simularea pentru puterea totală este precisă, iar diferențele între valorile experimentale și cele simulate sunt minore, sugerând că modelul general funcționează bine pentru predicția puterii hibride generate. Aceste concluzii sprijină validarea datelor simulate cu cele experimentale în teza de doctorat, demonstrând că modelul pentru sistemul hibrid eolian-fotovoltaic este eficient.

CAPITOLUL 6 - CONCLUZII ȘI PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE

6.1. CONTRIBUȚII PERSONALE

Una dintre contribuțiile principale ale tezei constă în **dezvoltarea unui model matematic original**, creat special pentru simularea interacțiunilor complexe dintre componentele unui sistem hibrid eolian-fotovoltaic. Acest model aduce un aport considerabil în domeniul energiei regenerabile prin capacitatea sa de a integra simultan o varietate de variabile dinamice și de a oferi o predicție precisă asupra comportamentului sistemului în funcție de condițiile meteorologice fluctuante. Spre deosebire de modelele tradiționale, care tratează deseori în mod separat fiecare sursă de energie și folosesc aproximări simplificate pentru a evalua interacțiunile dintre ele, modelul dezvoltat în cadrul acestei teze ia în considerare variațiile rapide și deseori imprevizibile ale vitezei vântului și intensității radiației solare. Această abordare mai complexă permite nu doar o simulare mai realistă, ci și o adaptare dinamică a modelului la condiții reale de funcționare, oferind soluții eficiente pentru gestionarea neuniformității producției de energie.

O altă contribuție personală majoră este **realizarea unui prototip experimental** care a permis validarea teoretică a modelului matematic dezvoltat. Prin intermediul acestui prototip, s-a realizat o comparație directă între datele simulate și cele măsurate în condiții reale, oferind o confirmare practică a funcționalității și acurateței modelului. Realizarea prototipului a necesitat o abordare interdisciplinară, implicând nu doar cunoștințe teoretice din domeniul matematicii și fizicii, dar și competențe tehnice în realizarea circuitelor, măsurarea parametrilor energetici și optimizarea componentelor sistemului hibrid. Această etapă a cercetării a demonstrat în mod clar că modelul propus nu doar că poate funcționa în condiții simulate, dar poate fi implementat cu succes și în sisteme fizice reale. Măsurătorile în timp real efectuate asupra prototipului au relevat o corelație foarte bună între rezultatele teoretice și performanțele sistemului din teren, confirmând astfel validitatea abordării adoptate.

Dezvoltarea unui sistem hibrid autonom, capabil să funcționeze în medii variabile și dificile, reprezintă o altă contribuție importantă. Prin autonomia sa, sistemul permite reducerea dependenței de rețelele energetice externe, un avantaj major în contextul utilizării acestuia în medii izolate. Un aspect esențial al acestei contribuții este capacitatea sistemului de a-și ajusta automat parametrii de funcționare, în funcție de disponibilitatea resurselor regenerabile și de necesitățile de consum. Astfel, acesta poate gestiona în mod eficient încărcarea și descărcarea bateriilor, precum și direcționarea energiei către consumatorii cei mai relevanți într-un anumit moment.

Mai mult, această cercetare deschide noi perspective pentru dezvoltarea unor sisteme hibride similare în alte domenii critice, cum ar fi alimentarea locuințelor izolate sau a bazelor de cercetare aflate în regiuni arctice, unde fluctuațiile energetice și condițiile extreme impun soluții tehnologice inovatoare și eficiente. Prin integrarea diferitelor surse regenerabile într-un sistem unic, capabil să răspundă rapid și precis la variațiile de resurse, contribuțiile acestei teze oferă un punct de plecare solid pentru extinderea utilizării energiei regenerabile în contexte variate și provocatoare. În plus, **modelul matematic propus poate fi adaptat și extins pentru a integra și alte surse de energie regenerabilă**, cum ar fi biomasa sau energia hidro, extinzând astfel aplicabilitatea sa în scenarii diferite și complexe.

În concluzie, această cercetare aduce contribuții semnificative atât pe plan teoretic, cât și aplicativ, nu doar prin dezvoltarea și validarea unui model matematic inovator, ci și prin realizarea unui prototip funcțional care poate fi aplicat cu succes în situații reale.

BIBLIOGRAFIE

- [1] H. Kang, S. Han, C. An, and Y.-K. Kim, "Design Process of a Small-Scaled Bladeless Vortex-Induced Wind Turbine with Tunable Resonance Mechanism," *2024 IEEE 22nd Int. Conf. Ind. Informatics*, pp. 1–6, Aug. 2024, doi: 10.1109/INDIN58382.2024.10774332.
- [2] D. Han, S. Huang, P. K. Abia Hui, and Y. Chen, "Development of a New Type of Vortex Bladeless Wind Turbine for Urban Energy Systems," *2024 9th Int. Conf. Power Renew. Energy, ICPRE 2024*, pp. 973–978, 2024, doi: 10.1109/ICPRE62586.2024.10768593.
- [3] H. Y. Kang and Y. K. Kim, "Development of Smart-Rubber Based Resonance Tuning Module for Bladeless Wind Turbine System," *Int. Conf. Control. Autom. Syst.*, pp. 1830–1833, 2023, doi: 10.23919/ICCAS59377.2023.10316880.
- [4] W. Barday, Z. S. Bahri, S. Ez-Zabri, and Y. Salih-Alj, "An Off-Grid Hybrid Piezoelectric-Electromagnetic Tuning System for Vortex Induced Vibration Bladeless Turbines," *Colloq. Inf. Sci. Technol. Cist*, pp. 342–349, 2023, doi: 10.1109/CIST56084.2023.10409962.
- [5] P. K. T, T. K. Makanur, P. R, M. M, V. G. S, and K. Manickavasagam, "Design and Analysis of a Miniaturized Vortex Induced Wind Turbine," pp. 1–6, Jul. 2024, doi: 10.1109/AMATHE61652.2024.10582248.
- [6] V. Bhardwaj and A. V. Ravi Teja, "Mathematical Modelling and Equivalent Circuit Representation of Bladeless Wind Turbines," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, vol. 2021-October, Oct. 2021, doi: 10.1109/IECON48115.2021.9589902.
- [7] A. C. R. Buela *et al.*, "Design and Nonlinear Static Simulation of a Small-Scale Vortex Bladeless Wind Power Generator," *2021 IEEE Int. Conf. Autom. Control Intell. Syst. I2CACIS 2021 - Proc.*, pp. 185–190, Jun. 2021, doi: 10.1109/I2CACIS52118.2021.9495882.
- [8] F. E. Tonny, M. K. Hassan kajal, T. Anam, A. M. Tafikul Islam, M. R. Mobarrat, and M. Hassan, "Optimizing Community Energy with Smart Hardware Integration in Offline Microgrid Systems," *2024 IEEE Int. Conf. Power, Electr. Electron. Ind. Appl.*, pp. 1–6, Sep. 2024, doi: 10.1109/PEEIACON63629.2024.10800723.
- [9] S. Pol, B. C. Houchens, D. V. Marian, and C. H. Westergaard, "Performance of aeromines for distributed wind energy," *AIAA Scitech 2020 Forum*, vol. 1 PartF, pp. 1–8, 2020, doi: 10.2514/6.2020-1241.
- [10] "Home." <https://aerominetechologies.com/> (accessed Sep. 22, 2024).
- [11] S. Pol, C. Westergaard, D. Marian, and B. Houchens, "Pilot-scale performance of AeroMINE at low wind speeds.," 2021, doi: 10.2172/1870762.
- [12] S. Budea, A. Ciocănea, and F. Opreș, "Natural Ventilation of Buildings by Using Venturi Devices Placed on the Rooftops," *2023 11th Int. Conf. ENERGY Environ. CIEM 2023*, 2023, doi: 10.1109/CIEM58573.2023.10349752.
- [13] "A Norwegian company is working on a wall of floating wind turbines." <https://www.cnbc.com/2023/05/16/a-norwegian-company-is-working-on-a-wall-of-floating-wind-turbines.html> (accessed Sep. 22, 2024).
- [14] "floating 'windcatchers' will rise 1,000 feet to power 80,000 homes each." <https://www.designboom.com/technology/norway-wind-catching-systems-wcs-floating-windcatcher-turbine-06-09-2021/> (accessed Sep. 22, 2024).
- [15] E. MacMahon and W. E. Leithead, "Performance Comparison of Optimised and Non-Optimised Yaw Control for a Multi Rotor System," *2018 IEEE Conf. Control Technol. Appl. CCTA 2018*, pp. 1638–1643, Oct. 2018, doi: 10.1109/CCTA.2018.8511353.
- [16] "Wind Catching Systems." <https://www.windcatching.com/> (accessed Sep. 22, 2024).
- [17] "Wind Catching Systems designs giant floating wind farm with 117 turbines."

<https://www.dezeen.com/2021/08/26/wind-catching-systems-floating-offshore-farm/> (accessed Sep. 22, 2024).

- [18] H. Kathuria, I. Singh, A. Gupta, G. Puniya, and B. Kumar, "Analysis of Bifacial Photovoltaic Panel Under Different Reflective Surfaces," *Proc. 3rd IEEE Int. Conf. Power Electron. Intell. Control Energy Syst. ICPEICES 2024*, pp. 933–938, 2024, doi: 10.1109/ICPEICES62430.2024.10719302.
- [19] S. K. Magableh, C. Wang, and F. Lin, "Utility-Scale Bifacial Solar Photovoltaic System: Optimum Sizing and Techno-Economic Evaluation," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, 2024, doi: 10.1109/PESGM51994.2024.10688984.
- [20] H. L. Tan *et al.*, "Investigation of Bifacial Gain and Albedo of Bifacial Photovoltaic Modules that Operate in a Tropical Site," *2024 8th Int. Conf. Green Energy Appl. ICGEA 2024*, pp. 265–270, 2024, doi: 10.1109/ICGEA60749.2024.10560565.
- [21] M. M. Hoque *et al.*, "Performance Analysis of a Grid Integrated Bifacial Solar Energy System for Dhaka-Mawa Expressway," *2023 10th IEEE Int. Conf. Power Syst. ICPS 2023*, 2023, doi: 10.1109/ICPS60393.2023.10428925.
- [22] A. Singh and D. Jones, "Snow Shedding properties of Bifacial PV Panels," *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, vol. 2022-June, pp. 646–648, 2022, doi: 10.1109/PVSC48317.2022.9938947.
- [23] T. M. Mahim, A. H. M. A. Rahim, and M. M. Rahman, "Weather Responsive Multidimensional Photovoltaic Efficiency Model for Simulation of Custom-Built Bifacial Panel," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 14, no. 5, pp. 848–860, Jul. 2024, doi: 10.1109/JPHOTOV.2024.3421252.
- [24] A. Anjum, A. H. Tanveer, M. K. Sikder, A. Arefin, M. Islam, and M. M. Rahman, "Bifacial Module Based Multilevel Solar Panel System: A Comparative Study," *2020 IEEE Reg. 10 Symp. TENSYP 2020*, pp. 324–327, Jun. 2020, doi: 10.1109/TENSYP50017.2020.9230649.
- [25] J. Li, M. Tang, B. An, and X. Guo, "Research on MPPT Strategy of Bifacial Photovoltaic Power Generation System Based on PSO," *2023 7th Int. Conf. Smart Grid Smart Cities, ICSGSC 2023*, pp. 468–473, 2023, doi: 10.1109/ICSGSC59580.2023.10319179.
- [26] R. Mahkeswaran, A. K. Ng, C. Toh, and B. Toh, "Maximising Solar Irradiation of Semi-transparent Solar Panels in a Multi-loop Aquaponics System," *5th Technol. Innov. Manag. Eng. Sci. Int. Conf. TIMES-iCON 2024 - Proc.*, 2024, doi: 10.1109/TIMES-ICON61890.2024.10630753.
- [27] K. Nath, B. Nath, M. S. Islam, A. N. Chowdhury, and M. A. Matin, "Exploring the Performance of QDIBSC for Spherical QD Structure," *12th IEEE Int. Conf. Renew. Energy Res. Appl. ICRERA 2023*, pp. 445–450, 2023, doi: 10.1109/ICRERA59003.2023.10269410.
- [28] A. Kavga, V. Thomopoulos, and T. Petrakis, "The Contribution of Semi-Transparent Photovoltaics for Energy Autonomy in Aloe Vera Greenhouse Cultivation," *2023 31st Mediterr. Conf. Control Autom. MED 2023*, pp. 85–88, 2023, doi: 10.1109/MED59994.2023.10185759.
- [29] H. Apostoleris, K. Younes, and M. Chiesa, "A simple, semi-empirical performance modeling approach for partially transparent tracking-integrated concentrator photovoltaics," *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, pp. 1373–1376, Jun. 2021, doi: 10.1109/PVSC43889.2021.9518698.
- [30] A. Ponmalar, A. Jose Anand, P. Saravanan, S. Deeba, and J. Br, "IoT Enabled Inexhaustible E-vehicle using Transparent Solar Panel," *2022 Int. Conf. Commun. Comput. Internet Things, IC3IoT 2022 - Proc.*, 2022, doi: 10.1109/IC3IOT53935.2022.9767921.

- [31] E. Irmak, M. S. Ayaz, S. G. Gok, and A. B. Sahin, "A survey on public awareness towards renewable energy in Turkey," *3rd Int. Conf. Renew. Energy Res. Appl. ICRERA 2014*, pp. 932–937, Jan. 2014, doi: 10.1109/ICRERA.2014.7016523.
- [32] M. Beken, B. Hangun, and O. Eyecioglu, "Classification of turkey among european countries by years in terms of energy efficiency, total renewable energy, energy consumption, greenhouse gas emission and energy import dependency by using machine learning," *8th Int. Conf. Renew. Energy Res. Appl. ICRERA 2019*, pp. 951–956, Nov. 2019, doi: 10.1109/ICRERA47325.2019.8996583.
- [33] R. T. Jacob and R. Liyanapathirana, "Technical Feasibility in Reaching Renewable Energy Targets; Case Study on Australia," *Proc. 4th Int. Conf. Electr. Energy Syst. ICEES 2018*, pp. 630–634, Aug. 2018, doi: 10.1109/ICEES.2018.8443251.
- [34] S. R. Bull, "Renewable energy today and tomorrow," *Proc. IEEE*, vol. 89, no. 8, pp. 1216–1226, 2001, doi: 10.1109/5.940290.
- [35] D. Braga, "Optimal Capacity and Feasibility of Energy Storage Systems for Power Plants Using Variable Renewable Energy Sources," *SIELMEN 2021 - Proc. 11th Int. Conf. Electromechanical Energy Syst.*, pp. 87–91, 2021, doi: 10.1109/SIELMEN53755.2021.9600392.
- [36] Z. Tang, Y. Yang, and F. Blaabjerg, "Power electronics: The enabling technology for renewable energy integration," *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 8, no. 1, pp. 39–52, 2022, doi: 10.17775/CSEEJPES.2021.02850.
- [37] I. Renewable and E. Agency, *Renewable capacity statistics 2016 Statistiques de capacité renouvelable 2016 Estadísticas de capacidad renovable 2016*. 2016.
- [38] F. Blaabjerg and K. Ma, "Future on power electronics for wind turbine systems," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 1, no. 3, pp. 139–152, Sep. 2013, doi: 10.1109/JESTPE.2013.2275978.
- [39] J. Taghinezhad, E. Mahmoodi, M. Masdari, and R. Alimardani, "Spectral Analyses of an Optimized Ducted Wind Turbine using Hot-Wire Anemometry," *7th Iran Wind Energy Conf. IWEC 2021*, May 2021, doi: 10.1109/IWEC52400.2021.9467033.
- [40] O. Cristea, M. O. Popescu, F. Deliu, and A. S. Calinciuc, "Dynamic performances of a wind power system," *2014 Int. Symp. Fundam. Electr. Eng. ISFEE 2014*, Feb. 2015, doi: 10.1109/ISFEE.2014.7050635.
- [41] Y. Yin, M. Liao, and P. Lyu, "The dynamic stability analysis of wind turbines under different control strategies," *Proc. 5th IEEE Int. Conf. Electr. Util. Deregulation, Restruct. Power Technol. DRPT 2015*, pp. 2581–2586, Mar. 2016, doi: 10.1109/DRPT.2015.7432683.
- [42] C. Nițu, A. S. Dobrescu, and A. Oprea, "Sisteme inteligente în ecologie: surse regenerabile de energie: aplicații," 2016, Accessed: Aug. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.matrixrom.ro/produs/sisteme-inteligente-in-ecologie-surse-regenerabile-de-energie-aplicatii/>.
- [43] K. Naoi and M. Shiono, "Relationship between Incident Angle of Wind on Rotor Blade and Output of a Drag-type Multi-blade Vertical-Axis Wind Turbine with Stationary Multi-vanes," *2021 11th Int. Conf. Power, Energy Electr. Eng. CPEEE 2021*, pp. 147–152, Feb. 2021, doi: 10.1109/CPEEE51686.2021.9383349.
- [44] C. Popa, "Review of renewable energy sources and offshore wind turbine technology.," *Sci. Bull. "Mircea cel Batran" Nav. Acad.*, vol. 24, no. 2, pp. 1–16, 2021, Accessed: Jan. 23, 2025. [Online]. Available: <https://openurl.ebsco.com/contentitem/edb:156420514?sid=ebsco:plink:crawler&id=ebsco:edb:156420514&crl=c>.
- [45] T. Catalina, "Utilizarea surselor de energie regenerabilă în clădiri," 2015, Accessed: Sep.

- 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.matrixrom.ro/produs/utilizarea-surselor-de-energie-regenerabila-in-cladiri/>.
- [46] N. S. Patil and Y. N. Bhosle, "A review on wind turbine generator topologies," *Proc. 2013 Int. Conf. Power, Energy Control. ICPEC 2013*, pp. 625–629, 2013, doi: 10.1109/ICPEC.2013.6527733.
- [47] A. Badea and E. Agir, "Adrian BADEA Horia NECULA coordonatori Editura Agir."
- [48] M. Bălăceanu, N.-S. Popa, V. Nae, M.-C. Târhoacă, and C. Popa, "State of the Art in Wind Turbine and Photovoltaic Panels," *Tech. Electro*, vol. 2, pp. 1–9, Mar. 2024, Accessed: Jan. 23, 2025. [Online]. Available: <https://www.techniumscience.com/index.php/electro/article/view/10751>.
- [49] M. Liao, L. Dong, L. Jin, and S. Wang, "Study on rotational speed feedback torque control for wind turbine generator system," *2009 Int. Conf. Energy Environ. Technol. ICEET 2009*, vol. 1, pp. 853–856, 2009, doi: 10.1109/ICEET.2009.211.
- [50] J. Alshehri, A. Alzahrani, and M. Khalid, "Wind Energy Conversion Systems and Artificial Neural Networks: Role and Applications," *2019 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Asia, ISGT 2019*, pp. 1777–1782, May 2019, doi: 10.1109/ISGT-ASIA.2019.8881404.
- [51] P. Tinglong, J. Zhicheng, and J. Zhenhua, "Maximum power point tracking of wind energy conversion systems based on sliding mode extremum seeking control," *2008 IEEE Energy 2030 Conf. ENERGY 2008*, 2008, doi: 10.1109/ENERGY.2008.4781032.
- [52] F. Blaabjerg and K. Ma, "Wind Energy Systems," *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 11, pp. 2116–2131, Nov. 2017, doi: 10.1109/JPROC.2017.2695485.
- [53] ABB, "Technical Application Papers No.13 Wind power plants," no. 13, p. 136, 2011, [Online]. Available: <https://library.e.abb.com/public/92faf0c1913f5651c1257937002f88e8/1SDC007112G0201.pdf>.
- [54] C. I. Hoarca and F. M. Enescu, "On the energy efficiency of standalone fuel cell/renewable hybrid power sources Part II: Simulation results for variable load profile with different renewable energy sources profiles (RES)," *2018 Int. Conf. Appl. Theor. Electr. ICATE 2018 - Proc.*, Nov. 2018, doi: 10.1109/ICATE.2018.8551440.
- [55] N. S. Popa, M. G. Manea, C. Popa, V. Mocanu, H. Isac, and M. O. Popescu, "Solar Energy Utilization for Powering Surface Drones: Study on Mathematical Models for Electricity Production Prediction," *UPB Sci. Bull. Ser. C Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 86, no. 4, pp. 303–314, 2024.
- [56] B. Liu, S. Duan, F. Liu, and P. Xu, "Analysis and improvement of maximum power point tracking algorithm based on incremental conductance method for photovoltaic array," *Proc. Int. Conf. Power Electron. Drive Syst.*, pp. 637–641, 2007, doi: 10.1109/PEDS.2007.4487768.
- [57] C. Popa, M.-O. Popescu, M. Târhoacă, and N.-S. Popa, "Photovoltaic panels efficiency on the ships," *Tech. Rom. J. Appl. Sci. Technol.*, vol. 14, pp. 45–50, Oct. 2023, doi: 10.47577/TECHNIUM.V14I.9673.
- [58] N. S. Popa, O. Cristea, C. Popa, V. Mocanu, and A. I. Dinu, "The Study on the Implementation of High-Power Photovoltaic Systems on Military Platforms," *2023 Int. Symp. Fundam. Electr. Eng. ISFEE 2023*, 2023, doi: 10.1109/ISFEE60884.2023.10637075.
- [59] "Photovoltaic Industrial Systems: An Environmental Approach (Green Energy and Technology): Papadopoulos, Elena: 9783642163005: Amazon.com: Books." <https://www.amazon.com/Photovoltaic-Industrial-Systems-Environmental-Technology/dp/3642163009> (accessed Sep. 20, 2024).

- [60] H. Abbes, K. Loukil, H. Abid, M. Abid, and A. Toumi, "Implementation of a Maximum Power Point Tracking fuzzy controller on FPGA circuit for a photovoltaic system," *Int. Conf. Intell. Syst. Des. Appl. ISDA*, vol. 2016-June, pp. 386–391, Jun. 2016, doi: 10.1109/ISDA.2015.7489260.
- [61] K. Amara *et al.*, "Improved Performance of a PV Solar Panel with Adaptive Neuro Fuzzy Inference System ANFIS based MPPT," *7th Int. IEEE Conf. Renew. Energy Res. Appl. ICRERA 2018*, pp. 1098–1101, Dec. 2018, doi: 10.1109/ICRERA.2018.8566818.
- [62] B. T. Attayah, A. I. Alzaidi, N. Fasel, and M. Rava, "Enhancing the Photovoltaic System Output Performance through the Use of Maximum Power Point Tracking and Fuzzy Logic Control," *ICPEA 2021 - 2021 IEEE Int. Conf. Power Eng. Appl.*, pp. 68–72, Mar. 2021, doi: 10.1109/ICPEA51500.2021.9417752.
- [63] N. Yan, S. Li, T. Yan, and S. H. Ma, "Study on the whole life cycle energy management method of energy storage system with risk correction control," *2020 IEEE 4th Conf. Energy Internet Energy Syst. Integr. Connect. Grids Towar. a Low-Carbon High-Efficiency Energy Syst. EI2 2020*, pp. 2450–2454, Oct. 2020, doi: 10.1109/EI250167.2020.9346933.
- [64] G. E. Asimakopoulou, A. L. Dimeas, and N. D. Hatziargyriou, "Leader-follower strategies for energy management of multi-microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 4, pp. 1909–1916, Dec. 2013, doi: 10.1109/TSG.2013.2256941.
- [65] T. Hennessy and M. Kuntz, "The multiple benefits of integrating electricity storage with wind energy," *2005 IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet.*, vol. 2, pp. 1952–1953, 2005, doi: 10.1109/PES.2005.1489366.
- [66] C. POPA, I. CHIABURU, and H. ISAC, "REVIEW OF BATTERY TYPES AND APPLICATION TO WIND POWER GENERATION SYSTEM.," *J. Mar. Technol. Environ.*, vol. 2, no. 2, pp. 72–79, Oct. 2023, doi: 10.53464/JMTE.02.2023.12.
- [67] N.-S. POPA, C. POPA, V. MOCANU, and L.-M. POPA, "STATE OF THE ART IN BATTERY TECHNOLOGY: INNOVATIONS AND ADVANCEMENTS," *J. Mar. Technol. Environ.*, vol. 2, no. 2, p. 80, Jul. 2023, doi: 10.53464/JMTE.02.2023.13.
- [68] S. Teleke, M. E. Baran, S. Bhattacharya, and A. Q. Huang, "Optimal control of battery energy storage for wind farm dispatching," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, no. 3, pp. 787–794, Sep. 2010, doi: 10.1109/TEC.2010.2041550.
- [69] X. Y. Wang, D. M. Vilathgamuwa, and S. S. Choi, "Determination of battery storage capacity in energy buffer for wind farm," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 23, no. 3, pp. 868–878, 2008, doi: 10.1109/TEC.2008.921556.
- [70] C. Luo and B. T. Ooi, "Frequency deviation of thermal power plants due to wind farms," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 21, no. 3, pp. 708–716, Sep. 2006, doi: 10.1109/TEC.2006.874210.
- [71] X. Shi *et al.*, "Research on Energy Storage Configuration Method Based on Wind and Solar Volatility," *2020 10th Int. Conf. Power Energy Syst. ICPES 2020*, pp. 464–468, Dec. 2020, doi: 10.1109/ICPES51309.2020.9349645.
- [72] C. Xing, X. Xi, X. He, and M. Liu, "Research on the MPPT Control Simulation of Wind and Photovoltaic Complementary Power Generation System," *iSPEC 2020 - Proc. IEEE Sustain. Power Energy Conf. Energy Transit. Energy Internet*, pp. 1058–1063, Nov. 2020, doi: 10.1109/ISPEC50848.2020.9350965.
- [73] P. Molotov, A. Vaskov, and M. Tyagunov, "Modeling Processes in Microgrids with Renewable Energy Sources," *Proc. - 2018 Int. Ural Conf. Green Energy, Ural. 2018*, pp. 203–208, Nov. 2018, doi: 10.1109/URALCON.2018.8544313.
- [74] A. Wasonga, M. Saulo, and V. Odhiambo, "Solar-Wind Hybrid Energy System for New Engineering Complex- Technical University of Mombasa,"

- [Http://www.sciencepublishinggroup.com](http://www.sciencepublishinggroup.com), vol. 4, no. 2, p. 80, 2014, doi: 10.11648/j.ijepe.s.2015040201.17.
- [75] G. Wang, J. Zhang, W. Zhang, H. Liu, and X. Cui, "Research on Transient Stability Analysis of Wind-Photovoltaic-Thermal-bundled Power Transmitted System," *5th IEEE Conf. Energy Internet Energy Syst. Integr. Energy Internet Carbon Neutrality, EI2 2021*, pp. 366–370, 2021, doi: 10.1109/EI252483.2021.9713651.
 - [76] V. Chaudhary, A. Bhargava, and S. Bhasin, "Modeling and Simulation of grid connected hybrid power system integrated with solar PV/Wind and controlled by Voltage Regulator," *Proc. 4th Int. Conf. Commun. Electron. Syst. ICCES 2019*, pp. 1316–1320, Jul. 2019, doi: 10.1109/ICCES45898.2019.9002036.
 - [77] H. K. V Lotsch *et al.*, *Optical Sciences*. 2007.
 - [78] Z. R. Labidi and A. Mami, "Study and simulation of a hybrid photovoltaic-wind generator connected to a DC load," *16th Int. Conf. Sci. Tech. Autom. Control Comput. Eng. STA 2015*, pp. 731–736, Jul. 2016, doi: 10.1109/STA.2015.7505101.
 - [79] C. Popa, N.-S. Popa, H. Isac, A.-D. Deliu, and C. Andronic, "Comprehensive analysis of offshore wind-photovoltaic hybrid systems: unveiling state-of-the-art autonomous components for maritime applications," *Tech. Rom. J. Appl. Sci. Technol.*, vol. 19, pp. 50–58, Feb. 2024, doi: 10.47577/TECHNIUM.V19I.10624.
 - [80] M. A. S. Masoum, S. M. Mousavi Badejani, and M. Kalantar, "Optimal placement of hybrid PV-wind systems using genetic algorithm," *Innov. Smart Grid Technol. Conf. ISGT 2010*, 2010, doi: 10.1109/ISGT.2010.5434746.
 - [81] M. Y. Allani, M. Jomaa, D. Mezghani, and A. Mami, "Modelling and simulation of the hybrid system PV-wind with MATLAB/SIMULINK," *2018 9th Int. Renew. Energy Congr. IREC 2018*, pp. 1–6, May 2018, doi: 10.1109/IREC.2018.8362514.
 - [82] S. T. Broujeni, S. H. Fathi, and J. S. Moghani, "Hybrid PV/wind power system control for maximum power extraction and output voltage regulation," *3rd Int. Conf. Control. Instrumentation, Autom. ICCIA 2013*, pp. 59–64, Sep. 2014, doi: 10.1109/ICCIAUTOM.2013.6912809.
 - [83] M. Jomaa, M. Y. Allani, F. Tadeo, and A. Mami, "Design and control of the hybrid system PV-Wind connected to the DC load," *2018 9th Int. Renew. Energy Congr. IREC 2018*, pp. 1–6, May 2018, doi: 10.1109/IREC.2018.8362515.
 - [84] S. Bhamu, N. Pathak, and T. S. Bhatti, "Power control of wind-biogas-PV based hybrid system," *2018 Int. Conf. Comput. Power Commun. Technol. GUCON 2018*, pp. 421–426, Mar. 2019, doi: 10.1109/GUCON.2018.8675057.
 - [85] I. A. Adejumbi, S. G. Oyagbinrin, F. G. Akinboro, M. B. Olajide, and O. State, "Hybrid Solar and Wind Power: an Essential for Information Communication Technology Infrastructure and People in Rural Communities," *Int. J. Res. Rev. Appl. Sci.*, vol. 9, no. October, pp. 130–138, 2011, [Online]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/bf99/c332bcdcd9e2fa23a875c819b1500e046361.pdf>.
 - [86] T. Catalina, "Utilizarea surselor de energie regenerabilă în clădiri," 2015, Accessed: Nov. 21, 2023. [Online]. Available: <https://www.matrixrom.ro/produs/utilizarea-surselor-de-energie-regenerabila-in-cladiri/>.
 - [87] R. Sarkar, S. Julai, C. W. Tong, O. Z. Chao, and M. Rahman, "Mathematical modelling and simulation of induction generator based wind turbine in MATLAB / SIMULINK MATHEMATICAL MODELLING AND SIMULATION OF INDUCTION GENERATOR BASED WIND TURBINE IN MATLAB / SIMULINK," no. April 2016, 2015.
 - [88] M. Yin, S. Member, G. Li, and M. Zhou, "Modeling of the Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator for Integration," pp. 1–6, 2007.

- [89] M. Jus, “MATHEMATICAL MODEL OF WIND TURBINE IN GRID-OFF SYSTEM,” vol. 14, no. 1, pp. 10–13, 2020.
- [90] “Photovoltaic plants Cutting edge technology. From sun to socket.”
- [91] A. Rawan, N. M. Yasin, and A. N. K. Alshamaa, “Design and Simulation of a Grid Tied Single Phase SPWM Inverter Using Matlab Design and Simulation of a Grid Tied Single Phase SPWM Inverter Using Matlab,” 2020, doi: 10.1088/1757-899X/745/1/012009.
- [92] J. Ramos-hernanz, J. M. Lopez-guede, and E. Zulueta, “Reverse Saturation Current Analysis in Photovoltaic Cell Models,” vol. 12, pp. 231–237, 2017.
- [93] S. Modi, “Mathematical Modeling , Simulation and Performance Analysis of Solar Cell,” *2018 Int. Conf. Power Energy, Environ. Intell. Control*, pp. 730–734, 2018.
- [94] D. C. Huynh and M. W. Dunnigan, “Unknown Parameter Estimation of a Detailed Solar PV Cell Model,” 2020, doi: 10.1109/TENCON50793.2020.9293714.
- [95] R. Ben Ali, E. Aridhi, and A. Mami, “Design, modeling and simulation of hybrid power system (Photovoltaic-WIND),” *2016 17th Int. Conf. Sci. Tech. Autom. Control Comput. Eng. STA 2016 - Proc.*, pp. 461–467, Jun. 2017, doi: 10.1109/STA.2016.7952008.
- [96] T. E. Rao, S. Elango, and G. G. Swamy, “Power management strategy between pv-wind-fuel hybrid system,” *Proc. 7th Int. Conf. Electr. Energy Syst. ICEES 2021*, pp. 101–107, Feb. 2021, doi: 10.1109/ICEES51510.2021.9383706.
- [97] N. A. Ahmed and M. Miyatake, “A Stand-Alone Hybrid Generation System Combining Solar Photovoltaic and Wind Turbine with Simple Maximum Power Point Tracking Control,” pp. 1–7, Feb. 2009, doi: 10.1109/IPEMC.2006.4777984.
- [98] K. Anoune, M. Bouya, M. Ghazouani, A. Astito, and A. Ben Abdellah, “Hybrid renewable energy system to maximize the electrical power production,” *Proc. 2016 Int. Renew. Sustain. Energy Conf. IRSEC 2016*, pp. 533–539, Jul. 2017, doi: 10.1109/IRSEC.2016.7983992.